



La investigación PAN tropical de bioGeoquímica y Adaptación Ecológica (PANGEA): El alcance de una campaña de campo patrocinada por la NASA

Informe final-diciembre de 2024

Autores principales

* Denota autores coordinadores

Elsa M. Ordway* (University of California, Los Angeles [UCLA]), Michael Keller* (United States Forest Service [USFS], Jet Propulsion Laboratory [JPL]), Marcos Longo (Lawrence Berkeley National Laboratory [LBNL]), Robinson Negron-Juarez (LBNL), Yanlei Feng (Massachusetts Institute of Technology [MIT]), Hannah Stouter (UCLA), Isaac N. Aguilar Rivera (California Institute of Technology [Caltech]), Ane Alencar (Amazon Environmental Research Institute [IPAM]), Adia Bey (NASA Goddard Space Flight Center [GSFC], University of Maryland [UMD]), Renato K. Braghieri (Caltech, JPL), Anabelle Cardoso (University of Buffalo & University of Cape Town), Dana Chadwick (JPL), Jose D. Fuentes (Pennsylvania State University [Penn State]), Regina Eckert (JPL), Temilola Fatoyinbo (GSFC), António Ferraz (JPL), Liane Guild (NASA Ames Research Center [ARC]), Matthew Johnson (ARC), Esi Kane (University of Energy and Natural Resources, Sunyani-Ghana), Lydie-Stella Koutika (Research Center on Productivity and Sustainability of Industrial Plantations [CRDPI]), Yue Li (UCLA), Junjie Liu (JPL), Ian McCubbin (JPL), Félicien Meunier (Ghent University), Charles Miller (JPL, Caltech), Helene C. Muller-Landau (Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales [STRI]), Teodyl Nkuintchua (Instituto de Recursos Mundiales), Matheus Nunes (UMD), Le Bienfaiteur Sagang Takougoum (UCLA), Maria J. Santos (Universidad de Zurich), Fabian D. Schneider (Universidad de Aarhus), Marc Simard (JPL), Bonaventure Sonké (Universidad de Yaoundé I), César Terrer (MIT), Marius von Essen (UCLA), Michelle Y. Wong (Universidad de Yale), Sarah Worden (JPL), Xiangming Xiao (Universidad de Oklahoma [OU]), Virginia Zaunbrecher (UCLA).

Autores colaboradores

Marijn Bauters (Universidad de Gante), Pascal Boeckx (Universidad de Gante), Jennifer Bowen (Universidad de Stanford), Iniquilipi Chiari (Alianza Global de Comunidades Territoriales [GATC]), Ovidiu Csillik (Universidad de Wake Forest), Gloria Diez (GATC), Marcelo Doroso (GATC), Deborah Delgado Pugley (Pontificia Universidad Católica del Perú [PUCP]), Wannes Hubau (Universidad de Gante), Alejandra Echeverri Ochoa (Universidad de California, Berkeley), Evan Gora (Instituto Cary de Estudios de Ecosistemas), Alison Hoyt (Stanford), Juan Carlos Jintiach (GATC), Victor Maque (OU), Clarice Perryman (Stanford), Zoe Pierrat (JPL), Leila Saraiva (GATC), Debjani Singh (Laboratorio Nacional Oak Ridge [ORNL]), Iroro Tanshi (Universidad de Washington & Universidad de Harvard), Small Mammal Conservation Organisation [SMACON], Jill Thompson (UK Centre for Ecology & Hydrology [UKCEH]), Hans Verbeeck (Ghent University)

Prólogo

Las Oportunidades de Investigación en Ciencias Espaciales y de la Tierra de la NASA publicadas en 2022 solicitaron propuestas para llevar a cabo estudios de alcance para identificar las preguntas científicas y desarrollar el diseño inicial del estudio y el concepto de implementación para una nueva campaña de campo de Ecología Terrestre de la NASA. En la primavera de 2023, la NASA seleccionó dos proyectos para su financiación, incluyendo un proyecto titulado: "A Scoping Study for the NASA Tropical Terrestrial Ecology Campaign" (NASA Grant 80NSSC23K1019 a la Universidad de California, Los Ángeles). Este informe contiene las recomendaciones de este estudio de alcance, que presenta la investigación PAN tropical de bioGeoquímica y Adaptación Ecológica (PANGEA). La NASA esbozó diez expectativas que debían identificarse para cada estudio de alcance:

1. Cuestiones y problemas científicos.
2. El estado actual de la ciencia.
3. El potencial de un avance científico importante y significativo.
4. El papel central y crítico de la teledetección de la NASA.
5. Los componentes científicos esenciales del estudio y por qué es necesario un trabajo en equipo coordinado para su realización.
6. Un diseño general del estudio que identifique la infraestructura necesaria de observación (por ejemplo, observaciones espaciales, aéreas y/o de apoyo *in situ*) y de análisis (por ejemplo, modelos, datos y sistema de información).
7. La viabilidad del proyecto propuesto, tanto técnica como logística.
8. La participación de la comunidad investigadora en general para recabar opiniones sobre las ideas, evaluar el interés y fomentar la diversidad y la inclusión.
9. Las competencias disciplinarias necesarias para llevar a cabo el estudio e implicar a los socios potenciales en sus actividades de planificación.
10. Posible uso de los resultados para aplicaciones y apoyo a la toma de decisiones.

Este libro blanco proporciona 1) la justificación científica; 2) un concepto de diseño de estudio inicial; 3) una presentación de las preguntas científicas, metas y objetivos; 4) la justificación en términos de estado del arte, relevancia y avances esperados; 5) conceptos de implementación; y 6) otra información para permitir a la NASA evaluar plenamente el proyecto. Esbozamos el concepto de PANGEA, incluyendo los Temas Científicos de PANGEA (Sección 2), las Preguntas Científicas (Sección 3), los avances científicos y técnicos derivados de PANGEA (Sección 4), el papel crítico de la teledetección de la NASA (Sección 5), la estrategia de investigación de PANGEA y el diseño del estudio (Sección 6), las prioridades de capacitación y formación de PANGEA (Sección 7), la estrategia de participación de la comunidad (Sección 8), la capacidad de permitir la Acción por la Tierra (Sección 9), y la viabilidad técnica y logística (Sección 10).

PANGEA ofrece un enfoque modular: Hemos seleccionado un Dominio Central para priorizar las mediciones terrestres y las observaciones aéreas en los trópicos africanos, que tienen importantes lagunas de datos y conocimientos, y las comparaciones con las Américas tropicales. En la Sección 6.2.2 se identifican los paisajes candidatos en el Dominio Central. También hemos seleccionado un Dominio Extendido, que abarca los bosques pantropicales de otros lugares, incluyendo Asia y Australia. El Dominio Extendido será el centro de los análisis de teledetección por satélite y modelización. Los límites del Dominio Extendido se identifican en la Sección 1.4. Durante el proceso de definición del alcance, el equipo de PANGEA se comprometió con una amplia comunidad de socios potenciales en ambos dominios, solicitando y respondiendo a sus comentarios para asegurar que, si PANGEA es seleccionado, seremos capaces de colaborar y coordinarnos eficazmente en los esfuerzos en curso y futuros (ver Apéndice D).

El concepto PANGEA refleja las voces de muchos y se desarrolló en colaboración con más de 800 personas que representaban a más de 300 organizaciones de 42 países de los 5 continentes. Se celebraron talleres en Washington DC, Camerún, Perú, Brasil y Tailandia, con aproximadamente 275 participantes presenciales y 298 virtuales. Los participantes en el proceso de definición del alcance representaban a muchas comunidades, incluida la comunidad académica en los trópicos, así como en EE.UU. y Europa; comunidades indígenas y locales de los trópicos; la comunidad de la NASA y otras agencias federales de EE.UU.; agencias espaciales internacionales; agencias gubernamentales extranjeras; organizaciones de la sociedad civil; y la industria privada (véase el Apéndice C). El estudio de alcance puso de manifiesto la enorme necesidad de PANGEA y la oportunidad que representa para colaborar y coordinarse con muchas de las actividades existentes y futuras descritas en este libro blanco.

Agradecimientos

PANGEA ha sido en gran medida un esfuerzo de la comunidad internacional. No habría sido posible sin la contribución de un número incalculable de personas. Estamos profundamente agradecidos a todos los que han contribuido con sus ideas, tiempo, energía, recursos y financiación para llevar a cabo esta campaña de campo tan urgentemente necesaria. Específicamente, reconocemos el apoyo financiero adicional y los recursos más allá de la NASA que han hecho posible este esfuerzo internacional. Esto incluye el USFS-International Programs, la Universidad de California-Los Ángeles (UCLA), el Governors' Climate and Forests Task Force (GCF-TF), la Wildlife Conservation Society (WCS), el Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA), Alliance Bioversity International y CIAT, el Centro de Investigación Forestal Internacional y Agroforestal Mundial (CIFOR-ICRAF), la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), la Universidad de Yaundé I, la Penn State University, el Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), la Congo Basin Forest Partnership (CBFP), el Congo Basin Institute (CBI), la Congo Basin Science Initiative (CBSI), y el NASA SERVIR Southeast Asia Hub. Marcos Longo y Robinson Negrón-Juárez recibieron apoyo en el marco del Next Generation Ecosystem Experiments-Tropics, financiado por el Departamento de Energía de EE.UU., Oficina de Ciencia, Oficina de Investigación Biológica y Medioambiental. El LBNL está gestionado y operado por los Regentes de la Universidad de California bajo el contrato principal número DEAC02-05CH11231.

Muchos empleados dedicados y trabajadores hicieron posibles los talleres y eventos de PANGEA, aportando actitudes positivas y de resolución de problemas que guiaron a PANGEA. Entre ellos se incluyen Isaac Aguilar, Lucia Bolzoni, John Mosinge, Emily Johnson, Michelle Brown, Robert (Bob) Lavoie, Alfonso Villasenor, Cris Silva, Daniel Blackwell, Arlyne Gonzalez, Pilar Anaya Salazar, Karina Castaneda Checa, Martha Gutierrez Fontes, y muchos, muchos más.

PANGEA también está en deuda con los numerosos investigadores y profesionales que aportaron sus ideas y sugerencias al maratón que está preparando una campaña de campo de ecología terrestre de la NASA. En particular, nos gustaría dar las gracias a Yaxing Wei, Bruce Wilson y Michele Thornton (ORNL), Dario Papale (Integrated Carbon Observation System [ICOS]), Gilberto Pastorello (AmeriFlux), Luiz Aragão y Bruce Forsberg (LBA), Simon Lewis (Leeds, UCL), Nicolas Barbier (Instituto de Investigación para el Desarrollo, Francia [IRD]), Pascal Boeckx, Marijn Bauters, Wannes Hubau (Gante), Denis Sonwa (CIFOR-ICRAF → Instituto de Recursos Mundiales [WRI]), y Stuart Davies (Smithsonian). Los autores principales están sumamente agradecidos a la Dra. Jill Thompson (UKCEH) por sus minuciosos, extensos y perspicaces comentarios. Nuestro documento es mucho mejor gracias a sus esfuerzos. Además, nos gustaría agradecer a todos los miembros de los seis grupos de trabajo que se enumeran a continuación sus contribuciones a los debates, ideas e iteraciones de muchos elementos de este libro blanco.

Grupo de trabajo sobre ciclos biogeoquímicos y dinámica del carbono: Abhishek Chatterjee (JPL), Alfred Ngomanda (Centro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Gabón), Alysson Bery (Instituto de

la Cuenca del Congo), Anne Ola (INRS), Ashley Ballantyne (Universidad de Montana), Asmadi Saad (Universidad de Jambi), Bassil El Masri (Universidad Estatal de Murray), Beisit Luz Puma Vilca (Sylvera), Ben Taylor (Harvard), Bila-Isia Inogwabini (WWF), Carla Restrepo (Universidad de Puerto Rico), Chima Iheaturu (Universidad de Berna), Corneille Ewango (Okapi Faunal Reserve), Danielle Potocek (Spark Climate Solutions), David Lagomasino (East Carolina University), Dheeresh Kumar (Univ. de Delhi), Doug Morton (NASA Goddard), Ekene Rangel, Elhadi Adam (Universidad de Witwatersrand), Eric Cosio (PUCP), Farrel Boucka (AGEOS), Fernanda Santos (ORNL), Fiona Soper (McGill), Flavia Durgante (Instituto de Tecnología de Karlsruhe), Francis Manfoumbi (AGEOS), Gerbrand Koren (Universidad de Utrecht), Gillian Galford (Universidad de Vermont), Gislain MOFACK II (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]), Gretchen Keppel-Aleks (Universidad de Michigan), Hankui Zhang (SDSU), Hans Verbeeck (Universidad de Gante), Jim Dalling (UIUC), Jingfeng Xiao (UNH), Joe Mohan (UCI), Joshua Fisher (Universidad Chapman), Kate Nelson (Universidad McGill), Krista Anderson-Teixeira (Smithsonian), Laura Duncanson (Universidad de Maryland), Luis Fernández NGOULA (Universidad de Yaundé), Marcia Macedo (WHRC), Marijn Bauters (Universidad de Gante), Moses Cho (Universidad de Pretoria), Na Chen (MIT), Nate McDowell (PNNL), Patrick Namulisa (Columbia), Nick Parazoo (JPL), NIMPA NGUEMO Christiane Guillaine (Universidad de Bamenda), Nohemi Huanca-Nunez (Yale), Norma Salinas (PUCP), Pascal Boeckx (Universidad de Gante), Paul Arellano (NAU), Paulo Brando (Yale), Petya Campbell (Universidad de Maryland Baltimore County), Robinson Negron-Juarez (LBNL), Rogelio Corona (UNAM), Rolf Obame (USTM), Ruofei Jia (MIT), Sarah Batterman (Cary Institute), Sparkle Malone (Yale), Steve Kwatcho Kengdo (UC Berkeley), Tana Wood (USDA Forest Service), Timothy Filley (University of Oklahoma), Tomasso Jucker (Universidad de Bristol), Trevor Cambron (MIT), Vincent Medjibe (Servicio Forestal del USDA), Wu Sun (Carnegie Science), Yann Nouvellon (CIRAD), Yoseline Angel (NASA Goddard), Zeli Tan (PNNL)

Grupo de trabajo sobre estructura, función y diversidad: Jesus Aguirre-Gutierrez (Oxford Univ.), Loren Albert (Oregon State University), Luciana Alves (UCLA), Junior Amboko (Florida Atlantic Univ.), Nicolas Barbier (IRD), Stephanie Bohlman (University of Florida), Jeanine Cavender-Bares (Harvard), Caroline Chaves Arantes (West Virginia Univ.), Moses Cho (Univ. of Pretoria), Rogelio O. Corona-Núñez (UNAM), Claudia Coronel Enríquez (Instituto Mora), KC Cushman (ORNL), Stuart Davies (Smithsonian), Laura Duncanson (UMD), Alvaro Duque (Univ. Nacional de Colombia Sede Medellín), Sandra M Duran (Colorado State Univ.), Bassil El Masri (Murray State Univ.), Joshua Fisher (Chapman), Evan Fricke (MIT), Evan Hockridge (Harvard), Miroslav Honzak (ASU), Tommaso Jucker (University of Bristol), Matthias Kunz (GFZ Potsdam), Moses Libalah (Univ. de Yaundé I), David Luther (Univ. George Mason), Tim Mayer (Univ. of Alabama Huntsville), Paul Moorcroft (Harvard), Doug Morton (GSFC), Luis Fernández Ngoula (Univ. de Yaundé I), Christopher Nytch (Univ. de Puerto Rico), Jack Orebaugh (ORNL), Dina Rasquinha (WWF), Nicholas Russo (Harvard), Norma Salinas (PUCP), Arturo Sánchez-Azofeifa (Univ. Alberta), Wu Sun (Carnegie Institution for Science), Jennifer J Swenson (William & Mary), Nathan Swenson (Univ. of Notre Dame), Simon Tamungang (Univ. de Bamenda), Jill Thompson (UKCEH), Marcellle Johnson (Wageningen), German Vargas (Univ. Estatal de Oregon), Rodrigo Vargas (University of Delaware/Arizona State University), Jiaming Wen (Carnegie Institution for Science), Michael Wimberly (Univ. de Oklahoma), Lin Xiong (Univ. de Maryland), Xi Yang (Univ. de Virginia)

Grupo de trabajo sobre interacciones y retroalimentaciones climáticas: Nate McDowell (PNNL), Chi Chen (Univ. Rutgers), Manuel Lerdau (Univ. de Virginia), Rogelio O. Corona-Núñez (Facultad de Ciencias, UNAM), Joshua Fisher (Chapman), Daniela Francis Cusack (CSU), Eric Davidson (Univ. de Maryland), Luiz A. T. Machado (IFUSP), Maricar Aguilos (NCSU), Sam Rabin (NCAR), Rob Spencer (FSU), Zhuonan Wang (CSU), Isela Jasso (UNAM), William F. Laurance (James Cook Univ.), Leila Constanza Hernandez Rodriguez (LBNL), Susan Laurance (James Cook Univ.), Jingfeng Wang (Georgia Inst. Of Tech.), Gabrielle De Lannoy (KU Leuven), Gerbrand Koren (Univ. de Utrecht), Jie Hsu (Univ. Nacional de Taiwán), Tomas Ferreira Domingues (Univ. de São Paulo), Carl Norlen (USGS), Jiafu Mao (ORNL), Mingjie Shi (PNNL), Yanlei Feng (MIT), Jonathan

Wang (Univ. de Utah), Amy Zanne (LBNL), Amy Zanne (Univ. de Miami), Emmanuel Barde Elisha (Fundación ANI), Evan Gora (Instituto Cary), Xiangzhong Luo (Univ. Nacional de Singapur), Marie Brigitte Makuate (MSRI, Camerún), Landing Mané (OSFAC), Denis Sonwa (WRI), Louis Defo (Univ. de Yaoundé I), L. Mingjie Shi (ORNL), Yanlei Feng (MIT), Jonathan Wang (Univ. de Utah), Amy Zanne (Univ. de Miami). of Yaounde I), L. Ruby Leung (PNNL), Yoshiaki Hata (Univ. of Tokyo), Cynthia Wright (USFS), Eric Bastos Gorgens (Univ. Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri), Manh-Hung Le (GSFC), Debora Regina Roberti (Univ. Federal de Santa Maria), Kevin Njabo (Texas A&M), Victor Aimé Kemeuze (Universidad de Ngaoundere), John Adams Katikomo (EDA), Nyong Princely Awazi (Univ. de Bamenda, Camerún), Martin Arthur Meka Zibi II (Univ. de Dschang), Peke Koukou Léon c'est la vie (ONG), Donald-l'or Nyame Mbia (Univ. de Yaoundé I), Nkemnkeng Francoline Jong (Univ. de Bamenda, Camerún), Vanessa Mavila (Fondation Eboko), Olivier Bosela (IFA Yangambi), Akwayopanga Denis (Pakwach District Local Government), Bakeleki Bohin Jean Marie (IRIC), Carmen Lonchti Fobasso (APDD), Apene Derek Aziwoh (African Environmental Network), Cyrille Bienvenu Bediang (IRIC), Susanna B Hecht (UCLA), Jancy Kelly Boungou Matoumouna (Wildlife Conservation Society), Jonathan Tahiri Heri (University of Kindu, DRC), Bertrant James Taya Saah (Univ. de Yaoundé I), Nzanzu Mulimirwa Philémon (Parlamento Juvenil Congoleño), Regis Koumba Mouissou (Univ. de Arkansas), Amour Macelvi Matoumouene Goma (LBGE), Paul Martial Tene Tayo (Univ. de Yaundé I), Nanda Silatsa Serge (STA), Alain Okito (PNUMA), Stella Songwe Tikeng (Univ. de Yaundé I), Ncangu Bahindwa Benjamin (Univ. Officielle de Bukavu), Sandjo Phallin Romeal (Instituto Superior de Ciencias Medioambientales), Timothy Bonebrake (Univ. de Hong Kong), James Okwinba Mouissou (Univ. de Arkansas). of Hong Kong), James Okwiri (Agribusiness Innovation), Matthieu Aksanti Cizungu (UEFA/RDC), Thierry Michel Tene (Akdeniz University), Igor Akendengué Aken (Omar Bongo Univ.), Clovis Nzuta Kengne (Univ. de Dschang), Essama Essama Mathurin (CERAD), Dolorès Mache (Planet One-Mboa Hub), Emmanuel Kohbe Wanso (BEDD), Vadel Eneckdem Tsopgni (Univ. de Yaoundé I), Usongo Patience Abaufei (Univ. de Buea, Camerún). de Buea, Camerún), Djorwe Enock (Univ. de Yaoundé I), Ravinder Sehgal (SFSU), Donato Ndong Ndong Nzang (UNGE), Nguimalet Cyriaque Rufin (Univ. de Bangui), Hubert Yamvu (Programme National de Santé au Travail), Fouppouapegnigni Moihamette (Univ. de Yaoundé I), Amadou (Univ. de Yaoundé I), Vadel Eneckdem Tsopgni (Univ. de Yaoundé I), Usongo Patience Abaufei (Univ. de Buea, Camerún). de Yaoundé I), Amadou Bossiomo Mfela (Soldats pour la Nature), Hugues Irene Nganiza (Univ. Panafricana), Zacharie Mounkene Bounyahre (Univ. de Ngaoundere), Junior Baudoin Wouokoue Taffo (Univ. de Maroua), Djosebe Azaria (IRAD), Fritz Betchem (IRIC), Alysson Bery (IBAY-SUP), Robert Vancelas Obiang Zogo (Univ. Omar Bongo), Daniel Brice Knko Nkontcheu (Univ. de Buea), Eric Fokam (Univ. de Buea), Marcel Caritá Vaz (Univ. de Wilkes), Armand Okende (ULB), Greg Jongsma (Museo de New Brunswick), Joost van Haren (Univ. de Arizona), Rui Cheng (Univ. de Minnesota), Peter Ssimbwa (Muteesa 1 Royal University)

Grupo de trabajo sobre sistemas socioecológicos: Shivani Agarwal (Columbia), Caroline Arantes (West Virginia Univ), Adia Bey (GSFC), Ana Buchadas (Humboldt), Glenn Bush (Woodwell), Sophia Carodenuto (Univ. of Victoria), Min Chen (Univ. of Wisc - Madison), Oliver Coomes (McGill), Rogelio Corona (UNAM), Deborah Delgado Pugley (PUCP), Fanny Djomkam (IITA), Alejandra Echeverri (UC-Berkeley), Marius Ekue (Alliance Bioversity & CIAT), Jessica Fayme (Univ. of Michigan), Gillian Galford (Univ. of Vermont), Angélica María Gómez (UNC - Chapel Hill), Burak Güneralp (Texas A&M), Chima Iheaturu (Univ. de Berna), Marciel Judith Móstinga Rodriguez (UNALM-Perú), Matthais Kunz (GFZ-Potsdam), Mody Lacour (UC-Irvine), Victor Maque (OU), Mia Mitchell (LANL), Paulo Murillo (Univ. del Tolima), Florence Palla (OFAC), Johanne Pelletier (CGIAR), Marie Pratzer (Humboldt), Catherine Potvin (McGill), Dina Rasquinha (Univ. de Georgia), Casey Ryan (Univ. de Edimburgo), Asmadi Saad (Univ. de Jambi), Evandro Marcos Saidel Ribeiro (USP), Michaela Shope (MSU), Denis Sonwa (WRI), Jocelyne Sze (UAB).

Grupo de trabajo sobre modelización y síntesis de datos: Shivani Agarwal (Universidad de Columbia), Rachel Albrecht (Universidad de São Paulo, USP), Luciana Alves (UCLA), Andrés Baresch (Universidad de Maryland), Ana Bastos (Universidad de Leipzig), Carly Batist (Raiforest Connection), Anthony Bloom (JPL),

Damien Bonal (INRAE, Université de Lorraine, AgroParisTech, UMR Silva), Santiago Botia (Instituto Max Planck de Biogeoquímica), Na Chen (MIT), Bradley Christoffersen (The University of Texas Rio Grande Valley), Michael Coe (Woodwell Climate Research Center, WCRC), Matteo Dettò (Princeton University), Hannes De Deurwaeder (Princeton University), Michael Dietze (Boston University), Francina Dominguez (University of Illinois Urbana-Champaign, UIUC), Christopher Doughty (Northern Arizona University), Kim Ely (LBNL), Jianing Fang (Columbia University), Rosie Fisher (Centre for International Climate and Environmental Research Oslo, CICERO), Saulo Freitas (Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil [INPE]), Pierre Gentile (Columbia University), Viola Heinrich (Helmholtz Centre Potsdam), Marina Hirota (Universidad Federal de Santa Catarina), Forrest Hoffman (ORNL), Jennifer Holm (LBNL), Ruofei Jia (MIT), Trevor Keenan (University of California, Berkeley), Nancy Kiang (NASA GISS), Charles Koven (LBNL), Jennifer Kowalczyk (LBNL), Jeremy Lichstein (University of Florida), Yanlan Liu (Ohio State University), Nima Madani (JPL), Landing Mané (Central Africa Forest Satellite Observatory), Isabelle Maréchaux (INRAE, AMAP), Bassil El Masri (Murray State University), Guilherme Gerhardt Mazzochini (Universidad Federal de Río de Janeiro, UFRJ), David Medvigy (Universidad de Notre Dame), Leila Mirzagholi (MIT), Gislain II Mofack (Universidad de Yaundé I), Paul Moorcroft (Universidad de Harvard), Neil-Yohan Musadji (Universidad Masuku de Ciencia y Tecnología), Jessica Needham (LBNL), Christiane Guillaine Nimpa Nguemo (Universidad de Bamenda), Rogelio Omar Corona Núñez (Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM), Rolf Mabicka Obame (Universidad Masuku de Ciencia y Tecnología), Grace Jopaul Loubota Panzou (Universidad Denis Sassou Nguesso), Gilberto Pastorello (LBNL), Mateus Dantas de Paula (Senckenberg - Leibniz Institution for Biodiversity and Earth System Research), Arthur Prudêncio de Araujo Pereira (Universidad Federal de Ceará), Thomas Pugh (Universidad de Lund), Celso von Randow (INPE), Natalia Restrepo-Coupe (Universidad de Arizona, Cupoazu LLC), Evandro Marcos Saidel Ribeiro (USP), Bianca Fazio Rius (Universidad de Campinas, Centro de Investigación en Biodiversidad y Medio Ambiente), Leila Hernandez Rodriguez (LBNL), Iris Roitman (Universidad de Brasília), Sergio Rojas (Instituto Humboldt), Thais Rosan (Universidad de Exeter), Lina María Sánchez-Clavijo (Instituto Humboldt), André Santos (LBNL), Rosa Maria Nascimento dos Santos (Universidad del Estado de Amazonas; in memoriam), Shawn Serbin (NASA/GSFC), Alexander Shenkin (Northern Arizona University), Alexey Shiklomanov (NASA/GSFC), Jacquelyn Shuman (NASA Ames Research Center), Anna Spiers (LBNL), Ying Sun (Cornell University), Abigail Swann (University of Washington), Anna Trugman (University of California, Santa Barbara), María Uriarte (Columbia University), María del Rosario Uribe-Diosa (Climate Focus), Rodrigo Vargas (University of Delaware/Arizona State University), Hans Verbeeck (Universidad de Gante), Marco Visser (Universidad de Leiden), Weile Wang (Centro de Investigación Ames de la NASA), Rachel Ward (Universidad de California, Berkeley), Mathew Williams (Universidad de Edimburgo), Chonggang Xu (Laboratorio Nacional de Los Álamos, LANL), Xiangtao Xu (Universidad de Cornell), Julia Yang (Universidad de California, Berkeley), Jevan Yu (MIT), Maurício Rumenos Guidetti Zagatto (USP), Wenli Zhao (Universidad de Columbia).

Grupo de trabajo sobre participación comunitaria y aplicaciones de la investigación: Yoseline Angel (GSFC), Shivani Argawal (Universidad de Columbia), Kemen Austin (WCS), Carly Batist (Raiforest Connection), Ruksan Bose (IITA), Glenn Bush (Woodwell), Rogelio O. Corona-Núñez (Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM), Fanny Djomkam (IITA), Marius Ekué (Bioversity), Matt Hansen (UMD), Simon Hoyte (UCL), Nohemi Huanca-Nunez (Yale), Chima Iheaturu (Univ. de Berna), Yovita Ivana (WCS), Carly Batist (Raiforest Connection), Ruksan Bose (IITA), Glenn Bush (Woodwell), de Berna, Yovita Ivanova (Alianza Bioversity & CIAT), Gerbrand Koren (Universidad de Utrecht), Matthias Kunz (Centro Helmholtz de Potsdam), Patrick Meyfroidt (Universidad Católica de Lovaina), Catherine Nakalembe (UMD), Tatiana Nana (UMD), Christiane Guillaine Nimpa Nguemo (Universidad de Bamenda), Kevin Njabo (Texas A& MM), Carl Norlen (USGS), Florence Palla (OFAC), Catherine Potvin (McGill), Danielle Rappaport (UMD), Nick Russo (Harvard), Denis Sonwa (WRI), Hannah Stouter (UCLA), Lucie Félicité Temgoua (University of Dschang), Stella Songwe Tikeng (Univ. de Yaundé I), Beisit Luz Puma Vilca (Sylvera)

Índice

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introducción y motivación | 1 |
| 1.1 | Visión general de los temas, preguntas y objetivos científicos | 11 |
| 1.2 | La urgente necesidad de PANGEA | 14 |
| 1.3 | Papel de las observaciones por teledetección | 14 |
| 1.4 | Necesidad de coordinar la recogida de datos y el trabajo en equipo..... | 16 |
| 1.5 | Campaña de campo y dominio de estudio de ecología terrestre PANGEA | 18 |
| 1.6 | Earth Science to Action..... | 22 |
| 2 | PANGEA Temas científicos..... | 23 |
| 2.1 | Ciclos biogeoquímicos | 23 |
| 2.2 | Biodiversidad..... | 27 |
| 2.3 | Interacciones y retroalimentaciones climáticas | 32 |
| 2.4 | Sistemas socioecológicos..... | 35 |
| 2.5 | Dinámica de las perturbaciones..... | 38 |
| 3 | Lagunas e interrogantes | 41 |
| 3.1 | Patrón | 43 |
| 3.1.1 | Patrón: Existencias y flujos de carbono | 43 |
| 3.1.2 | Patrón: Biodiversidad y composición funcional | 44 |
| 3.1.3 | Patrón: Interacciones tierra-atmósfera y umbrales..... | 46 |
| 3.2 | Proceso..... | 47 |
| 3.2.1 | Proceso: Interacciones entre especies y resiliencia | 47 |
| 3.2.2 | Proceso: Retroalimentación perturbación-función del ecosistema..... | 49 |
| 3.2.3 | Proceso: Dinámica y gestión de la recuperación | 50 |
| 3.2.4 | Proceso: Retroalimentación del ciclo hidrológico | 52 |
| 3.3 | Proyecciones..... | 53 |
| 3.3.1 | Proyecciones: Ciclos del carbono, el agua, la energía y los nutrientes..... | 53 |
| 3.3.2 | Proyecciones: Resiliencia forestal heterogénea | 54 |
| 4 | Avances científicos y técnicos de PANGEA..... | 55 |
| 5 | Papel fundamental de la teledetección de la NASA | 58 |
| 6 | Estrategia de investigación y diseño del estudio | 59 |
| 6.1 | Enfoque general del estudio | 59 |
| 6.1.1 | Estrategia de ampliación científica de PANGEA | 60 |
| 6.1.2 | Calendario teórico del proyecto | 62 |
| 6.2 | Componentes científicos esenciales | 63 |
| 6.2.1 | Línea de base, umbral y estrategia de descope..... | 64 |

| | | |
|--------|---|------------|
| 6.2.2 | Paisajes candidatos | 69 |
| 6.2.3 | Observaciones de teledetección por satélite | 70 |
| 6.2.4 | Observaciones por teledetección aérea | 72 |
| 6.2.5 | Observaciones y estudios de campo..... | 74 |
| 6.3 | Modelización, síntesis de datos y análisis integradores..... | 78 |
| 6.3.1 | Modelización e integración de datos | 78 |
| 6.3.2 | Coordinación con otras comunidades de modelización e integración de datos | 83 |
| 6.3.3 | Actividades de modelización e integración de datos..... | 84 |
| 7 | Capacitación, formación y educación | 85 |
| 7.1 | Desarrollo de la mano de obra..... | 86 |
| 7.2 | Educar a una cohorte de estudiantes de posgrado | 86 |
| 8 | Estrategia de participación comunitaria | 88 |
| 8.1 | Co-desarrollo y socios de PANGEA | 90 |
| 8.2 | Estrategia de compromiso | 91 |
| 9 | Poner en práctica las ciencias de la Tierra..... | 92 |
| 9.1 | Aplicaciones de los resultados de la investigación PANGEA | 93 |
| 9.1.1 | Estabilidad del secuestro de carbono y flujos de metano..... | 93 |
| 9.1.2 | Conservación de la biodiversidad | 95 |
| 9.1.3 | Agricultura y medios de subsistencia sostenibles..... | 97 |
| 9.2 | Proceso para poner las Ciencias de la Tierra en acción..... | 98 |
| 9.2.1 | Compromiso de los usuarios..... | 98 |
| 9.2.2 | Apoyo a la aplicación de la investigación PANGEA..... | 100 |
| 10 | Viabilidad técnica y logística | 103 |
| 10.1 | Organización y gestión..... | 104 |
| 10.1.1 | Gestión de programas | 104 |
| 10.1.2 | Oficina de proyectos..... | 104 |
| 10.1.3 | Definición de ciencia..... | 105 |
| 10.1.4 | Ejecución del proyecto | 105 |
| 10.1.5 | Equipo científico y liderazgo científico..... | 106 |
| 10.1.6 | Competencias disciplinarias requeridas | 108 |
| 10.2 | Oportunidades de cofinanciación..... | 108 |
| 10.3 | Ciencia abierta - Gestión y puesta en común de datos | 109 |
| 10.4 | Horario 113 | |
| 10.5 | Evaluación de riesgos..... | 114 |
| 11 | Créditos..... | 116 |

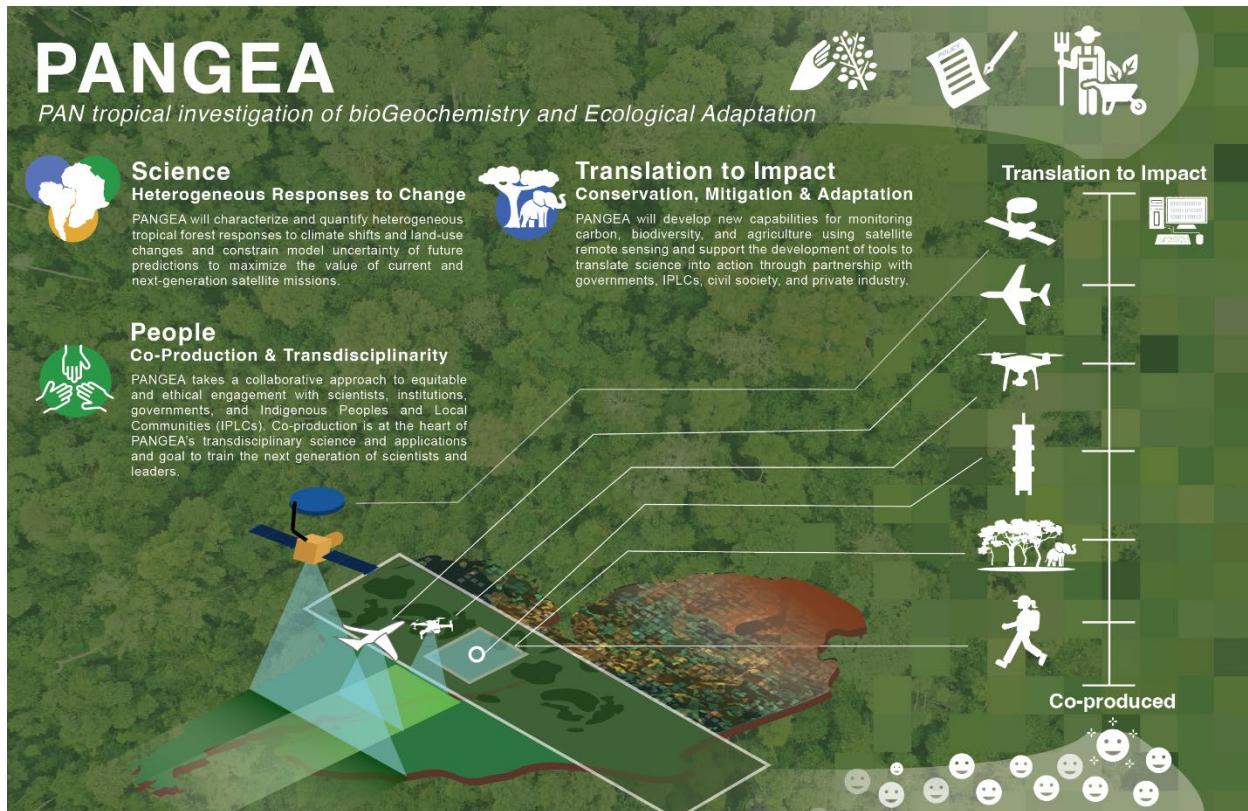
| | |
|---|-----|
| 12 Glosario..... | 117 |
| 13 Acrónimos y abreviaturas | 120 |
| 14 Apéndices..... | 130 |
| A. Cartas de apoyo | 130 |
| B. Socios de PANGEA y actividades de participación..... | 130 |
| C. Participación durante el estudio exploratorio | 130 |
| D. Actividades de investigación y seguimiento previstas y en curso..... | 130 |
| E. Tabla detallada de medidas PANGEA..... | 130 |
| F. Respuestas a los comentarios..... | 130 |
| G. Temas fuera del ámbito de PANGEA..... | 130 |

1 Introducción y motivación

PANGEA es un proyecto de colaboración y transformación mundial que determinará si los bosques tropicales de los distintos continentes responden de forma diferente al cambio climático y de uso del suelo.

PANGEA se necesita urgentemente para

1. Maximizar el valor de las misiones por satélite actuales y de próxima generación colmando las lagunas de datos e integrando conocimientos ecológicos mecanicistas.
2. Colmar lagunas críticas de conocimiento para apoyar los objetivos climáticos globales y de biodiversidad basados en la comprensión de los procesos que controlan la heterogeneidad en la vulnerabilidad de los bosques tropicales.
3. Desarrollar nuevas capacidades para observar, predecir y controlar las respuestas de los bosques tropicales, fomentando al mismo tiempo la formación de la próxima generación de científicos y líderes mundiales.



Los bosques tropicales tienen impactos de gran alcance, ya que abarcan cantidades significativas de carbono, nutrientes y agua a nivel mundial, flujos de carbono y energía, y la mayor proporción de la biodiversidad de la Tierra. Más del 75% de las plantas con flores, los anfibios, los mamíferos terrestres, los peces marinos y de agua dulce y el 91% de las aves terrestres de la Tierra tienen áreas de distribución que se cruzan con latitudes tropicales (Barlow et al., 2018). Los bosques tropicales almacenan grandes cantidades de carbono en suelos y biomasa, y los bosques tropicales húmedos representan alrededor del 40% de la biomasa vegetal mundial (Xu et al., 2021a). Como el mayor sumidero de carbono entre todos los bosques del mundo (Pan et al., 2024), desempeñan un papel fundamental en la mitigación del aumento del dióxido de carbono atmosférico (CO_2), actuando como amortiguadores esenciales contra el cambio

climático. Los bosques tropicales también mitigan el aumento de las temperaturas globales mediante el enfriamiento por evaporación (Bonan, 2008; Artaxo et al., 2022). Además, los bosques tropicales interactúan con la atmósfera a través de complejas retroalimentaciones que regulan el tiempo local y el clima regional y global. En última instancia, los bosques tropicales influyen en todo el sistema terrestre. Por ejemplo, la deforestación amazónica amenaza los regímenes de precipitaciones en Estados Unidos, reduciendo potencialmente las precipitaciones en el Medio Oeste y el Noroeste (Lawrence y Vandecar, 2015) y provocando una disminución del 50% en el manto de nieve de Sierra Nevada en California, que sustenta las necesidades de agua de la agricultura y las ciudades (Medvigy et al., 2013). Estos cambios podrían alterar la disponibilidad de agua, reducir el rendimiento de los cultivos y desestabilizar los ecosistemas, poniendo en peligro la seguridad alimentaria y la estabilidad de la sociedad. Además, muchos productos básicos de importancia mundial, como el café, el aceite de palma, el cacao y la madera, proceden de los trópicos y sustentan los mercados y las cadenas de suministro mundiales, al tiempo que contribuyen a satisfacer las necesidades básicas de los hogares estadounidenses.

Los bosques tropicales están experimentando rápidos cambios. Las regiones forestales ecuatoriales pronto experimentarán las temperaturas más altas conocidas desde el Eoceno, lo que, combinado con el cambio en el uso de la tierra, provocará un aumento de la sequedad atmosférica y del estrés hídrico (Barkhordarian et al., 2019; Ukkola et al., 2020). Las tasas de mortalidad de los árboles están aumentando en todos los trópicos debido al aumento de la duración y la gravedad de la sequía y de la intensidad de las tormentas (Allen et al., 2010; Choat et al., 2012; McDowell et al., 2018; Urquiza-Munoz et al 2024). El aumento de las temperaturas se está acercando a los límites térmicos hipotéticos para la función de las hojas, aunque estos límites siguen siendo muy debatidos (Smith et al., 2020; Doughty et al., 2023; Winter y Roelfsema, 2024). En las últimas décadas, la rápida evolución de los sistemas socioecológicos ha provocado tasas sin precedentes de cambio antropogénico del uso de la tierra (DeFries et al., 2004; Hosonuma et al., 2012; Hansen et al., 2020; Pendrill et al., 2022), que han alimentado directamente los cambios climáticos en los trópicos (Smith et al., 2023). Como resultado, el sudeste amazónico se está convirtiendo en una fuente neta de carbono a la atmósfera (Gatti et al., 2021).

La deforestación y la degradación de los bosques tropicales representaron el 22% de las emisiones antropogénicas anuales de CO₂ entre 1990 y 2020 (Pan et al., 2024), aunque estas emisiones se compensan parcialmente con el rebrote de los bosques tropicales secundarios (Aragão et al., 2014; Rosan et al., 2024). Las condiciones prolongadas de calor y sequía aumentan la vulnerabilidad de los bosques a los incendios y, a su vez, los bosques ya quemados se vuelven más calientes y secos, lo que provoca una retroalimentación positiva que se ha denominado "tormenta de incendios" (Brando et al., 2020a). La deforestación, la degradación de los bosques, la explotación directa (por ejemplo, caza, recolección) y el cambio climático han alterado drásticamente la dinámica de perturbación de los bosques tropicales y ahora amenazan con la extinción a muchas especies tropicales (Feeley et al., 2012; Barlow et al., 2016; Benítez-López et al., 2017; Alroy 2017; Dirzo et al., 2014). A su vez, esta pérdida de biodiversidad podría comprometer la resiliencia de la estructura y función de los bosques tropicales, los ciclos biogeoquímicos y los sistemas socioecológicos (Bunker et al., 2005; Peres et al., 2016). Incluso teniendo en cuenta la mayor diversidad de especies, las regiones tropicales están experimentando la mayor tasa de deforestación del mundo (Dirzo et al., 2014).

Los estudios realizados en los últimos 10 años han revelado que las tendencias y la variabilidad interanual del intercambio neto de carbono del bioma de los bosques tropicales varían notablemente de un continente a otro (Brienen et al., 2015; Liu et al., 2017; Hubau et al., 2020). Entre 1985 y 2015, el sumidero de carbono de los bosques tropicales intactos de las tierras bajas africanas medido en parcelas de inventario forestal fue efectivamente constante, mientras que el sumidero de carbono de los bosques tropicales amazónicos de las tierras bajas disminuyó en un tercio entre 2005 y 2015 en comparación con la década de 1990 (Hubau et al., 2020; Brienen et al., 2015). En condiciones de El Niño durante 2015-2016,

América tropical, África y Asia se convirtieron temporalmente en fuentes netas de emisiones de CO₂ a la atmósfera (Liu et al., 2017). Sin embargo, estas pérdidas netas de carbono parecen estar sustentadas por mecanismos distintos que indican diferencias en la estabilidad del sumidero de carbono en los distintos continentes, cuya mitigación requerirá una comprensión y una gestión específicas para cada región. Las fuentes de las concentraciones atmosféricas de CO₂, observadas por el Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2), el Greenhouse Gases Observing SATellite (GOSAT) y el Measurements Of Pollution In The Troposphere (MOPPIT), sugieren que en las Américas tropicales, las menores tasas fotosintéticas provocaron una menor absorción de carbono que cambió el balance de CO₂ a emisiones netas (**Figura 1**). En África, el aumento de las temperaturas condujo a un aumento de la respiración, que superó los beneficios de secuestro de los bosques tropicales de África Central (Liu et al., 2017). En Asia, una superficie terrestre más cálida y seca provocó más emisiones de CO₂ procedentes de los incendios (Liu et al., 2017).

Muchos bosques tropicales tienen llanuras aluviales y están intercalados con humedales y ecosistemas acuáticos, que desempeñan un papel fundamental en los presupuestos mundiales de metano (CH₄), así como en el ciclo del CO₂ (Sjögersten et al., 2014; Peng et al., 2022). Los humedales tropicales y los sistemas continentales de agua dulce contribuyen a la gran mayoría de las emisiones globales naturales de CH₄ y representan aproximadamente el 20% del presupuesto global total de CH₄ de ~575 Tg CH₄ al año⁻¹ (Saunois et al., 2020; Peng et al., 2022). Las fuentes tropicales de CH₄ son también el componente más incierto del presupuesto mundial de carbono (Saunois et al., 2020, 2024). La expansión de la deforestación y la degradación forestal, combinadas con los cambios climáticos, repercuten significativamente en los flujos de aguas superficiales, la descarga de los ríos y la calidad del agua. Estos, a su vez, afectan a los ciclos biogeoquímicos; a la idoneidad del hábitat para las comunidades de plantas, animales, algas y microorganismos de agua dulce; a los recursos hídricos para los seres humanos; y a la producción de energía hidroeléctrica (Castello y Macedo, 2016; Guimbarteau et al., 2017; Taniwaki et al., 2017; Arias et al., 2020).

Los datos de las misiones por satélite y de las campañas aerotransportadas de la NASA, validados por mediciones terrestres, desempeñan un papel fundamental en el avance de la comprensión de cómo están respondiendo los ecosistemas forestales y la biodiversidad a los cambios medioambientales (Cavender-Bares et al., 2022). **Sin embargo, antes de que los datos satelitales puedan ser útiles para el análisis científico o el uso operativo, las mediciones terrestres son fundamentales para calibrar y validar las**

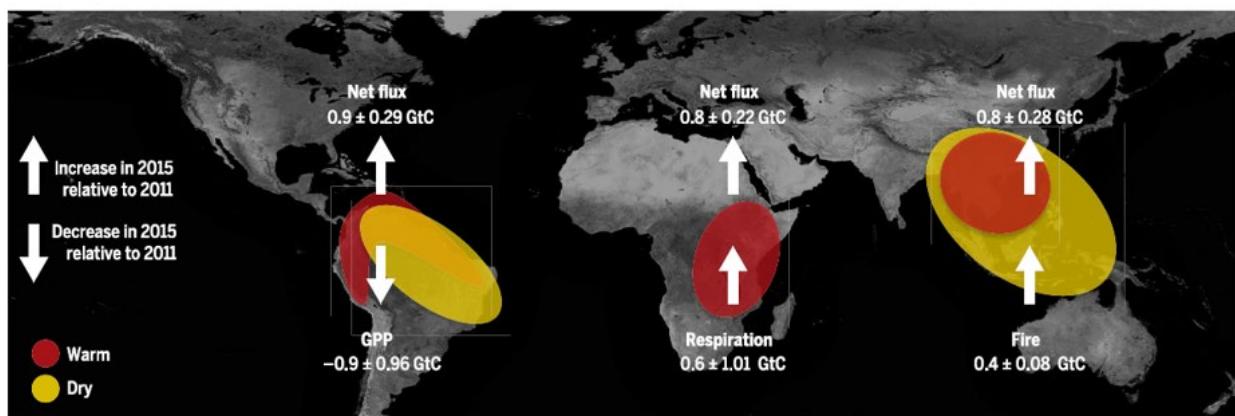


Figura 1. Los análisis de los datos de los satélites OCO-2, GOSAT y MOPPIT sobre los continentes tropicales revelaron que cada uno de ellos se convirtió en una fuente neta de emisiones de carbono a la atmósfera en respuesta a El Niño de 2015. Lo más importante es que cada continente mostró trayectorias regionales distintas que requieren una mejor comprensión. Adaptado de (Liu et al., 2017).

observaciones satelitales. La escasez de mediciones terrestres y recuperaciones aerotransportadas en las regiones tropicales ha planteado importantes retos a la hora de mejorar los productos satelitales e interpretar las conclusiones científicas extraídas de estos productos. Por ejemplo, los ciclos del carbono y del agua en los trópicos dependen en gran medida de la dinámica de la humedad del suelo; sin embargo, observaciones terrestres recientes han revelado que las mediciones pasivas activas de la humedad del suelo (Soil Moisture Active Passive, SMAP) obtenidas por satélite presentan fuertes sesgos en los ecosistemas tropicales (Cho et al., 2024). Es importante destacar que estos mismos datos terrestres han proporcionado una oportunidad para mejorar las recuperaciones de humedad del suelo de SMAP en los bosques tropicales (Wang et al., 2024). Otro ejemplo de la escasez de mediciones en los trópicos es la falta de datos de validación terrestres para las mediciones espaciales de CO₂ en los trópicos, especialmente en África tropical, lo que ha dado lugar a un debate en curso sobre la magnitud de los intercambios netos de la biosfera en África tropical (Palmer et al., 2019; Gaubert et al., 2023). Del mismo modo, a pesar de la urgente necesidad de evaluar la biodiversidad mundial a escala para evaluar la eficacia de los esfuerzos de conservación de la biodiversidad, las capacidades de monitoreo de la biodiversidad por teledetección satelital están en su infancia.

La reducción de los sesgos en la recuperación de la humedad del suelo y de la columna atmosférica de CO₂ y el desarrollo de nuevas capacidades de medición directamente relacionadas con la biodiversidad (por ejemplo, la diversidad beta de las copas de los árboles) y los indicadores indirectos (por ejemplo, las redes de diversidad) son fundamentales para avanzar en la comprensión del ciclo del agua, los flujos de carbono, la biodiversidad y la dinámica de los ecosistemas. La validación de las observaciones por satélite y aerotransportadas con mediciones terrestres es esencial para el éxito de las misiones de observación de la Tierra de la NASA, en particular con la llegada de una interesante flota de sensores nuevos y futuros que tienen el potencial de captar la multidimensionalidad de los sistemas observados (por ejemplo, a través de las misiones SAR [NISAR] y de Biología y Geología de la Superficie [SBG] de la NASA y la Organización India de Investigación Espacial). El desarrollo de productos satelitales más precisos, especialmente en regiones tropicales poco estudiadas, apoya directamente la misión de la NASA de mejorar la vigilancia del medio ambiente mundial y avanzar en los modelos de predicción.

Los bosques tropicales son los menos investigados de todos los grandes biomas terrestres de la Tierra.

Los métodos para validar las observaciones por satélite y aerotransportadas utilizados en PANGEA incluyen parcelas de inventario forestal, torres de flujo inducido, otras mediciones terrestres y conocimientos ecológicos indígenas, tradicionales y locales (IEK, TEK, LEK) que proporcionan información valiosa sobre la biodiversidad, la dinámica forestal y las funciones de los ecosistemas (por ejemplo, ForestPlots.net et al., 2021; Anderson-Teixeira et al., 2014, Davies et al., 2021, Delwiche et al., 2024). Sin embargo, debido a problemas de accesibilidad y financiación, la cobertura actual de estas mediciones en los trópicos, especialmente en África, es escasa y rara vez sigue un patrón de muestreo aleatorio o sistemático necesario para la potencia estadística y un menor sesgo (Goetz et al., 2015; Bustamante et al., 2016). En consecuencia, la extrapolación a partir de ubicaciones limitadas de parcelas puede dar lugar a incertidumbres y sesgos significativos (Saatchi et al., 2015; Tejada et al., 2019). La distribución latitudinal tanto de las parcelas de inventario forestal como de las torres de flujo de covarianza de Foucault demuestra la infrarrepresentación de los bosques tropicales en los esfuerzos mundiales de investigación, revelando que el menor número de torres y parcelas se encuentra en las regiones forestales tropicales, a pesar de tener la mayor productividad primaria bruta y emisiones de metano de fuentes naturales (Baldocchi, 2020, Schimel et al., 2015) (**Figura 2**). Solo existe una torre de flujo en toda África Central (Sibret et al., 2022). Además, las evidentes lagunas de datos, métodos y conocimientos en los trópicos limitan actualmente los

esfuerzos para desarrollar mapas globales de diversidad utilizando recuperaciones hiperespectrales (por ejemplo, mapas de rasgos funcionales) (Dechant et al., 2024). La ampliación de las observaciones de los rasgos estructurales y funcionales y de las métricas de la función del ecosistema en las regiones forestales tropicales proporcionará datos de calibración y permitirá una mejora significativa en la caracterización de los patrones y procesos que impulsan la dinámica de los bosques tropicales altamente diversos. Además de los modelos estadísticos y basados en procesos, las técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático han crecido considerablemente en la última década y ahora pueden utilizarse para escalar rigurosamente las mediciones terrestres a las observaciones aerotransportadas y satelitales a escala regional y global (Aguirre-Gutiérrez et al., 2021; Dalagnol et al., 2022; Lines et al., 2022).

**La escasez de datos sobre el impacto de la diversidad estructural y funcional de los bosques tropicales en los ciclos del carbono, el agua y la energía limita nuestra capacidad para comprender el papel de los bosques tropicales en el sistema Tierra.
en el sistema terrestre.**

Las predicciones del flujo de carbono del Modelo del Sistema Tierra (ESM, por sus siglas en inglés) tienen una incertidumbre tres veces mayor en los trópicos que en otras latitudes (Cavalieri et al., 2015; **Figura 3**). Los productos robustos basados en la teledetección que describen los ciclos del carbono, el agua y la energía de los bosques tropicales, así como una mejor caracterización de los procesos, son fundamentales para comprender las interacciones y retroalimentaciones entre los bosques tropicales y el clima y limitar las predicciones de los ESM. Las predicciones de los ESM que participan en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) divergen notablemente en magnitud y en las conclusiones sobre si la tierra es un sumidero o una fuente de carbono (Arora et al., 2020; Friedlingstein et al., 2006; Friedlingstein et al., 2014; Negron-Juarez et al., 2015). Si bien el desarrollo de modelos entre la CMIP - Fase 5 (CMIP5) y la CMIP - Fase 6 (CMIP6) dio como resultado un gran paso hacia la restricción de la incertidumbre del flujo de carbono tropical, estas reducciones estuvieron vinculadas principalmente a la inclusión de limitaciones de nutrientes en los modelos (Friedlingstein et al., 2023). Tradicionalmente, los ESM ignoran la mayor parte de la biodiversidad y representan la vegetación tropical de formas simples y agregadas que no captan las respuestas de los bosques tropicales a la variación climática y las perturbaciones y contribuyen al fracaso de los modelos (Levine et al., 2016; Yang et al., 2023; Sakchewski et al., 2016; Schmitt et al., 2020).

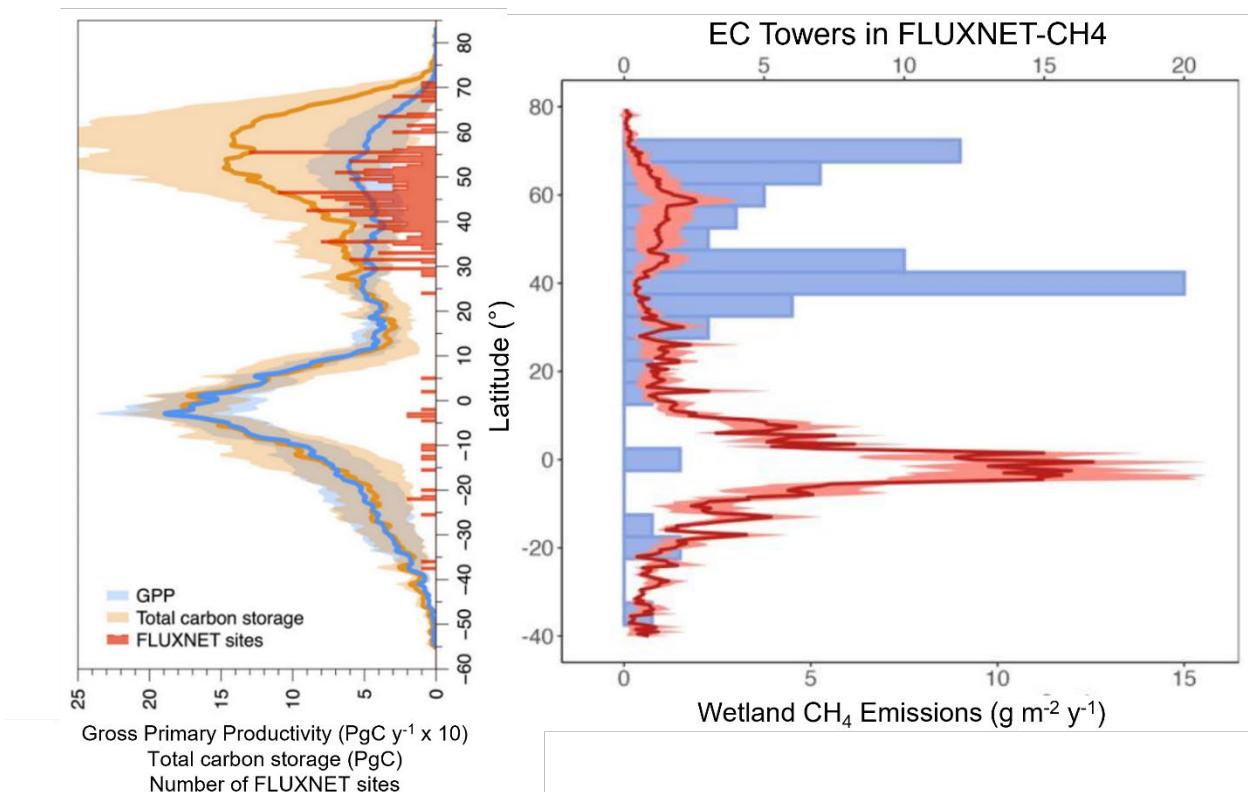


Figura 2. Función de los bosques La función forestal se refiere a los papeles ecológicos de los bosques, como la regulación del clima, el apoyo a la biodiversidad, el ciclo de nutrientes y la provisión de hábitat, que contribuyen a la salud y estabilidad general de los ecosistemas. Las funciones forestales incluyen la productividad primaria bruta (PPB), la productividad leñosa, la respiración de los ecosistemas y la evapotranspiración. El panel (a) es una adaptación de Schimel et al. (2015). Panel (b) de Alison Hoyt, Clarice Perryman y Fa Li.

Para limitar esta incertidumbre es necesario mejorar la representación de los procesos ecológicos de diversos ecosistemas (Bonan et al., 2024). Las generaciones más recientes de modelos de la biosfera terrestre y de modelos de demografía de la vegetación, como el Modelo de Demografía del Ecosistema versión 2 (ED2), el Simulador de Ecosistemas Terrestres Ensamblados Funcionalmente (FATES) y BiomeE, incluyen copas de árboles más diversas estructural y funcionalmente (Fisher et al., 2018; Longo et al., 2019; Koven et al., 2020; Weng et al., 2022). Aunque los modelos de demografía de la vegetación representan los procesos de dinámica forestal de forma más directa, la complejidad adicional crea dos desafíos para las simulaciones regionales y globales. En primer lugar, las condiciones iniciales requieren datos detallados sobre la estructura y la composición de los bosques que, en la actualidad, solo pueden obtenerse para pequeñas áreas de interés a partir de parcelas forestales (Marvin et al., 2014). En segundo lugar, los sistemas de evaluación comparativa de modelos existentes, como el International Land Model Benchmarking (ILAMB; Collier et al., 2018) son insuficientes, ya que la generación más reciente de modelos puede predecir propiedades agregadas razonables (por ejemplo, biomasa total sobre el suelo) mediante la compensación de errores en la representación de procesos (por ejemplo, productividad y mortalidad excesivamente altas). Los recientes avances en teledetección lidar, radar e hiperespectral ofrecen una oportunidad única para recopilar datos sobre la estructura, composición y biodiversidad de los ecosistemas tropicales a escala de paisaje y, de este modo, mejorar la parametrización, inicialización, evaluación comparativa y desarrollo de procesos de los modelos (Schimel et al., 2019; Schimel y Carroll, 2024).

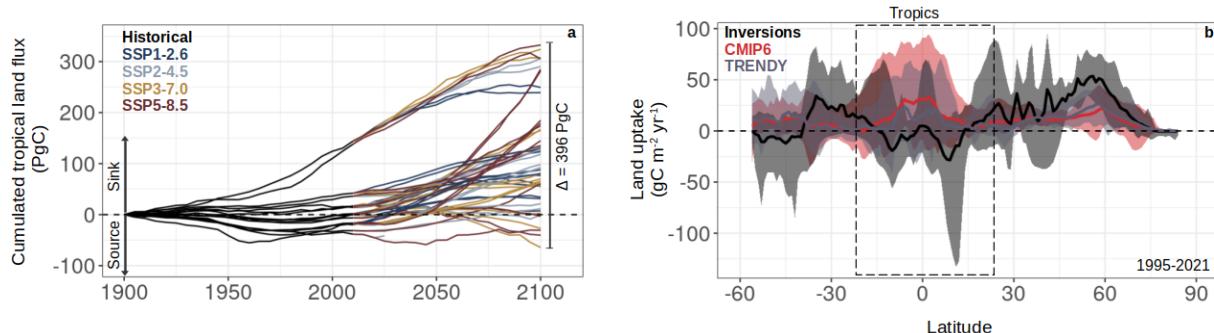


Figura 3. Flujo de carbono terrestre acumulado histórico y futuro de los trópicos según los modelos CMIP6 con vegetación dinámica y múltiples escenarios de emisiones (a). Media zonal de la absorción de carbono terrestre según los modelos de inversión (negro), los modelos CMIP6 con modelos dinámicos de vegetación y los modelos TRENDY de superficie terrestre para el periodo reciente (b). La extensión de la región tropical y su elevada incertidumbre se resaltan con el rectángulo discontinuo. El panel (a) se adaptó de Friedlingstein et al., 2014 (actualización de CMIP5 a CMIP6). El panel (b) se redibujó a partir del AR6 del IPCC con datos recientes.

Para abordar estas necesidades y en respuesta a una convocatoria del Programa de Ecología Terrestre de la NASA, presentamos a continuación el alcance de un proyecto de campo de ecología terrestre, la investigación PAN tropical de bioGeoquímica y Adaptación Ecológica (PANGEA), que avanzará en la comprensión de los procesos que controlan los cambios en los biomas forestales pantropicales y sus retroalimentaciones integradas con el clima de la Tierra (**Figura 4**).

PANGEA emplea una estrategia de ciencia a escala, adoptando un enfoque de sistemas integrados que abarca mosaicos paisajísticos complejos que van desde los bosques hasta los humedales y las turberas, y desde los sistemas socioecológicos agrícolas intactos hasta los alterados. La transdisciplinariedad y la coproducción colaborativa están en el corazón de PANGEA. PANGEA garantizará la colaboración equitativa y transdisciplinar entre investigadores, gobiernos, instituciones y Pueblos Indígenas y Comunidades Locales (IPLCs) para integrar diversas experiencias y conocimientos. Este enfoque permitirá una comprensión más completa del papel de los bosques tropicales en el sistema terrestre y potenciará las soluciones locales al cambio climático y la pérdida de biodiversidad. El diseño anidado de PANGEA, con un enfoque de ciencia a escala que se describe con más detalle en *la Sección 6.1.1*, hará avanzar el seguimiento por satélite, el desarrollo de productos de teledetección y la asimilación de datos y la evaluación comparativa de diversos procesos en modelos de ecosistemas de nueva generación, lo que puede hacer avanzar significativamente las capacidades de predicción a largo plazo. Para garantizar la coordinación de las mediciones y los análisis, PANGEA se ha diseñado en colaboración con numerosas actividades actuales y futuras, como las campañas y misiones de la Agencia Espacial Europea (ESA), el Grupo de Observación de la Tierra y los Árboles (GEO-TREES) y la iniciativa "One Forest Vision" (OFVi). Las recuperaciones de teledetección suborbital (por ejemplo, mediante drones y aeronaves) son elementos críticos de PANGEA, necesarios para escalar entre las mediciones terrestres y las observaciones por satélite de resolución más gruesa. En este sentido, PANGEA se apoya en proyectos de gran éxito de la NASA sobre el terreno y aerotransportados a África y América, como SAFARI 2000, AfriSAR-1 y -2, Biodiversity Survey of the Cape (BioSCape) y varias misiones suborbitales de Earth Venture (EVS).

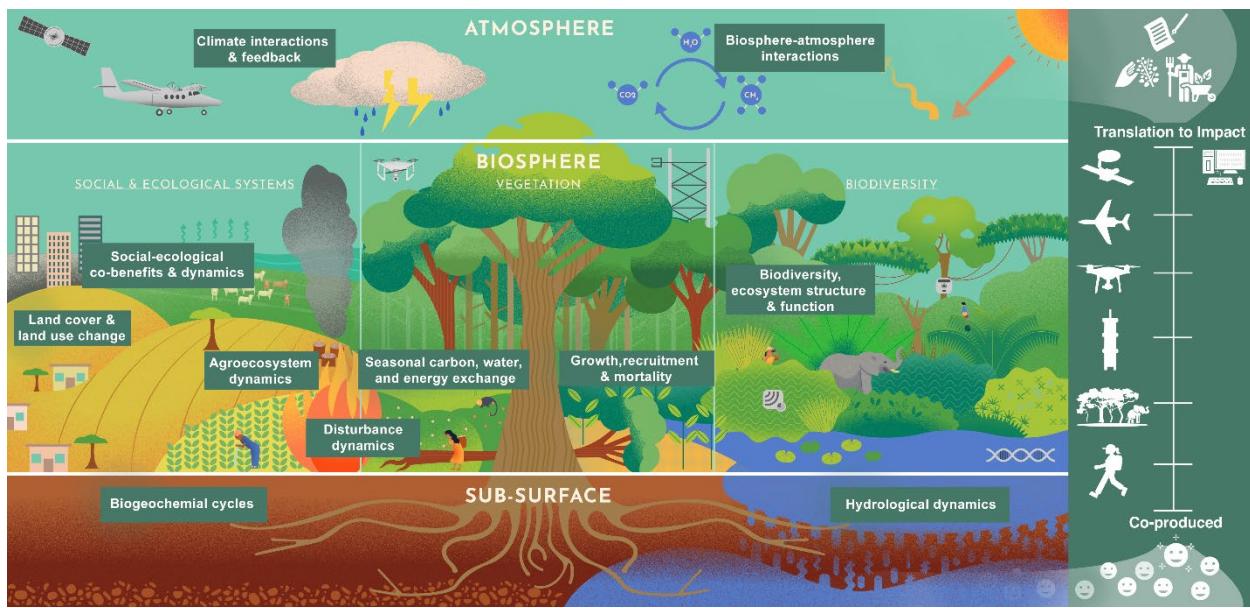


Figura 4. Mediciones y escalado de PANGEA. PANGEA adopta un enfoque integrado y transdisciplinario de la ciencia y las aplicaciones, y recopilará datos desde tierra, torres, drones y aviones en paisajes forestales tropicales de África y América. La modelización y los análisis de teledetección por satélite integrarán esta información para avanzar en la comprensión de los bosques pantropicales.

Relevancia de la Acción por la Tierra: La implementación de PANGEA facultará y permitirá a los responsables de la toma de decisiones beneficiarse plenamente de las misiones satelitales de observación de la Tierra actuales y futuras para tomar medidas eficaces y adaptadas regionalmente para mitigar los impactos del cambio climático y del uso de la tierra y conservar y regenerar biomas forestales tropicales de importancia mundial. Los objetivos de PANGEA (Sección 1.1) están directamente alineados con los programas Earth Action de la NASA, incluyendo Clima y Resiliencia, Recursos Hídricos, Conservación Ecológica y Agricultura. Para mitigar los impactos del cambio climático y del uso de la tierra en la función de los ecosistemas tropicales y la biodiversidad, y para conservar estos biomas de importancia mundial, es necesario tomar medidas. Esta acción requiere una mejor comprensión de las diversas formas en que los bosques tropicales de diferentes continentes están respondiendo al cambio y requiere métodos y tecnologías de vanguardia para desplegar soluciones.

PANGEA desarrollará la ciencia necesaria para escalar las mediciones terrestres a las capacidades de seguimiento por satélite y para escalar el conocimiento y la acción locales a soluciones globales. PANGEA cartografiará y cuantificará la estabilidad a largo plazo del secuestro de carbono y los flujos de metano para mejorar las predicciones futuras y apoyar los esfuerzos de mitigación y adaptación al cambio climático. PANGEA también avanzará en los métodos para cartografiar la biodiversidad y los procesos de los ecosistemas con el fin de desarrollar una mejor comprensión de los bosques tropicales, para apoyar la conservación de la biodiversidad abarcando la variación de la biodiversidad a nivel de genes, especies, comunidades y ecosistemas. Estos esfuerzos se llevarán a cabo a través de actividades equitativas, colaborativas y co-desarrolladas con las comunidades indígenas y locales que entrelazarán el Conocimiento Ecológico Indígena, Tradicional y Local (IEK, TEK y LEK) con datos de teledetección y otras formas de datos y conocimientos (para más detalles, véanse las secciones 6.2.4, 7.2 y 8). Además, los avances científicos y técnicos de PANGEA, guiados por socios que toman medidas, apoyarán el desarrollo adaptado a la región de estrategias de adaptación al cambio climático de los agricultores, el desarrollo de socio-bioeconomías, la mejora de la trazabilidad de los productos agrícolas hasta su origen y la creación de alertas de catástrofes.

para orientar una respuesta rápida. Estos elementos son transversales a las preguntas científicas del PANGEA (Sección 3) y a la estrategia *"De la ciencia a la acción"* (Sección 9).

PANGEA

- **Responder** a preguntas científicas urgentes y relevantes a nivel mundial, haciendo hincapié en las comparaciones entre las principales formaciones forestales tropicales de nuestro planeta mediante análisis e interpretaciones eficaces de observaciones por teledetección (satélite y aerotransportada) combinadas con mediciones terrestres y modelización medioambiental y de ecosistemas.
- **Proporcionar** información que contribuya a la conservación y regeneración de los bosques tropicales, y a la mitigación del cambio climático y la adaptación al mismo.
- **Garantizar** colaboraciones transdisciplinarias y el establecimiento de nuevas relaciones entre diversos socios, incluidos científicos de EE.UU. y de países con bosques tropicales, agencias espaciales internacionales, pueblos indígenas y comunidades locales, responsables de la toma de decisiones y comunidades de acción en los trópicos.
- **Formar y educar** a la próxima generación de científicos y a la mano de obra en general de EE.UU. y de los países tropicales donde se llevará a cabo la investigación de campo.
- **Establecer** un legado de datos abiertos y ciencia abierta para fortalecer las asociaciones entre científicos e instituciones de EE.UU., los países tropicales y otros países como base para futuras investigaciones y aplicaciones.

PANGEA irá más allá de LBA (Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) y más allá de la Amazonia, empleando tecnologías satelitales novedosas y observaciones no disponibles durante LBA, para hacer avanzar la ciencia y las capacidades de vigilancia pantropicalmente (Figura 5).

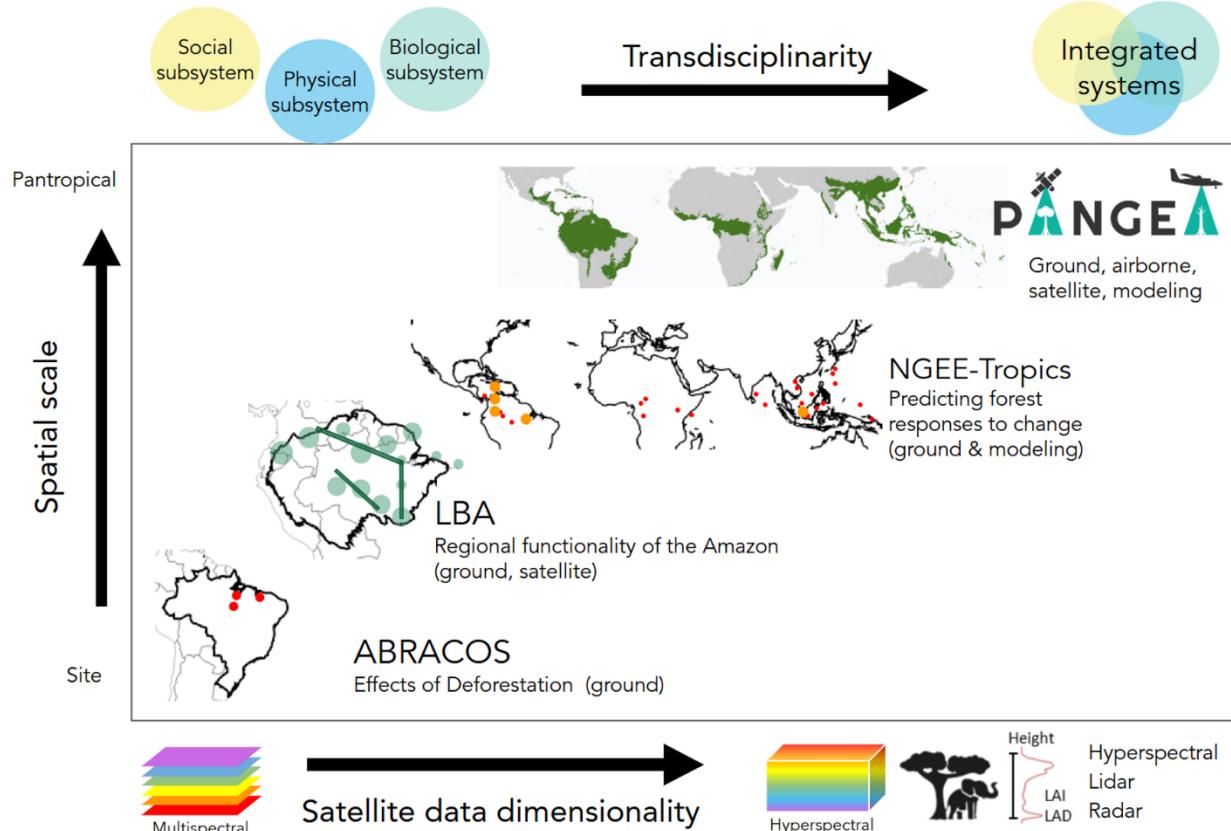


Figura 5. Evolución de PANGEA La evolución de PANGEA. PANGEA se basa en esfuerzos previos que han sido más limitados en cuanto a alcance geográfico, acceso a datos y/o transdisciplinariedad, aprovechando la oportunidad de coordinarse con actividades pantropicales, ricas en datos, modelos, computacionalmente avanzadas y oportunas.

La elaboración de PANGEA se basó en las aportaciones de más de 800 personas, representantes de más de 300 organizaciones de 42 países de los cinco continentes, que participaron en las actividades de los grupos de trabajo, 5 talleres, 10 asambleas públicas, 18 presentaciones en conferencias y simposios, y más de 150 reuniones bilaterales (Figura 6). Los talleres se celebraron en Washington DC, Camerún, Perú, Brasil y Tailandia, con más de 275 participantes presenciales y 298 virtuales. Los participantes en el proceso de definición del alcance representaban a muchas comunidades, incluida la comunidad académica de los trópicos, así como de Estados Unidos y Europa, comunidades indígenas y locales de los trópicos, la comunidad de la NASA y otras agencias federales estadounidenses, agencias espaciales internacionales, agencias gubernamentales extranjeras, organizaciones de la sociedad civil y la industria privada. Este esfuerzo de evaluación subrayó la abrumadora necesidad de PANGEA y la oportuna oportunidad que presenta para coordinarse con muchas actividades actuales y futuras, tal y como se expone en este libro blanco.

En el resto de la Sección 1, ofrecemos una visión general de PANGEA. A continuación, detallamos el concepto de PANGEA, incluyendo los Temas Científicos de PANGEA (Sección 2), las Lagunas de Conocimiento y las Preguntas Científicas (Sección 3), los avances científicos y técnicos derivados de PANGEA (Sección 4), el papel fundamental de la teledetección de la NASA (Sección 5), la estrategia de investigación y el diseño de estudios de PANGEA (Sección 6), las prioridades de PANGEA en materia de creación de capacidades, formación y educación (Sección 7), la estrategia de participación de la comunidad

(Sección 8), la capacidad de llevar las Ciencias de la Tierra a la Acción (Sección 9) y la viabilidad técnica y logística (Sección 10).

1.1 Visión general de los temas, preguntas y objetivos científicos

El conocimiento de los ciclos biogeoquímicos de los bosques tropicales, la biodiversidad, las retroalimentaciones e interacciones climáticas, los sistemas socioecológicos y la dinámica de las perturbaciones es fundamental para predecir la respuesta de los bosques tropicales al cambio climático y de uso del suelo. Comprender estos factores también es crucial para predecir el futuro del sistema terrestre y para desarrollar estrategias de conservación de los bosques y la biodiversidad y de mitigación del cambio. Los temas y preguntas de investigación de PANGEA se desarrollaron a través de un proceso consultivo inclusivo con contribuciones de cientos de científicos de los cinco continentes (véase la Sección 8.1). Los temas y preguntas resultantes hacen hincapié en la resolución de las incertidumbres relacionadas con las tendencias multidecenales y las respuestas a los fenómenos extremos en cinco áreas temáticas (Figura 7):

- **Los ciclos biogeoquímicos** abarcan el movimiento y la transformación de elementos esenciales (por ejemplo, carbono, nitrógeno y fósforo) a través de la biosfera, la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera de la Tierra. En los bosques tropicales, estos ciclos son muy dinámicos, con una rápida rotación de nutrientes y biomasa; no obstante, los bosques tropicales desempeñan un papel importante en el almacenamiento mundial de carbono.
- **La biodiversidad** es la variedad de la vida en la Tierra, incluida su variación dentro de las especies y los ecosistemas y entre ellos (diversidad genética, filogenética, taxonómica y funcional). En los bosques tropicales, la biodiversidad es excepcionalmente alta dentro de los bosques y entre ellos, lo que favorece interacciones complejas y la función de los ecosistemas, y provoca heterogeneidad en las respuestas climáticas y la resiliencia.
- **Las interacciones y retroalimentaciones climáticas** son las interacciones bidireccionales entre los sistemas climáticos y los ecosistemas. Los bosques tropicales regulan directamente los ciclos del carbono, el agua y la energía. Los cambios climáticos (como los cambios en la temperatura y las precipitaciones) y los cambios en el uso y la cubierta del suelo (como los incendios y la degradación forestal) pueden alterar la dinámica de los ecosistemas forestales, creando bucles de retroalimentación que afectan a la estabilidad del clima mundial.
- **Los sistemas socioecológicos** son sistemas interconectados de seres humanos y naturaleza, en los que los componentes ecológicos y sociales interactúan y se influyen mutuamente. En los bosques tropicales, estos sistemas están conformados por los medios de vida, las prácticas culturales



Figura 6. PANGEA en cifras. PANGEA en cifras. La iniciativa PANGEA de 2024 contó con la participación de más de 800 personas de más de 396 instituciones en talleres, ayuntamientos, conferencias, reuniones bilaterales y actividades de grupos de trabajo.

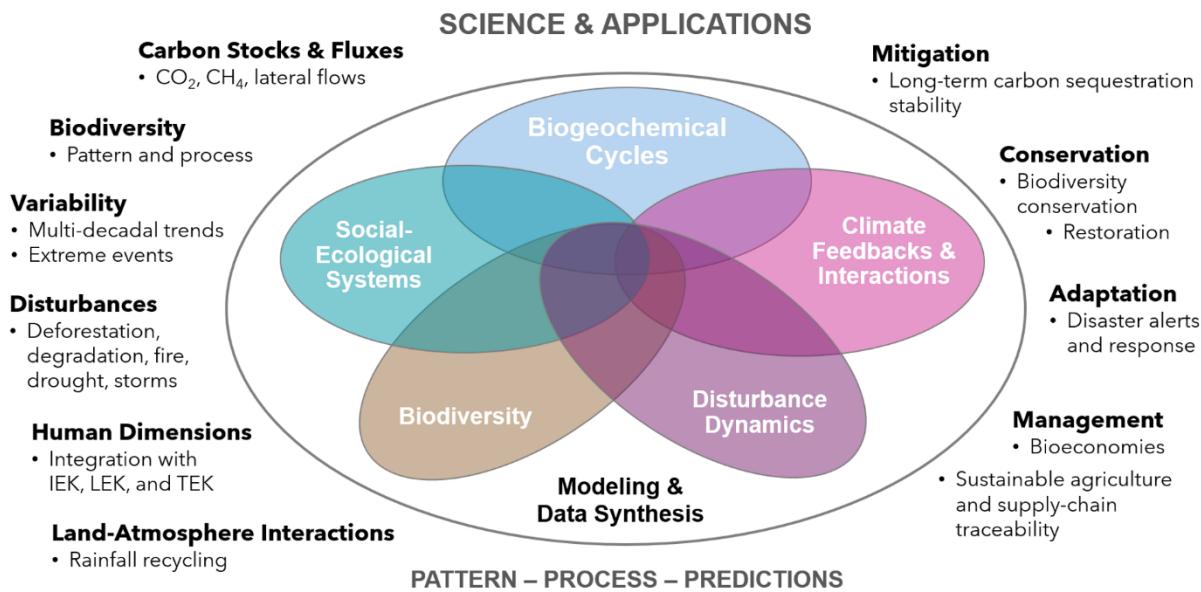


Figura 7. Temas científicos de PANGEA. Los temas científicos y las aplicaciones de PANGEA hacen hincapié en la resolución de las incertidumbres relacionadas con las tendencias multidecenales y las respuestas a los fenómenos extremos en cinco áreas temáticas.

y el uso de los recursos de las comunidades locales y globales, mientras que los cambios ecológicos afectan al bienestar social, creando complejas retroalimentaciones entre las actividades humanas y la estabilidad de los ecosistemas.

- **Las dinámicas de perturbación** varían en cuanto a tipo, intensidad y frecuencia, e implican acontecimientos naturales o inducidos por el hombre, como incendios, tormentas, sequías y talas, que perturban los ecosistemas y afectan a su estructura y función. En los bosques tropicales, estas perturbaciones pueden provocar cambios en el ciclo biogeoquímico, la biodiversidad y la retroalimentación del clima y los sistemas socioecológicos.

Utilizando estos temas, PANGEA responderá a la pregunta general (**Figura 8**): **¿Hasta qué punto son vulnerables o resilientes los paisajes forestales tropicales al cambio climático y de uso de la tierra y cuáles son las repercusiones del cambio forestal en el ciclo global del carbono y el clima?**

Abordar esta amplia cuestión de la vulnerabilidad y la retroalimentación de los bosques tropicales, e informar sobre la conservación de los bosques y la biodiversidad, así como sobre las estrategias de mitigación y adaptación al clima, requiere que PANGEA responda a tres subpreguntas transdisciplinares:

1. ¿Cuáles son los **patrones de** cambio recientes (5-30 años) y en curso en los estados, dinámicas y retroalimentaciones del paisaje de los bosques tropicales, y cómo varían geográficamente?
2. ¿Qué **procesos** controlan la heterogeneidad en la vulnerabilidad de los paisajes forestales tropicales al cambio estructural y funcional en el Antropoceno?
3. ¿Cómo alterarán los cambios actuales y futuros previstos en los paisajes forestales tropicales la retroalimentación de los climas locales, regionales y mundiales y los sistemas socioecológicos?

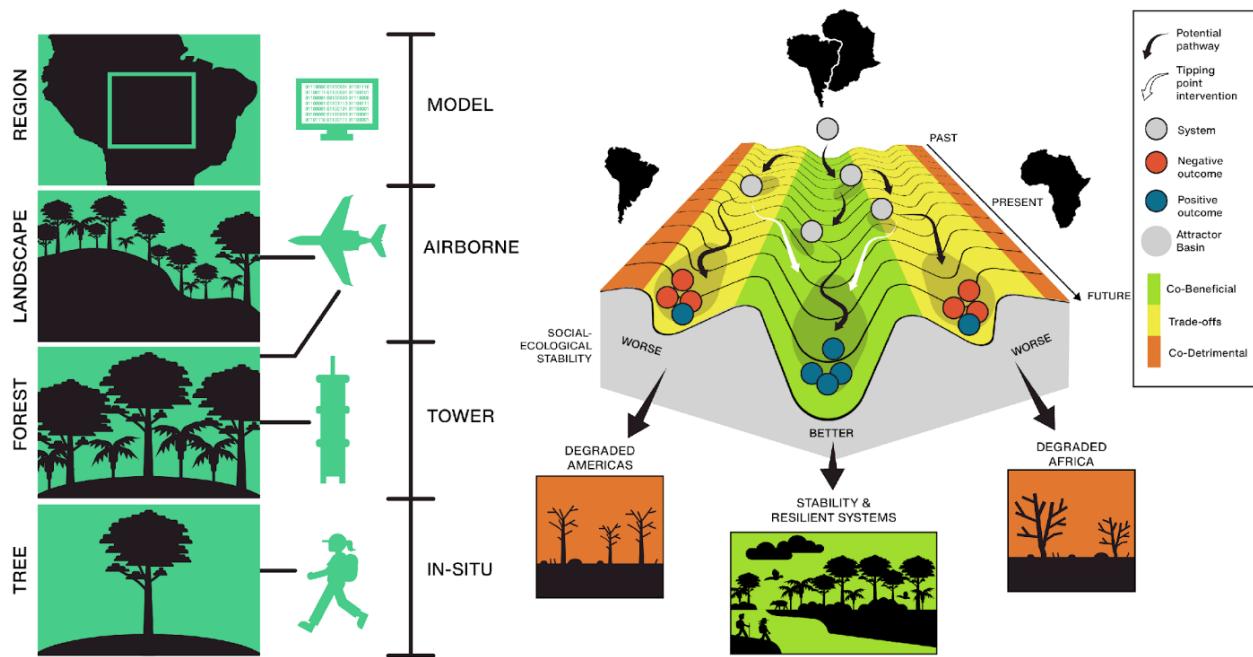


Figura 8. PANGEA PANGEA examina el grado de vulnerabilidad o resiliencia de los paisajes forestales tropicales y sus efectos sobre el ciclo global del carbono y el clima. La ciencia y las aplicaciones y colaboraciones de PANGEA emplean un enfoque integrado para salvar la distancia entre los rápidos avances de la ciencia y la tecnología y la capacidad de la sociedad para aprovecharlos en pro de un mundo más resiliente.

Para responder a estas preguntas, hemos establecido cinco **objetivos PANGEA**:

1. **Caracterizar y cuantificar las respuestas heterogéneas de los bosques tropicales** a los cambios climáticos y de uso del suelo;
2. **Abordar las necesidades de calibración, validación y desarrollo de algoritmos para garantizar que las mediciones puedan recuperarse con precisión a partir de conjuntos de datos de teledetección por satélite** sobre los bosques tropicales y, en última instancia, mejorar la utilidad global de las misiones por satélite;
3. **Limitar la incertidumbre de los modelos de predicción de flujos de carbono tropical y otros ciclos biogeoquímicos, biodiversidad y retroalimentación bosque-clima** mejorando la comprensión de los procesos y avanzando en la integración de datos de teledetección y modelos.
4. **Desarrollar nuevas capacidades para vigilar el carbono, la biodiversidad y la agricultura utilizando la teledetección por satélite** y apoyar el desarrollo de herramientas para traducir la ciencia en acción.
5. **Formar a la próxima generación de científicos y líderes** para que continúen esta labor más allá de PANGEA.

Lo ideal sería que PANGEA se llevara a cabo en todo el trópico. En realidad, PANGEA tendrá que tener un alcance más limitado debido a las restricciones presupuestarias y a la priorización de lo que se puede conseguir en un plazo de 6 a 9 años. Limitar PANGEA a un continente tropical, sin embargo, impide que PANGEA logre comparaciones dentro y entre continentes. Por estas razones, la investigación y las actividades de PANGEA darán prioridad a la investigación de las diferencias entre las dos mayores extensiones de bosques tropicales de la Tierra: las **Américas** y **África Central**. Ambos dependen en gran medida de las precipitaciones recicladas (Baker y Spracklen, 2022), pero han respondido de manera

diferente a las tendencias de desecación decenales (Asefi-Najafabady y Saatchi, 2013; Saatchi et al., 2013) y han estado sujetos a regímenes de uso de la tierra contrastantes (Malhi et al., 2013; Berenguer et al., 2021a). Estos continentes también muestran proyecciones contrastadas, aunque inciertas, en las tendencias de las precipitaciones (Cook et al., 2020; Dobler et al., 2024). Centrarse en estos dos continentes, al tiempo que se integran conjuntos de datos e investigaciones de actividades existentes y complementarias en todos los trópicos, iluminará la importancia de los estados y procesos actuales más que centrarse en una sola región.

1.2 La urgente necesidad de PANGEA

Implementar PANGEA es una necesidad urgente por tres razones. En primer lugar, los estudios sugieren el posible colapso de los ecosistemas forestales tropicales en décadas, lo que podría afectar drásticamente a los ciclos globales del carbono y del agua, exacerbando el cambio climático (Lovejoy y Nobre 2018, Malhi et al., 2009; Boulton et al., 2022; Wunderling et al., 2022). Dado el papel crítico de estos ecosistemas en los ciclos globales del carbono y el agua, el colapso de los ecosistemas forestales tropicales tendría potentes efectos en todo el Sistema Tierra, exacerbando las tendencias actuales del cambio climático (Wunderling et al., 2024). En segundo lugar, la investigación en tierra sigue siendo escasa, y persiste la falta de conocimientos para comprender adecuadamente los datos científicos de las misiones por satélite, tanto las actuales -por ejemplo, **GEDI** (Global Ecosystem Dynamics Investigation), **EMIT** (Earth Surface Mineral dust source Investigation), **OCO-2/3** , y **ECOSTRESS** (Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station), como las futuras, por ejemplo, **NISAR***, **BIOMASS***, **EDGE*** y **SBG***. PANGEA ofrecerá una oportunidad única para obtener mediciones desde tierra y desde el aire mediante esfuerzos internacionales coordinados y bien programados, para comprender las señales de estas misiones y para desarrollar y calibrar métodos de síntesis y asimilación de datos, así como para impulsar y comparar modelos de la biosfera terrestre y del sistema socioecológico. Si no se aprovechan estas misiones para coordinarlas con las mediciones terrestres, se perderá una oportunidad única para reducir las incertidumbres en las regiones con las mayores reservas de carbono y la mayor contribución al ciclo del carbono, el agua, la energía y los nutrientes entre los ecosistemas terrestres (Schimel et al., 2015; Schimel et al., 2019). En tercer lugar, el riesgo de transiciones críticas en los bosques tropicales difiere entre biomas forestales tropicales (Liu et al., 2017), con ejemplos recientes que muestran diferencias pronunciadas entre África y las Américas (Hubau et al., 2020; Bennett et al., 2021; 2023). Apenas estamos empezando a comprender los mecanismos que subyacen a estas diferencias, junto con la diversidad estructural y funcional subyacente de los bosques tropicales. PANGEA cubrirá lagunas críticas de conocimiento, permitiendo avances oportunos que apoyan directamente el Área de Enfoque del Ciclo del Carbono y los Ecosistemas de la NASA, en alineación con las Áreas de Enfoque del Ciclo del Agua y la Energía y la Variabilidad y el Cambio Climático, la utilidad de las misiones, incluyendo NISAR y SBG, así como herramientas para implementar y evaluar los compromisos globales sobre el clima y la biodiversidad.

1.3 Papel de las observaciones por teledetección

PANGEA colmará lagunas críticas de datos y métodos para avanzar en el escalonamiento entre una multitud de mediciones terrestres y observaciones por satélite y aerotransportadas. Nos encontramos en un momento sin precedentes de abundancia de datos, modelos y avances computacionales. En los últimos años, el lidar espacial, el radar de microondas, el hiperespectral, el altímetro y otras capacidades de teledetección han entrado en funcionamiento a múltiples escalas. Los sensores satelitales y aerotransportados permiten recuperar de forma más directa las concentraciones atmosféricas de CO₂ y CH₄ , los flujos de aguas subterráneas y superficiales que pueden revelar flujos laterales de carbono y nutrientes, así como la diversidad estructural, funcional y, en algunos casos, taxonómica de los bosques. Sin embargo,

en las regiones forestales tropicales, las mediciones terrestres son escasas, lo que limita la utilidad global de las observaciones por satélite. Pocos países con bosques tropicales cuentan con inventarios forestales y de fauna silvestre sistemáticos y repetidos con regularidad, torres de flujo o datos meteorológicos, especialmente en África tropical. Sin embargo, incluso el número limitado de lugares de investigación y mediciones terrestres proporcionará información crítica sobre los procesos biogeoquímicos, ecológicos e hidrológicos. La escasez de estos datos dificulta la ampliación de las mediciones y los análisis a regiones regionales, continentales o pantropicales. PANGEA llevará a cabo una recogida coordinada de datos y avanzará en los métodos para escalar con mayor precisión las mediciones en tierra y en torres, por un lado, y las observaciones aerotransportadas y espaciales, por otro.

Para aprovechar plenamente las nuevas observaciones por satélite de los nuevos sensores, necesitamos datos coordinados de calibración y validación. Las grandes lagunas de datos y las incertidumbres de los procesos en los bosques tropicales limitan actualmente el desarrollo de algoritmos y productos, impidiendo que se aproveche plenamente la utilidad global de estos sensores satelitales.

La constelación de satélites internacionales de observación de la Tierra en servicio en la actualidad, los que están a punto de lanzarse y los que se encuentran en las primeras fases de planificación e implementación ofrecen muchas dimensiones de información que antes no estaban disponibles ni se utilizaban ampliamente en los estudios de los bosques tropicales. El Experimento Biosfera-Atmósfera a Gran Escala en la Amazonia (LBA) (Avissar et al., 2002; Davidson et al.; 2012; Keller et al., 2009), el anterior proyecto de la NASA sobre bosques tropicales, comenzó en 1998, antes del lanzamiento de los satélites EOS Terra y Aqua. Landsat era entonces la principal herramienta para el seguimiento de la deforestación (Skole y Tucker, 1993) y a lo largo de la primera década de investigación del LBA se aplicó para estimar la tala de árboles (Asner et al., 2005) y los incendios forestales del sotobosque (Morton et al., 2011). La información de teledetección en los primeros modelos ecológicos, como el modelo de biosfera Carnegie-Ames-Stanford (CASA) (Potter et al., 1993), incorporaba originalmente datos del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de satélites meteorológicos de órbita polar (AVHRR) calibrados con la productividad primaria neta. La comprensión de estos retos de correspondencia de datos motivó nuevas vinculaciones con datos de teledetección más sofisticados. La interpretación de los datos MODIS llevó a la observación de que la región amazónica presenta una clara señal estacional de verdor y oscurecimiento (Huete et al., 2006). El LBA colmó una laguna de conocimiento, desarrollando una comprensión básica de la vulnerabilidad de la Amazonia al cambio climático. Además, LBA creó una comunidad de investigación autosuficiente y dinámica que ha prosperado en Brasil y sigue influyendo en toda Sudamérica. El LBA estaba limitado por el área focal de la Amazonia y por el tipo y disponibilidad de observaciones de campo y datos de teledetección. El proyecto en curso Next Generation Ecosystem Experiment in the Tropics (NGEE-Tropics, <https://ngee-tropics.lbl.gov>) se centra en la predictibilidad de los procesos de los ecosistemas tropicales a escalas específicas, y el aumento de la capacidad de ampliar estos conocimientos a los niveles continental y pantropical sigue siendo un desafío crítico. PANGEA abordará las limitaciones de los esfuerzos anteriores aprovechando los datos de teledetección más recientes y futuros para escalar los estados y procesos de los ecosistemas. Este enfoque allana el camino hacia una comprensión más completa y predictiva de los ecosistemas tropicales desde la escala local a la pantropical. **Las nuevas tecnologías de sensores satelitales están yendo más allá de la evaluación del verdor** (véase la Sección 5) y están proporcionando una visión mucho más profunda de la función de los bosques tropicales para permitir mediciones más directas de los flujos de los ecosistemas, la biodiversidad y las respuestas al cambio.

La comprensión de los bosques tropicales a escala requiere la teledetección por satélite unida a mediciones terrestres. Las lagunas de conocimiento (véase la Sección 3) que PANGEA abordará no pueden resolverse sin observaciones satelitales pantropicales, análisis integradores y modelos. El avance efectivo en

el uso de la teledetección por satélite requiere una integración reflexiva, creativa y rigurosa de diferentes formas de datos a través de escalas espaciales y temporales. La abundancia de nuevos datos satelitales, junto con los avances en la computación en nube, el aprendizaje automático y la IA permitirán un análisis de datos más robusto que en anteriores proyectos TE de la NASA, como LBA. En la actualidad, las escasas observaciones terrestres y los desajustes de escala con los datos de los satélites tropicales impiden la validación de las métricas de teledetección y el desarrollo de modelos de IA. PANGEA aborda estos problemas mediante la integración de datos de tierra, torres, drones, aviones y satélites con enfoques de escalado perfeccionados en proyectos anteriores como el Experimento de Vulnerabilidad Ártico-Boreal (ABoVE).

1.4 Necesidad de coordinar la recogida de datos y el trabajo en equipo

Reconociendo la profunda huella que el colonialismo ha dejado en la investigación de los bosques tropicales, junto con la ciencia de paracaídas y sobrevuelo (Culotta et al., 2024), PANGEA adopta un enfoque interactivo y entrelazado para garantizar un compromiso equitativo y ético con los científicos, las instituciones y los socios de los gobiernos, y los Pueblos Indígenas y Comunidades Locales (IPLC). Varias secciones describen el enfoque de PANGEA respecto a la participación de la comunidad (Sección 8), una estructura organizativa inclusiva (Sección 10.1), Earth Science to Action (Ciencia de la Tierra para la Acción) (Sección 9), formación y educación (Sección 7), ciencia abierta y gestión de datos (Sección 10.3), y acuerdos internacionales al realizar campañas aéreas (Sección 6.2.4). El enfoque de PANGEA se basa en el reconocimiento de que la ciencia del sistema Tierra es intrínsecamente polifacética y compleja. El Programa de Ecología Terrestre de la NASA ha promovido el modelo multi-investigador durante décadas de campañas de campo que abarcan el Primer Experimento de Campo ISLSCCP (FIFE), el Estudio Boreal Ecosistema-Atmósfera (BOREAS), el Experimento a Gran Escala Biosfera-Atmósfera en Amazonia (LBA), y ABoVE. PANGEA también fomentará una estrecha colaboración con instituciones clave de Estados Unidos, como el USDA, el USFS, el DOE, el USGS, el Smithsonian, destacadas universidades, como Penn State, la Universidad de Oklahoma, la UCLA y la Universidad de Maryland, comunidades indígenas, como la Alianza Global de Comunidades Territoriales (GATC), y socios internacionales, como más de 390 instituciones, organizaciones y universidades de países tropicales (**Figura 9**).

Estas asociaciones abarcan diversos esfuerzos de investigación, integrando la experiencia de distintas disciplinas para abordar las lagunas críticas de conocimiento y los múltiples impulsores y procesos interactivos para la comprensión de los bosques tropicales. Muchas variables requieren conocimientos especializados, desde la adquisición y el uso de observaciones por satélite e instrumentos como un espectrómetro de imágenes de alto rendimiento hasta la identificación botánica de especies arbóreas o el conocimiento tradicional de las interacciones entre especies. Ningún individuo o pequeño grupo de individuos posee todos los conocimientos y herramientas que exige una investigación científica del sistema Tierra. Satisfacer las necesidades de análisis integradores de los biomas tropicales requiere un gran equipo de especialistas que trabajen juntos. PANGEA requiere una fuerte colaboración para garantizar que las mediciones se coordinan en el tiempo y el espacio para maximizar su valor en la interpretación y modelización. Esto sólo puede lograrse mediante un equipo cooperativo, coordinado y transdisciplinario.



Figura 9. PANGEA conecta los puntos. PANGEA presenta una oportunidad única para obtener datos terrestres y aéreos con esfuerzos coordinados y bien sincronizados, para maximizar el valor de las misiones por satélite actuales y de próxima generación, a través de asociaciones con instituciones y organizaciones de todo el mundo y dentro de los EE.UU. PANGEA se coordinará estrechamente con las actividades actuales y futuras para llenar los vacíos de datos, conocimientos y aplicaciones restantes.

Para incluir, empoderar y hacer avanzar a los grupos históricamente subrepresentados en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM) -por ejemplo, personas que se identifican como negras, indígenas, hispanas, mujeres o con discapacidades- PANGEA priorizará el compromiso ético y equitativo en todo momento.

1.5 Campaña de campo y dominio de estudio de ecología terrestre PANGEA

PANGEA es un proyecto plurianual que consta de varias fases: teledetección por satélite y aerotransportada, mediciones en tierra y campañas a escala de paisaje. Las actividades de PANGEA medirán un conjunto de variables para caracterizar la estructura, función, dinámica, flujos y sistemas socioecológicos de diversos paisajes forestales en los trópicos. Utilizando un diseño de campaña modular y flexible, PANGEA mejorará las capacidades de teledetección por satélite en los trópicos para comprender las respuestas heterogéneas de los bosques tropicales al cambio climático y de uso de la tierra. PANGEA adquirirá mediciones terrestres combinadas con datos de teledetección aérea (por ejemplo, hiperespectrales, lidar, SAR, flujos de carbono) que hasta ahora sólo se han recogido en unos pocos lugares de los trópicos en diferentes momentos, por diferentes organizaciones y con diferentes métodos.

PANGEA incluirá un dominio **central** y otro **ampliado**. El dominio central es donde el componente financiado por la NASA de las campañas de campo coordinadas desde tierra, torres, drones y aviones tendrá lugar dentro de múltiples paisajes grandes (aproximadamente 10.000 km²). En la sección 6.2.2 se describen los paisajes candidatos evaluados durante el proceso de definición del alcance que se evaluarán durante la fase de definición científica de PANGEA, antes de la selección final. El dominio ampliado abarcará los bosques húmedos pantropicales y es el área más amplia de interés científico, donde pueden llevarse a cabo proyectos adicionales a través de asociaciones, y donde se hará hincapié en los análisis por satélite y de modelización. *El Recuadro 1* describe una evaluación preliminar de la heterogeneidad dentro de paisajes geográficos clave en el dominio ampliado de PANGEA. El dominio PANGEA (núcleo + extendido) cubre los sistemas socio-ecológicos de los bosques tropicales y los paisajes asociados que se encuentran en los trópicos húmedos y la escala espacial requerida para abordar las preguntas principales (Sección 3). Tanto el dominio central como el ampliado abarcarán los bosques tropicales húmedos, incluidos los bosques inundados, los humedales y las turberas.

PANGEA aprovechará la inversión de la NASA en Ecología Terrestre para sus recursos básicos. Para tener en cuenta una serie de escenarios de financiación de la NASA para PANGEA, hemos derivado los niveles de **Línea de Base, Umbral y Alcance de las Mediciones Científicas Esenciales** a partir de los Objetivos Científicos de PANGEA (véase la Sección 6.2.1 para más detalles). Las Mediciones Científicas Esenciales permitirán a PANGEA (1) comprender las diferencias en las reservas y flujos de carbono tropical y las fuerzas que impulsan la heterogeneidad, (2) resolver los problemas de escalado entre los datos de campo y de satélite mediante el avance en la comprensión de los procesos y los métodos de escalado, y (3) predecir las diferentes respuestas de los ecosistemas forestales tropicales al cambio climático y de uso de la tierra. Como se ha señalado anteriormente, el ámbito central de PANGEA abarca los bosques húmedos tropicales de África y, dependiendo del nivel de Medición Científica Esencial, los bosques húmedos tropicales de América (**Figura 10**).

A continuación, presentamos una visión general de la estrategia y el diseño del estudio, que se describen detalladamente en la Sección 6. Nos centraremos en las campañas paisajísticas de PANGEA y en las actividades de medición al principio y al final de las estaciones secas. Al comienzo de la estación seca, las mediciones capturarán la dinámica del sistema en un periodo de estrés reducido, inmediatamente después de la fuerte estación húmeda. Este periodo de tiempo permite realizar mediciones coordinadas a múltiples

escalas que son inalcanzables durante la temporada alta de lluvias, cuando la nubosidad limita la teledetección óptica sobre los trópicos. Las campañas de medición al final de la estación seca captarán los momentos en que los sistemas socioecológicos tropicales están más estresados en términos de agua y temperatura. Aunque reconocemos que los datos recogidos únicamente durante la estación seca corren el riesgo de sesgar la comprensión de los bosques tropicales dadas las fuertes diferencias estacionales en la dinámica y los procesos, incluyendo el ciclo del carbono, la hidrodinámica, las interacciones de las especies y las actividades de uso de la tierra (por ejemplo, incendios y tala), la necesidad de obtener mediciones simultáneas terrestres, aéreas y por satélite hace que esta sea una decisión pragmática. Al final de la estación húmeda, la mayoría de los procesos que operan durante el pico de la estación húmeda seguirán presentes. Por esta razón, PANGEA podrá seguir captando las diferencias estacionales centrándose en el comienzo y el final de la estación seca. Para cumplir los objetivos científicos y de aplicación de PANGEA, se presentan tres posibles estrategias:

- **Línea de base:** Las mediciones de PANGEA abarcan ~3-6 paisajes tropicales africanos y ~3-6 paisajes tropicales americanos que capturan el final de la estación húmeda y el final de la estación seca.
- **Umbral:** Las mediciones de PANGEA abarcan 2 paisajes tropicales africanos y 2 paisajes tropicales americanos que captan el final de la estación húmeda y el final de la estación seca.
- **Descope:** Las mediciones de PANGEA abarcan 2 paisajes tropicales africanos que capturan el final de las estaciones húmeda y seca, que se compararán con la información de los trópicos americanos cotejada a partir de los datos existentes, otros proyectos y campañas dirigidos por colaboradores, compras de datos comerciales y drones desplegables. Esta opción de alcance parcial cumple los objetivos de PANGEA al tiempo que tiene en cuenta las posibles restricciones de financiación o la incertidumbre geopolítica.

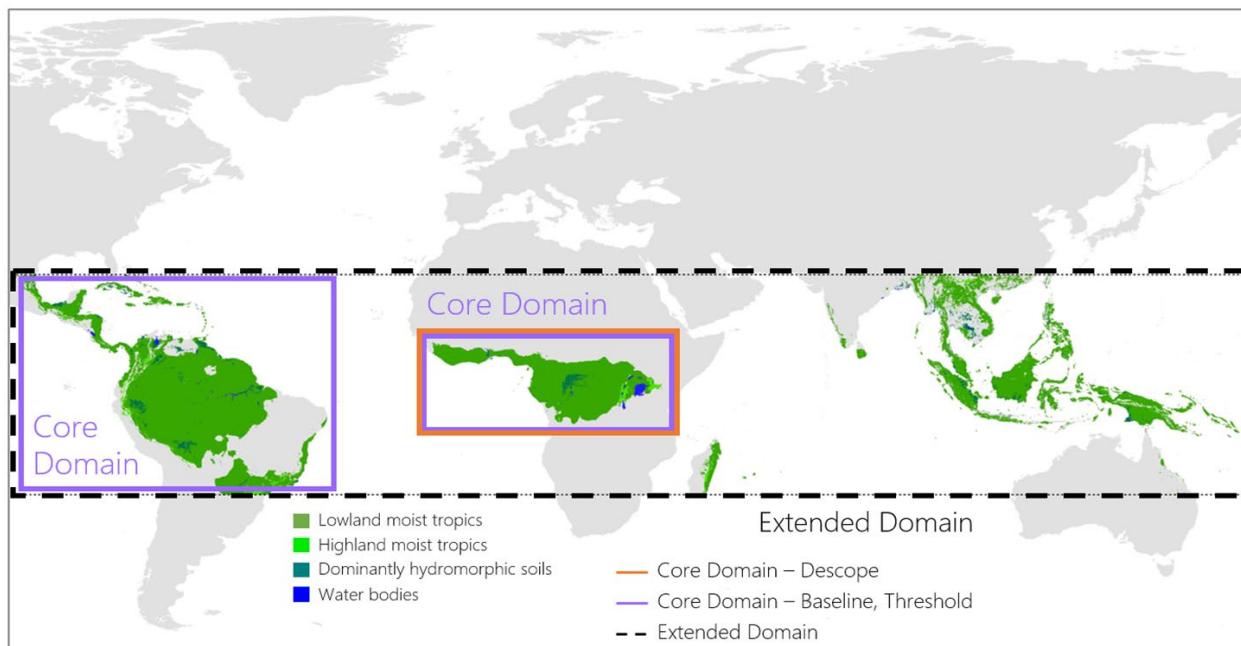


Figura 10. Dominio de estudio de PANGEA. Dominio central de PANGEA, bajo los niveles de Mediciones Científicas Esenciales de Línea Base y Umbral (líneas moradas continuas) y Descope (línea naranja continua), y dominio ampliado (línea negra discontinua). Los límites se obtuvieron de las siguientes zonas agroecológicas GAEZv4: trópicos húmedos de tierras bajas, trópicos húmedos de tierras altas, suelos dominante hidromorfos y tierras con limitaciones severas de suelo/terreno.

Las medidas Baseline, Threshold y Descope detalladas en la Sección 6.2.1 representan proyectos autónomos financiados por la NASA, sin ninguna dependencia de fondos ajenos a la NASA o esfuerzos sinérgicos (**Tabla 1**). Las campañas intensivas dentro de estas estrategias están concebidas para ser implementadas como módulos independientes con dependencias limitadas, de modo que el calendario general y el perfil presupuestario puedan ser flexibles. Dada la urgencia y la importancia del tema, y el gran interés de la comunidad, existe un gran potencial para aumentar o incluso superar las contribuciones de la NASA (véase la Sección 10.3 para más detalles). A menos que se indique lo contrario, el ámbito central en el libro blanco se refiere al definido para el nivel de referencia de las Mediciones Científicas Esenciales.

Tabla 1. Logros de PANGEA en las versiones Baseline, Threshold y Descope.

| REALIZABLE | LÍNEA DE BASE | UMBRAL | DESCOPE |
|---|---|--|-----------------------------|
| VARIABILIDAD ENTRE CONTINENTES | Sí | Sí | No |
| VARIABILIDAD DENTRO DE LOS CONTINENTES | Sí | Limitado | Limitado |
| FUNCIONAMIENTO DE LOS BOSQUES TROPICALES A LO LARGO DE GRADIENTES AMBIENTALES | Gradientes múltiples. Comparaciones intercontinentales. | Gradiente único. Efectos indirectos a través de gradientes intercontinentales. | Gradiente único o colineal. |
| CAPACIDAD PARA PROPORCIONAR DATOS DE CALIBRACIÓN EN REGIONES CRÍTICAS | Muy fuerte | Fuerte | Moderado |
| EL ÉXITO DEPENDE DE ASOCIACIONES Y FINANCIACIÓN EXTERNAS | No contingente | Algo contingente | Muy contingente |
| CAPACIDAD PARA RESPONDER A LAS PREGUNTAS CIENTÍFICAS CLAVE DE PANGEA | Completamente | En su mayoría | Parcialmente |

La ubicación de estas áreas primarias de investigación dentro del dominio central se basará en (1) las oportunidades para llevar a cabo una investigación integrada a través de temas científicos (Sección 2); (2) la ocurrencia de variabilidad clave con respecto a la dinámica biótica, abiótica y de perturbación (**Figura 11**); y (3) la existencia de investigación en curso o planificada financiada por la NASA, así como las relaciones y actividades en curso llevadas a cabo por colaboradores e instituciones locales e internacionales. Durante el estudio de alcance, se realizó un análisis inicial de la variabilidad en el dominio ampliado para evaluar la heterogeneidad espacial (véase **el recuadro 1**).

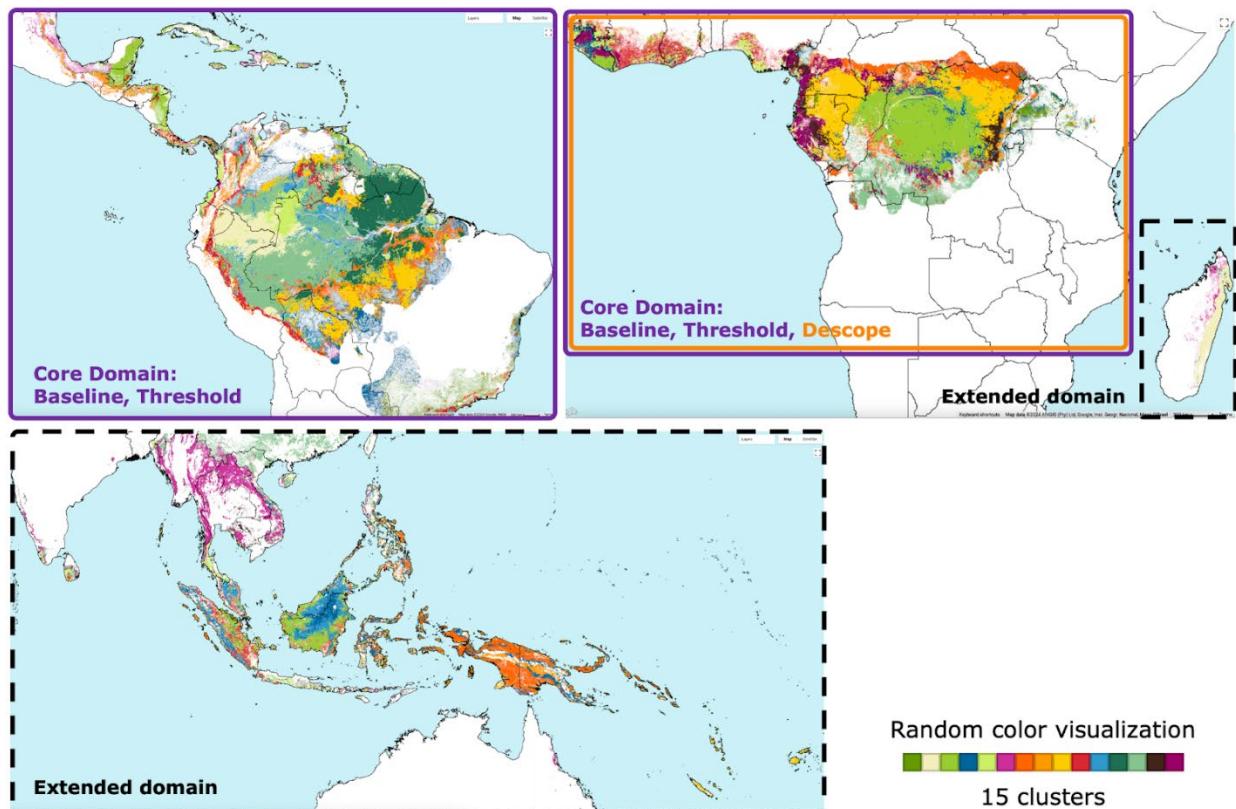


Figura 11. Análisis de variabilidad. Resultados de un análisis inicial de variabilidad descrito en el Recuadro 1. Para cada continente, definimos 15 conglomerados que describen la heterogeneidad de los bosques a través de los paisajes, utilizando conjuntos de datos sobre clima, estructura, composición y función de los bosques, biodiversidad, uso del suelo, cubierta terrestre e historial de perturbaciones. Los conglomerados de cada continente se definieron de forma independiente y se muestran en diferentes colores aleatorios. El mismo color en distintos continentes no indica una correspondencia de las condiciones medioambientales entre continentes.

Las campañas aerotransportadas serán un componente importante de las adquisiciones de datos a escala de paisaje de la Línea de Base, Umbral o Descope. Incluirán datos de observaciones de flujos aerotransportados para medir los flujos de CO_2 , CH_4 , calor sensible y calor latente a alta resolución espacial; reflectancia hiperespectral y lidar de pequeña huella para medir los rasgos de las hojas del dosel y la estructura de la vegetación; datos de radar de apertura sintética (SAR) para medir los humedales, los sistemas inundados estacionalmente y la dinámica de las perturbaciones; y lidar de pequeña huella para medir la heterogeneidad vertical y horizontal de alta fidelidad en la estructura del ecosistema y el índice de área vegetal. Las mediciones y los conocimientos terrestres son cruciales para (1) validar las observaciones aéreas y por satélite, (2) descubrir los mecanismos ecológicos y (3) evaluar las dependencias de escala en los ecosistemas tropicales. PANGEA aborda estas tres lagunas en los bosques tropicales a través de asociaciones con organizaciones locales y la infraestructura existente para ampliar las observaciones de campo y avanzar en la integración de datos y conocimientos, incluyendo datos manuales *in situ* y TEK (por ejemplo, diversidad florística, faunística y filogenética, interacciones entre especies, dinámica de las perturbaciones, actividades de uso de la tierra); datos automatizados *in situ* (por ejemplo, mediciones de flujo de savia, cámaras trampa y sensores bioacústicos); datos meteorológicos y de flujo de covarianza de Foucault; teledetección proximal basada en torres (por ejemplo, SIF, radiación infrarroja térmica, VOD y cámaras fenológicas [PhenoCams]); y teledetección proximal basada en drones. Se desarrollará un conjunto de modelos a partir de los datos y la información recopilados, así como productos de síntesis derivados de

Cuadro 1. Evaluación de la heterogeneidad en el ámbito ampliado de PANGEA.

Los ecosistemas forestales tropicales son heterogéneos, y los patrones de estructura forestal, composición de especies y función surgen de las interacciones entre el clima, la historia geológica, los suelos, la topografía, la biogeografía, las perturbaciones naturales, las interacciones bióticas y los cambios en el uso y la cobertura del suelo. Las campañas de campo de PANGEA se diseñarán para capturar y muestrear bosques que abarquen múltiples paisajes heterogéneos. Para orientar la selección de paisajes, el equipo de PANGEA realizó un análisis de conglomerados de ecosistemas forestales tropicales que tenía en cuenta múltiples factores de heterogeneidad (Figura 11). Este análisis se basó en (1) la estructura forestal a partir de la biomasa viva y los flujos netos de carbono (Harris et al., 2021) y la altura del dosel (Lang et al, 2023); (2) las métricas de biodiversidad a partir de la riqueza de especies para taxones no vegetales (por ejemplo, IUCN, 2024); (3) fluorescencia de clorofila inducida por el sol (SIF) (Li y Xiao, 2019) como proxy de la productividad primaria bruta (GPP); (4) temperatura media anual y precipitación total de ERA5 (Hersbach et al., 2020) y déficit hídrico climático a largo plazo (Chave et al. 2014); (5) contenido de nitrógeno y arcilla del suelo de SoilGrids2.0 (Poggio et al., 2021); (6) información topográfica de la altura sobre el drenaje más cercano (Donchyts et al. 2016); y (7) un conjunto de datos de modificación humana global (asentamientos, agricultura, transporte, minería, energía e infraestructura) (Kennedy et al. 2019). Para garantizar que los paisajes fueran coherentes con la historia evolutiva, cada continente se analizó por separado, lo que dio lugar a 15 grupos únicos para cada región (Américas tropicales, África y Australasia). Esta evaluación inicial no tuvo en cuenta la incertidumbre en los conjuntos de datos, y no buscó identificar el número más parsimonioso de conglomerados. PANGEA refinará este enfoque durante la fase de Definición Científica y combinará estos resultados con la lista de paisajes candidatos (Sección 6.2.2), las regiones que dominan la incertidumbre del modelo y de la síntesis de datos (Sección 6.3.1), y la evaluación de la viabilidad técnica (Sección 10) para definir los paisajes prioritarios en el Plan de Experimento Conciso (Sección 10.5).

los conjuntos de datos adquiridos, que se utilizarán para inicializar, proporcionar condiciones de contorno y comparar modelos basados en procesos (Sección 6.3). La teledetección y las mediciones terrestres de PANGEA para la integración de datos y modelos ayudarán a generalizar las capacidades cartográficas en todos los trópicos, y a modelizar los flujos de carbono, agua y energía y sus relaciones con la biodiversidad para examinar la estabilidad de los bosques tropicales bajo futuras proyecciones climáticas.

1.6 Earth Science to Action

El Sistema Tierra, con sus sistemas geofísicos, biológicos y sociales interconectados, atraviesa un momento especialmente singular de su historia. Debemos aprovechar la oportunidad para beneficiarnos de los increíbles avances en las herramientas modernas, la potencia de cálculo (incluida la IA) y las infraestructuras de investigación. Estos avances ayudarán a las personas a tomar medidas decisivas para conservar los bosques y la biodiversidad, mitigar y adaptarse al cambio climático y de uso del suelo, y mejorar la seguridad alimentaria e hídrica y la salud humana. La aceleración de las tasas de cambio en los trópicos impulsa la urgencia de aplicar los conocimientos de las fronteras de las Ciencias de la Tierra de la NASA. Desde el inicio del programa Earth Science Enterprise Applications en 2001 (Plan Estratégico ESE) hasta el lanzamiento de la estrategia Earth Science to Action en 2024 (St Germain, 2024 - [Plan Estratégico ES2A](#)), la NASA ha innovado un enfoque de sistemas para facilitar la recopilación de Observaciones de la Tierra y predicciones en herramientas de apoyo a la toma de decisiones y la gestión para diversos usuarios y colaboradores para avanzar en sus iniciativas locales que proporcionan servicios esenciales a la sociedad. La Encuesta Decadal de 2017 nos dirige a "perseguir objetivos cada vez más ambiciosos y soluciones innovadoras que mejoren y aceleren el valor de la ciencia/aplicaciones de las observaciones y análisis de la

Tierra desde el espacio para la nación y el mundo de una manera que ofrezca un gran valor" (Encuesta Decadal, 2017).

PANGEA se basará en las inversiones estratégicas y las colaboraciones internacionales para salvar la distancia entre los rápidos avances de la ciencia y la tecnología y la capacidad de la sociedad para aprovecharlos en pro de un mundo más resiliente.

Las contribuciones de PANGEA Earth Science to Action (ES2A) para avanzar e integrar el conocimiento de las ciencias de la Tierra con el fin de capacitar a la humanidad para crear un mundo más resiliente se describen en detalle en la Sección 9. En resumen, PANGEA apoya la estrategia ES2A de la NASA mediante

- *Investigar los riesgos de cruzar umbrales críticos y el potencial de impactos ambientales y sociales en cascada.*
- *Apoyar los esfuerzos para mejorar la resistencia de la Tierra mediante la evaluación de riesgos y contingencias y el desarrollo de estrategias de mitigación y adaptación para responder a los cambios globales.*
- *Desarrollar herramientas, modelos y sistemas de evaluación eficientes, interactivos y de extremo a extremo con latencias, escalas temporales y espaciales adecuadas y cuantificación de la incertidumbre para permitir acciones basadas en la ciencia a las comunidades, los responsables políticos y los encargados de tomar medidas.*

2 PANGEA Temas científicos

Debido a la complejidad inherente de los ecosistemas terrestres tropicales y sus retroalimentaciones con el sistema Tierra, PANGEA adopta un enfoque integrado y transdisciplinario a través de cinco temas científicos introducidos en la Sección 1.1: Ciclos biogeoquímicos, Biodiversidad, Interacciones y retroalimentaciones climáticas, Sistemas socioecológicos y Dinámica de las perturbaciones. Comprender las pautas y los procesos y limitar la incertidumbre de las proyecciones futuras requiere conocimientos diversos y una colaboración coordinada. PANGEA tiende puentes entre disciplinas y formas de conocimiento para coproducir ciencia que aborde lagunas de conocimiento específicas y respalde aplicaciones urgentemente necesarias.

En esta sección, analizamos el estado actual de la ciencia por áreas temáticas. En la Sección 3, presentamos las preguntas científicas integradas de PANGEA en respuesta a las lagunas de conocimiento relacionadas con patrones, procesos y proyecciones futuras en todos los temas científicos. La Sección 4 describe cómo el tratamiento de estas cuestiones producirá importantes avances científicos. (Véase el Apéndice G para los temas que exceden el ámbito de PANGEA).

2.1 Ciclos biogeoquímicos

Este Tema Científico de PANGEA investigará los patrones de variabilidad espacial y temporal de las reservas y flujos de carbono -incluidas las interacciones con otros ciclos biogeoquímicos-, así como los procesos que controlan los cambios heterogéneos, proporcionando información que mejorará las proyecciones futuras.

Intercambio neto de dióxido de carbono en la biosfera tropical: El dióxido de carbono atmosférico (CO₂) es un gas de efecto invernadero (GEI) que tiene un gran impacto en el sistema climático mundial. La

biosfera terrestre es un gran sumidero de CO₂ atmosférico, con un intercambio biosférico neto (NBE) global actual estimado en 3,3 Pg anuales⁻¹, que compensa ~30% del CO₂ emitido anualmente por los combustibles fósiles (Friedlingstein et al., 2023). NBE se refiere al balance total de CO₂ intercambiado entre un ecosistema y la atmósfera. Los ecosistemas terrestres tropicales aportan hasta 0,6±0,4 PgC yr⁻¹ de este sumidero (Friedlingstein et al., 2023) y contribuyen en gran medida a la variabilidad interanual del CO₂ atmosférico global (Friedlingstein et al., 2023). En las últimas tres décadas, la deforestación tropical ha anulado aproximadamente dos tercios de los beneficios derivados del sumidero forestal mundial (2,2±0,5 Pg C yr⁻¹, 1990-2019; Pan et al., 2024). Las diferencias en la eficacia del sumidero de carbono de los bosques tropicales dentro de cada continente y entre continentes son evidentes. Investigaciones anteriores indicaron que, entre 2001 y 2019, la región amazónica (5,14 millones de km²) fue un sumidero neto de carbono débil (-0,03 Pg C yr⁻¹), con una absorción bruta (-0,4 Pg C yr⁻¹) y emisiones brutas (0,3 Pg C yr⁻¹). Esto es casi un orden de magnitud mayor que el sumidero neto. La biomasa viva de la Amazonia brasileña por sí sola fue una fuente neta de carbono (0,06 Pg C yr⁻¹; Harris et al., 2021). Por el contrario, la más pequeña cuenca africana del Congo (2,98 millones de km²) fue un sumidero de carbono considerablemente mayor (-0,17 Pg C yr⁻¹) que los bosques amazónicos a pesar de tener tasas brutas de absorción similares (-0,3 Pg C yr⁻¹). La magnitud de las emisiones brutas en la cuenca del Congo (0,14 Pg C yr⁻¹) fue aproximadamente la mitad de las emisiones en el Amazonas (Harris et al., 2021).

Comprender los mecanismos que impulsan las diferencias en los flujos de carbono entre las regiones forestales tropicales para cuantificar la distribución espacio temporal de los flujos de carbono y su papel en los ciclos globales del carbono, es una prioridad de investigación.

Metano: El metano atmosférico (CH₄) es 25 veces más potente como GEI que el CO₂ y se calcula que contribuye en un 30% al aumento del forzamiento radiativo derivado de las emisiones antropogénicas (Masson-Delmotte et al., 2021). Los trópicos contribuyen con aproximadamente el 65% del total (antropogénico + natural) de las emisiones globales de CH₄ a la atmósfera (364 Tg CH₄ año⁻¹) (Saunois et al., 2024). Alrededor del 40% de las emisiones totales de CH₄ de los trópicos proceden de fuentes de humedales, llanuras aluviales y ecosistemas interiores de agua dulce (151 Tg CH₄ yr⁻¹), lo que representa aproximadamente el 20% del presupuesto global total de CH₄ y es responsable de la variabilidad interanual en la tasa de crecimiento global del CH₄ atmosférico (Feng et al., 2022; Saunois et al., 2024). Las recientes tasas de crecimiento de CH₄ en la atmósfera han aumentado de forma incoherente con nuestra comprensión actual de las fuentes y sumideros globales de CH₄ (Turner et al., 2019). PANGEA explorará el ciclo de CH₄ a través de los trópicos para desarrollar modelos mejorados y comprensión para contribuir a las opciones de gestión.

Mediciones de CO derivadas de satélites₂ y CH₄ : El intercambio neto de la biosfera (NBE) sobre América del Sur tropical demostró una recuperación del carbono más lenta de lo esperado tras El Niño 2015/2016, posiblemente debido al aumento de la aridez y el déficit hídrico (Liu et al., 2024a). Las señales a partir de 2009 indican un sumidero de carbono persistente en la cuenca del Congo que contrasta con las grandes fuentes de emisiones en las partes occidental y oriental de África tropical (Palmer et al., 2019). Dado el impacto global del aumento de los GEI y las incertidumbres de las mediciones recientes, PANGEA utilizará sensores avanzados y las mediciones mejoradas de CO₂ (XCO₂) y CH₄ (XCH₄) integradas en la columna derivadas de satélites y utilizadas en modelos atmosféricos inversos para restringir los presupuestos tropicales de CO₂ y CH₄ (por ejemplo, Liu et al., 2016; Lunt et al., 2019; Crowell et al., 2019; Palmer et al., 2019; Yang et al., 2021a; Liu et al., 2020; Gaubert et al., 2023; Wang et al., 2023c; Liu et al., 2024a; Byrne et al., 2024). El reciente proyecto de intercomparación de modelos (MIP) OCO- 2, basado en 14 modelos, mostró fuentes netas de carbono sobre la Amazonía nororiental y el norte de África tropical, contrastadas con sumideros netos de carbono sobre la Amazonía occidental y la cuenca del Congo (Byrne et al., 2023). Las emisiones de los humedales tropicales de CH₄ estimadas utilizando recuperaciones satelitales de XCH₄ de GOSAT y TROPOMI (p. ej., Parker et al., 2018; Ma et al., 2021; Feng et al., 2022; Yu et al., 2023) sugieren

que las emisiones acuáticas y de humedales tropicales se han subestimado en comparación con los inventarios terrestres de CH₄ (Yu et al., 2023), aunque la prevalencia de la nubosidad inhibe las recuperaciones satelitales (Ganesan et al., 2019; Melack et al., 2022). Con el rápido avance de las capacidades de detección de emisiones de fuentes puntuales de metano utilizando datos hiperespectrales ya disponibles (Hulley et al., 2016; Růžička et al., 2023), PANGEA investigará la capacidad de detectar emisiones naturales de metano utilizando estos u otros sensores de mayor fidelidad.

Necesidades de validación: Los resultados de inversión de CO basados en satélites² son inconsistentes en los trópicos. Por ejemplo, los resultados de la inversión atmosférica de GOSAT y OCO-2 mostraron sistemáticamente una fuente significativa de carbono en el norte de África tropical (Palmer et al., 2019), impulsada por las emisiones de carbono durante la estación seca, cuando estos satélites tienen una cobertura más consistente de la región libre de nubes. Por otro lado, un estudio reciente que combina cuatro casos de mediciones de CO por avión² con inversiones basadas en satélites sugiere que el norte de África tropical es casi neutro en carbono (Gaubert et al., 2023). Estos resultados contradictorios subrayan la urgente necesidad de realizar más investigaciones para resolver estas discrepancias.

Nuevos datos procedentes de satélites: Las observaciones de los satélites OCO-2/3 y GOSAT han aportado nuevos conocimientos sobre los ciclos estacionales y la variabilidad interanual del ciclo tropical del carbono (Lei et al., 2024; Philip et al., 2022; Liu et al., 2017; 2024; Wang et al., 2023b). Curiosamente, el ciclo estacional del NBE sobre los trópicos, inferido a partir del OCO-2, exhibe una amplitud mucho mayor que la simulada por los modelos biogeoquímicos más avanzados. Este resultado sugiere que la biosfera terrestre tropical responde a las variaciones climáticas estacionales de forma más dinámica de lo que se creía hasta ahora (Lei et al., 2024; Philip et al., 2020). Las observaciones por satélite también han mejorado enormemente la comprensión a nivel de proceso de la respuesta del ciclo tropical del carbono a la variabilidad climática interanual (Liu et al., 2017; 2024; Wang et al., 2023b). Por ejemplo, Wang et al. (2023b) mostraron que la variabilidad en el almacenamiento total de agua impulsó la heterogeneidad espacial de la respuesta del ciclo del carbono de la Amazonía a la sequía de 2015-2016, mientras que la temperatura desempeñó un papel más importante a la hora de influir en la variabilidad del flujo de carbono en toda la región tropical. Un estudio publicado recientemente (Stinecipher et al., 2022) mostró que las observaciones satelitales del sulfuro de carbonilo (COS) proporcionan una restricción de la GPP regional de la Amazonía consistente con otras medidas, lo que sugiere que la cuantificación refinada de los flujos de este gas tanto a escala local como regional puede mejorar las estimaciones de la GPP (Berry et al., 2013).

Carbono en la biomasa vegetal viva: Los bosques tropicales almacenan casi el 50% de la biomasa vegetal aérea total de los ecosistemas terrestres (Santoro et al., 2021). La cantidad y el procesamiento del carbono en la biomasa vienen determinados por la productividad primaria neta, que equilibra la absorción de CO₂ y su emisión por parte de las plantas y algunos microorganismos (Bonan 2008). Para comprender el impacto del cambio climático y de uso del suelo en los bosques tropicales es esencial cuantificar la estructura y función de los bosques tropicales y las interacciones entre las plantas y el carbono de la atmósfera. La biomasa viva y la productividad varían enormemente en el espacio y el tiempo en los bosques tropicales (Sullivan et al., 2020; Xu et al., 2021a; Muller-Landau et al., 2021; Wang et al., 2023a, Sagang et al., 2024a). Las regiones con precipitaciones elevadas suelen albergar bosques densos de hoja perenne con grandes reservas de carbono y elevadas reservas de productividad, mientras que las zonas con precipitaciones estacionales o inferiores albergan bosques parcial o totalmente caducifolios con menores reservas de carbono y productividad, y más variación estacional en los flujos de carbono (Malhi et al., 2002; Bonan 2008; Muller-Landau et al., 2021). La temperatura también afecta al ciclo del carbono forestal, tanto directamente como a través de interacciones con la disponibilidad de agua (Taylor et al., 2017; Muller-Landau et al., 2021). Las diferencias en la geomorfología, el clima, la composición de las especies y la fenología en los trópicos y dentro de las regiones tropicales generan variaciones en las tasas de fotosíntesis, productividad leñosa, respiración, mortalidad de los árboles y flujo de carbono en los bosques tropicales.

(Sullivan et al., 2020; Muller-Landau et al., 2021; Wang et al., 2023a; Townsend et al., 2008; Quesada et al., 2010). La productividad primaria neta suele aumentar con la fertilidad del suelo (Quesada et al., 2012), aunque no existen relaciones consistentes entre la fertilidad del suelo y la biomasa viva, probablemente porque la rotación aumenta y el tiempo de residencia leñosa disminuye con la fertilidad del suelo (Muller Landau et al., 2021). Lamentablemente, los estudios sobre la biomasa y la dinámica del carbono basados en mediciones del suelo representan una fracción minúscula de la superficie forestal tropical, un subconjunto pequeño y sesgado de los paisajes tropicales, lo que suscita dudas sobre la generalizabilidad de estos hallazgos (Malhi et al., 2014; Marvin et al., 2014; Schimel et al., 2019; Hughes et al., 2021; Chapman et al., 2024). Los regímenes de perturbación también desempeñan un papel crucial en la configuración de la dinámica de los bosques tropicales, influyendo en la mortalidad de los árboles, la rotación de la biomasa y el ciclo del carbono, que se detalla con más detalle en la Sección 2.5.

Humedales tropicales: Uno de los principales contribuyentes al ciclo global del carbono son las grandes extensiones de bosques tropicales que son humedales inundados permanente o estacionalmente, entre los que se incluyen turberas arboladas, pantanos y llanuras aluviales (Aselmann y Crutzen, 1989). Por ejemplo, los bosques de las llanuras aluviales del río Amazonas cubren hasta 250.000 km² y la mayoría de las zonas están inundadas seis meses al año (Richey et al., 2002; Goulding et al., 2003). La llanura aluvial amazónica representa la mayor fuente natural de emisión de CH₄ en los trópicos y rivaliza con las fuentes de CH₄ del Ártico (Pangala et al., 2017). Además de la importante fuente ebullitiva de CH₄ procedente del suelo inundado, los tallos de los árboles de la llanura aluvial amazónica contribuyen con emisiones de CH₄ que se estima que son 200 veces mayores que las de los bosques húmedos templados (Pangala et al., 2017). El número de mediciones y la extensión de la cobertura de los flujos de CH₄ en los trópicos son extremadamente limitados en comparación con los de las regiones templadas y boreales (Johnson et al., 2022; Melack et al., 2022; Stanley et al., 2023). Las emisiones de CH₄ de los humedales de los bosques tropicales están controladas por el clima, la hidrología, la cubierta vegetal, la dinámica de las perturbaciones y las prácticas de uso de la tierra (Parker et al., 2018; Ma et al., 2021). La falta de mediciones del flujo de carbono en los humedales ha llevado a una cuantificación deficiente de las emisiones de CH₄ de los humedales tropicales y de los sistemas de aguas continentales (Ganesan et al., 2019; Rosentreter et al., 2021). Los modelos mecanicistas existentes han producido grandes diferencias en las emisiones tropicales de CH₄ (Melton et al., 2013; Bloom et al., 2017) y no captan la estacionalidad observada del CH₄ en regiones tropicales dominadas por humedales boscosos (Melack et al., 2022). Gran parte de esta diferencia se debe a la falta de mediciones a escala fina que detallen los factores que impulsan las emisiones acuáticas y de los humedales (Melack et al., 2022) y a la triple diferencia en la cobertura de los humedales y las extensiones de inundación aplicadas en los modelos individuales (Peng et al., 2022).

Turberas tropicales: Las turberas tropicales ricas en materia orgánica almacenan las reservas de carbono más grandes y de mayor densidad que son irrecuperables en las escalas temporales de toma de decisiones humanas (Noon et al., 2021). Las turberas tropicales almacenan aproximadamente 100 Pg de C, pero existen grandes incertidumbres en cuanto a la extensión espacial y las reservas de carbono asociadas de estas turberas. Por ejemplo, las extensas reservas de carbono de las turberas de la cuenca central del Congo y de la cuenca del Pastaza-Marañón en la Amazonia peruana han sido cartografiadas recientemente y representan más de un tercio del carbono almacenado en turberas tropicales (Dargie et al., 2017; Crezee et al., 2022; Lahteenoja et al, 2012). Es probable que queden por evaluar importantes zonas de turberas sin documentar (Hastie et al., 2024). El cambio en el uso del suelo, a través de la deforestación o el drenaje, y el cambio climático amenazan la capacidad de sumidero de carbono de las turberas tropicales (Page et al., 2022; Wang et al., 2018). En el sudeste asiático, el drenaje extensivo de las turberas las ha convertido en una fuente de CO₂ equiparable a las emisiones regionales de combustibles fósiles (Hoyt et al., 2020). Los incendios cada vez más extensos e intensos en las turberas, sobre todo en Asia ecuatorial y durante los años de El Niño, también se han convertido en una fuente importante de emisiones de carbono, otros

gases traza y partículas a la atmósfera (Page et al., 2009; Yokelson et al., 2022). Dado que las perturbaciones antropogénicas siguen amenazando las turberas tropicales (Hastie et al., 2022; Page et al., 2022), es necesario comprender mejor la distribución, la densidad de las reservas de carbono y las emisiones de las turberas tropicales (Roucoux et al., 2017; Deshmukh et al., 2021).

Ciclo de los nutrientes: La proyección de la productividad futura de los bosques tropicales depende de la comprensión de las interacciones entre la disponibilidad de nutrientes de los suelos, la composición funcional de las plantas y el impacto del aumento de la temperatura, las concentraciones de CO₂ y los fenómenos extremos. Se espera que la baja disponibilidad de nutrientes en los suelos tropicales muy erosionados limite la fertilización con CO₂, ya que los tejidos vegetales retienen más nutrientes (Fleischer y Terrer, 2022). Es probable que el fósforo limite el potencial de respuestas de mayor tasa de crecimiento forestal al aumento de CO₂ en aproximadamente la mitad (Fleischer et al., 2019; Braghieri et al., 2022). Aunque se supone que el fósforo es el nutriente más limitante en los bosques tropicales de tierras bajas (por ejemplo, Cunha et al., 2022), observaciones recientes revelan la heterogeneidad de la limitación de nutrientes en los bosques tropicales, incluyendo la limitación y co-limitación por nitrógeno, fósforo, potasio y calcio (Davidson et al., 2004; Wright et al., 2011; Manu et al., 2022). El potasio desempeña un papel fundamental en la regulación de las respuestas de las plantas a la sequía (Manu et al., 2024). El cambio en el uso de la tierra puede inducir aún más la limitación de nutrientes al desplazar grandes cantidades de nutrientes (Bauters et al., 2022; 2018; 2021; Kauffman et al., 1995), lo que conduce a una redistribución y pérdidas locales de nutrientes. La teledetección ofrece oportunidades para capturar el impacto de los suministros de nutrientes disponibles y las pérdidas de nutrientes de los eventos de perturbación a través de observaciones de las variaciones en la química foliar, los rasgos funcionales y la estructura del dosel a través de grandes escalas (Townsend et al., 2008; Chadwick y Asner 2016b; 2018; Martins et al., 2018).

2.2 Biodiversidad

Este tema científico de PANGEA investigará cómo la biodiversidad tropical varía espacial y temporalmente a escala local, regional y continental, cómo la biodiversidad configura la función de los ecosistemas y responde al cambio climático y antropogénico, y cómo contribuye de este modo a la heterogeneidad en la resiliencia de los bosques, y retroalimenta el clima global y los sistemas socioecológicos.

Biodiversidad tropical: La biodiversidad es la variabilidad entre todos los organismos vivos y ecosistemas, incluyendo la diversidad taxonómica, filogenética, funcional y genética dentro y entre las especies, así como dentro y entre los sitios. Los bosques tropicales son los biomas más biodiversos de la Tierra según todas estas medidas y albergan más de la mitad de las especies descritas de la Tierra (Lewis et al., 2015; Barlow et al., 2018; Dinerstein et al., 2017; Pillay et al., 2022). El elevado número total de especies que se encuentran en los bosques tropicales (alta diversidad gamma) refleja tanto un extraordinario número de especies dentro de los sitios (diversidad alfa), como un sustancial recambio de especies entre los sitios (diversidad beta) (Condit et al., 2002; Basset et al., 2012; Jenkins et al., 2013; Slik et al., 2015). A escalas pequeñas, la variación composicional entre sitios de la biodiversidad vegetal refleja en gran medida el filtrado ambiental y la estocasticidad (Condit et al., 2002; Fyllas et al., 2009; Condit et al., 2013; Asner et al., 2014a; Chadwick y Asner 2018). Las divergentes historias evolutivas de los distintos continentes tropicales han dado lugar a conjuntos de especies y composiciones filogenéticas muy diferentes (Slik et al., 2018; **Figura 12**). La alta diversidad taxonómica y filogenética de los bosques tropicales va acompañada de una alta diversidad funcional, con especies que muestran una amplia gama de estrategias de historia de vida, rasgos funcionales y respuestas ambientales (Fyllas et al., 2009; Condit et al., 2013; Slot y Winter 2017; Rüger et al., 2018; Homeier et al., 2021; Bialic-Murphy et al., 2024).

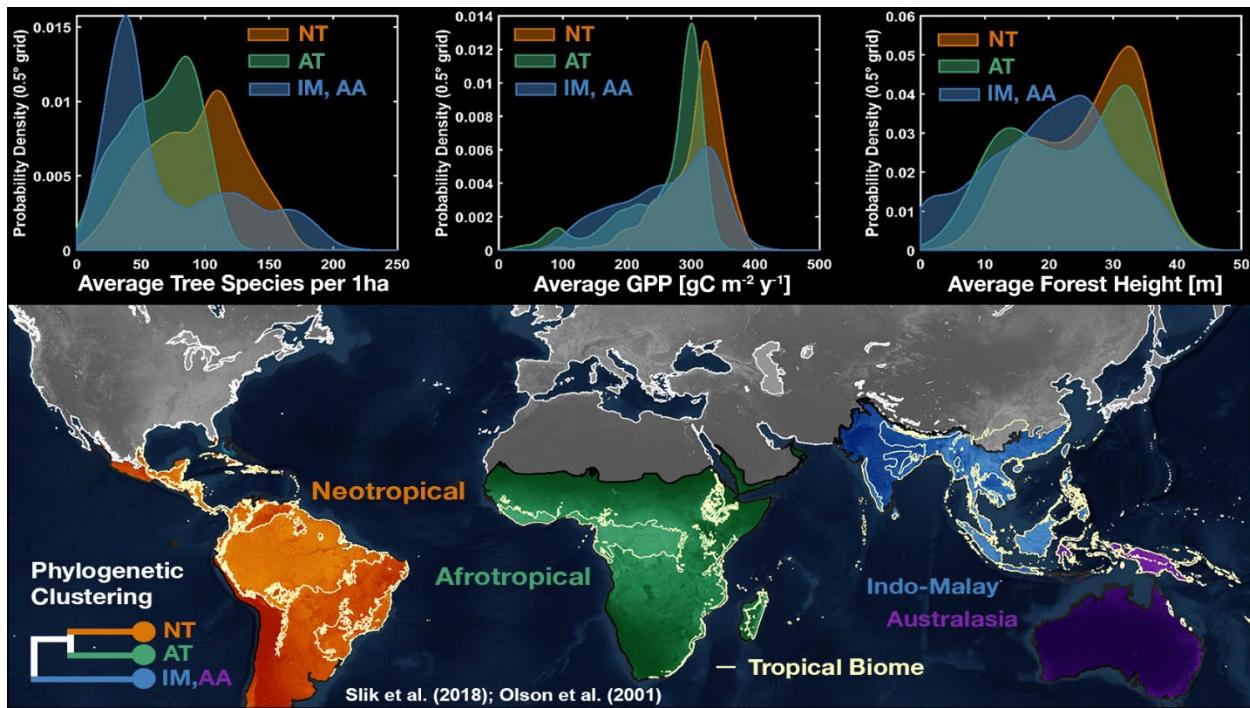


Figura 12. Bosques tropicales Los bosques tropicales varían fuertemente en estructura (altura), función (GPP) y diversidad dentro y entre las principales regiones florísticas (colores cartografiados), dando forma a las respuestas al cambio climático y de uso de la tierra. El brillo de cada color indica el GPP cartografiado. Fuente: Cavender-Bares et al. (2022).

Diversidad funcional, estructural y de especies: La biodiversidad tropical es de importancia crítica para el funcionamiento de los ecosistemas tropicales y sus retroalimentaciones al sistema terrestre (Cardinale et al., 2012; Dirzo et al., 2014; Sakschewski et al., 2016; Berzaghi et al., 2018; Schmitt et al., 2020). Qué especies están presentes en un área, y sus rasgos y abundancias, afectan a la estructura, la función, la resiliencia y las interacciones de los bosques con el clima local y global y los sistemas socioecológicos (por ejemplo, Dirzo et al., 2014; Del-Claro y Dirzo 2021). La amplia variación en la estructura y función de los ecosistemas entre los bosques tropicales está estrechamente vinculada a la variación en la biodiversidad, reflejando no sólo las influencias de los factores ambientales abióticos en la biodiversidad, estructura y función, sino también sus complejas interacciones (Muller-Landau et al., 2021). La composición funcional y por especies de las plantas leñosas, que comprenden la mayor parte de la biomasa aérea, es particularmente importante en la conformación de la estructura y función del bosque,

que, a su vez, afecta a los microclimas, el hábitat y los recursos alimentarios para animales y microbios. Comprender las interacciones entre las dinámicas funcionales, estructurales, de diversidad de especies y del ciclo del carbono es fundamental dadas las incertidumbres que rodean a si los bosques tropicales sobrevivirán o no y seguirán siendo un sumidero de carbono a lo largo del siglo XXI (Arora et al., 2020; Brienen et al., 2015; Hubau et al., 2020; Sabatini et al., 2019). Una biodiversidad funcional elevada crea una mayor estabilidad y resiliencia de los ecosistemas que puede ayudar a mitigar los efectos negativos del cambio climático (Sakschewski et al., 2016; Longo et al., 2018; Schmitt et al., 2020). Los regímenes climáticos cambiantes podrían reducir la biodiversidad que podría retroalimentar el clima a través de una

menor captura de carbono (Thomas et al., 2004; Cavanaugh et al., 2014). En una revisión de 258 estudios sobre comunidades reunidas de forma natural, van der Plas (2019) descubrió que, aunque la mayoría de los estudios se centraban en los efectos de la diversidad taxonómica, las métricas de la diversidad funcional eran en general predictores más sólidos del funcionamiento de los ecosistemas. Aunque los trópicos albergan una inmensa diversidad de especies botánicas, la abundancia de la mayoría de las especies es baja. Los datos de las parcelas de inventario forestal revelan que sólo el 2% de las especies de América (174 especies), África (77 especies) y el Sudeste Asiático (172 especies) representan el 50% de los árboles tropicales de esos continentes (Cooper et al., 2024). La caracterización de la diversidad funcional de estas especies hiperdominantes y sus interacciones con otros taxones es factible y entra dentro del ámbito de PANGEA.

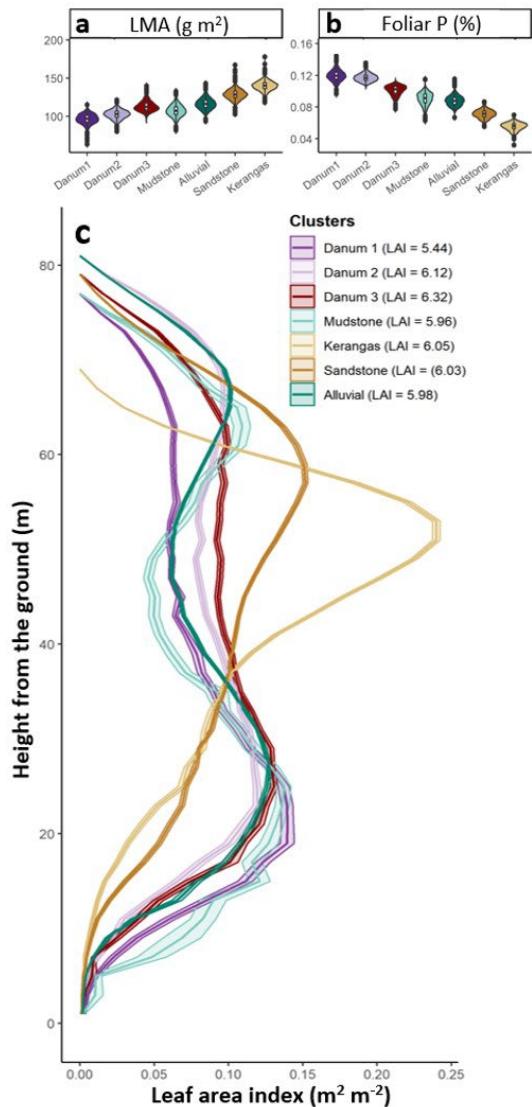


Figura 13. Variación de la masa foliar por área (LMA) Variación de la masa foliar por área (LMA), fósforo foliar (P) e índice de área foliar vertical (LAI) en siete tipos de bosque funcionalmente distintos cartografiados mediante datos aéreos VSWIR y lidar en bosques tropicales de Malasia (Ordway et al., 2022).

Variabilidad de los rasgos de las plantas leñosas y compensaciones: La distribución de los rasgos funcionales de las plantas leñosas es una manifestación importante de la biodiversidad tropical que afecta a la estructura y función de los bosques (Li y Prentice, 2024). Las covariaciones importantes entre los rasgos incluyen la estatura, los ejes rápido-lento de la historia de vida de la planta y las estrategias de autosustentación frente a las de trepa para alcanzar el dosel. La estatura adulta varía desde pequeños arbustos hasta árboles emergentes gigantes por encima del dosel principal (Rüger et al., 2018; Maynard et al., 2022). La estructura vertical del bosque varía con la función del ecosistema incluso cuando las métricas integradas verticalmente, como el índice de área foliar (LAI), no lo hacen (**Figura 13**) (Ordway et al., 2022). El eje rápido-lento se refiere a especies vegetales con rápida adquisición y procesamiento de recursos (especialmente en términos de eficiencia en el uso de nutrientes), crecimiento rápido, altas necesidades de recursos, altas tasas de mortalidad y baja tolerancia a la sombra, en contraste con especies con adquisición y procesamiento lento de recursos, crecimiento lento, bajas

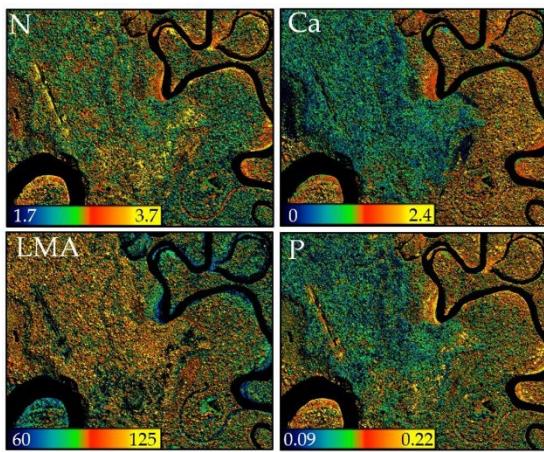


Figura 14. Variación a escala de paisaje en nitrógeno (N), calcio (Ca), masa foliar por área (LMA) y fósforo (P) en la Amazonía peruana. Ejemplo de mapas de rasgos creados a partir de datos de espectroscopía de imágenes VSWIR de (Chadwick & Asner, 2016). No existen datos de este tipo para África Central.

necesidades de recursos, bajas tasas de mortalidad y alta tolerancia a la sombra (Reich 2014; Rüger et al., 2018). Por lo tanto, la variación en la composición funcional entre ecosistemas se relaciona con el estado sucesional del bosque, la productividad leñosa y el tiempo de residencia leñosa. Investigaciones previas han demostrado que las distribuciones de rasgos asociados con la madera, las hojas y la reproducción pueden ser casi ortogonales entre especies forestales tropicales (Baraloto et al., 2010; Fortunel et al., 2012). Sin embargo, el eje rápido-lento aún abarca la variación en rasgos foliares como la masa foliar por área (LMA) y el contenido de nutrientes foliares (por ejemplo, nitrógeno, fósforo y calcio). El contenido de nutrientes de la hoja y la LMA se pueden captar con teledetección hiperespectral, lo que permite la cuantificación remota de esta dimensión de la composición funcional de la planta (**Figura 14**) (Asner et al., 2017; Chadwick y Asner 2016a). Trabajos recientes también han explorado la diversidad funcional y las tendencias de redundancia en los bosques tropicales mediante imágenes multiespectrales (Aguirre-Gutiérrez et al., 2022).

Lianas, palmeras y bambúes: Aunque gran parte de la investigación sobre los bosques tropicales se centra en los árboles, otras formas de vida vegetal como las lianas, las palmeras y los bambúes tienen un impacto significativo en el funcionamiento de los ecosistemas, la sucesión y la respuesta a las perturbaciones. Por ejemplo, las lianas (enredaderas leñosas) son parásitos estructurales que reducen el crecimiento de los árboles y aumentan su mortalidad por competencia, alterando así la estructura y función del bosque y las reservas de carbono (van der Heijden et al., 2013; Muller-Landau y Pacala 2020; Estrada-Villegas et al., 2022). La abundancia de lianas varía ampliamente entre los bosques tropicales en relación con el clima, el historial de perturbaciones y otros factores (Dewalt et al., 2015), y está aumentando en promedio (Phillips et al., 2002; Schnitzer y Bongers 2011, Rueda-Trujillo et al., 2024). Investigaciones anteriores sugieren que las lianas pueden ser vulnerables a las sequías (Nepstad et al., 2007; Meunier et al., 2021) y se ven favorecidas por el aumento de las tasas de perturbación (Schnitzer y Bongers 2011, Schnitzer et al., 2021), mientras que el aumento del crecimiento de los árboles se ha relacionado con el aumento de las concentraciones atmosféricas de CO₂ (Phillips et al., 2009, Brien et al., 2015). Las palmeras son un clado abundante en los bosques húmedos tropicales (ter Steege et al., 2013), y varias especies son cultural y económicamente relevantes (Laureto y Cianciaruso 2017). La distribución de las palmeras en los bosques tropicales depende en gran medida de las condiciones climáticas y edáficas (Emilio et al., 2014; Muscarella et al., 2020). La alta resistencia de las palmeras a los daños causados por el viento en tormentas tropicales afecta a la recuperación de los bosques tras la perturbación (Uriarte et al., 2019; Zhang et al., 2022). Las diferencias intercontinentales en la abundancia de palmeras son marcadas, siendo las palmeras arbóreas omnipresentes en las Américas, mientras que son raras en comparación con las palmeras del sotobosque y trepadoras de árboles en África (Muscarella et al., 2020). Los bambúes son hierbas altas que se dan en una amplia gama de hábitats en los trópicos (Fadrique et al., 2020). Sus rápidas tasas de crecimiento, combinadas con la reproducción clonal, permiten a los bambúes dominar grandes extensiones de tierra, lo que puede detener la sucesión forestal y disminuir significativamente la acumulación de carbono en los bosques (Griscom y Ashton 2003; Lima et al., 2012), y también pueden convertirse en invasoras allí donde

se introducen (Montti et al., 2014). Los bambúes se cosechan de forma extensiva en los bosques tropicales por motivos económicos, lo que puede afectar a la fauna local que depende de los bosques de bambú para alimentarse (Sheil et al., 2012). Las lianas, las palmeras y los bambúes difieren de los árboles en los rasgos de sus hojas y la arquitectura de sus plantas, lo que permite cuantificar su abundancia con teledetección multiespectral, hiperespectral y lidar (de Carvalho et al., 2013; Dalagnol et al., 2022; van der Heijden et al., 2022).

Fenología foliar: Las plantas tropicales muestran diversas estrategias fenológicas foliares, desde perennifolias hasta caducifolias, con variaciones en la duración, el momento, la completitud de la caducifolia y si ésta es obligatoria o facultativa (Borchert, 1994; Eamus, 1999; Kushwaha y Singh, 2005; Williams et al., 2008; Kearsley et al., 2024). La alta demanda de carbono necesaria para el brote de nuevas hojas significa que la mayoría de las especies caducifolias de sequía en los trópicos tienen hojas más delgadas para reducir los costes de construcción, y una alta demanda de nutrientes para aumentar la capacidad fotosintética en estaciones de crecimiento más cortas (Eamus y Prior, 2001; Oliveira et al., 2021a). La duración de la hoja y el momento estacional de la producción de hojas también son factores importantes en todas las especies de hoja perenne y brevi-decidua, con implicaciones para la variación estacional en la calidad de la hoja y la capacidad fotosintética (Wu et al., 2016; Lopes et al., 2016; Wu et al., 2017a,b; Albert et al., 2018). La abundancia relativa de diferentes estrategias fenológicas varía sistemáticamente entre los bosques tropicales en relación con el clima, la geomorfología, los suelos y otros factores (Condit et al., 2000) y contribuye de manera importante a la fuerte variación a nivel de rodal en la fenología foliar y reproductiva entre sitios (Bohlman, 2010; Guan et al., 2015; Fisher et al., 2020; Fadrique et al., 2021; Yang et al., 2021b). La fenología de la hoja también varía sustancialmente entre años dentro de los sitios, contribuyendo a la variación interanual en la función forestal (Pau et al., 2010; Detto et al., 2018; Lamjiak et al., 2021). Los impulsores climáticos de la fenología foliar incluyen la disponibilidad de agua y la luz. Muchos árboles, especies y rodales tropicales reverdecen en las épocas del año en que reciben más luz (menos nubes), incluso cuando más luz va acompañada de condiciones más secas (Wright y van Schaik, 1994; Lopes et al., 2016; Wagner et al., 2017; Li et al., 2021). Los cambios climáticos a largo plazo, especialmente en zonas donde las estaciones secas se están alargando, pueden aumentar la ventaja competitiva y la abundancia de las especies caducifolias de sequía (Vico et al., 2017; Aguirre-Gutiérrez, 2019).

Animales y microbios: Los animales y los microbios también impulsan la función de los ecosistemas y se ven influidos por el cambio ambiental global de forma decisiva. Los animales y los microbios contribuyen a servicios esenciales como la polinización, la dispersión de semillas y el ciclo de nutrientes, y dan forma a la biodiversidad vegetal y a la estructura y función de los bosques a través de estas interacciones mutualistas. Las interacciones entre plantas y animales también pueden ser antagónicas, por ejemplo a través de la herbivoría y las enfermedades (Dirzo et al., 2014). La megafauna, como los elefantes de bosque (*Loxodonta cyclotis*) -que hoy se encuentran en África, pero no en América-, tiene efectos especialmente importantes en la estructura y función de los bosques debido al ramoneo y a las alteraciones físicas. Los elefantes también ayudan a la redistribución de nutrientes y la dispersión de semillas grandes, lo que resulta en una mayor abundancia de especies arbóreas de alta densidad de madera en todo el paisaje (Berzaghi et al., 2018; 2019; Campos-Arceiz y Blake, 2011). Se ha demostrado que los cercados experimentales para vertebrados aumentan la densidad de plantas del sotobosque y la abundancia de plántulas (Beck et al., 2013a; Camargo-Sanabria et al., 2015; Kurten y Carson, 2015). Una gran mayoría de las especies de árboles tropicales y aproximadamente la mitad de las especies de lianas (enredaderas leñosas) dependen de los vertebrados para la dispersión de semillas, y la mayoría de las especies restantes dependen del viento (Muller-Landau y Hardesty 2005). Por tanto, la deforestación de los bosques tropicales a causa de la caza y otras actividades humanas amenaza directamente la regeneración de las plantas y puede alterar la composición de las especies vegetales y la dinámica del ciclo del carbono (Wunderly, 1997; Estrada-

Villegas et al., 2023). La defaunación puede conducir, en última instancia, a una disminución de las reservas forestales de carbono (Brodie y Gibbs, 2009; Jansen et al., 2010; Bello et al., 2015; Osturi et al., 2016; Peres et al., 2016). Entre los sitios de Panamá, por ejemplo, el aumento de la defaunación se asoció con cambios en la composición de la comunidad de especies en la capa de plántulas, incluyendo más especies dispersadas por el viento y el agua y más lianas (Wright et al., 2007; Kurten et al., 2015).

2.3 Interacciones y retroalimentaciones climáticas

Este tema científico de PANGEA investigará las complejas retroalimentaciones e interacciones entre los bosques tropicales y el sistema climático, así como el modo en que los cambios en estos procesos influirán en la futura dinámica de los sumideros/fuentes de carbono de los bosques tropicales.

Interacciones tierra-atmósfera: Las interacciones tierra-atmósfera de los bosques tropicales modulan el tiempo y el clima tanto a escala local como regional. Las plantas reciclan las precipitaciones mediante la evapotranspiración e influyen en el inicio y el calendario de las estaciones lluviosas (Wright et al., 2017; Sori et al., 2022; Worden et al., 2021a; van der Ent et al., 2010; Staal et al., 2018; Dirmeyer et al., 2009; Zemp et al., 2017; Nyasulu et al., 2024). Mediante la emisión de compuestos orgánicos volátiles biogénicos, las plantas afectan a la formación de nubes, al albedo y a la disponibilidad de luz para la vegetación (Artaxo et al., 2022). Las copas de los árboles también regulan el albedo y los flujos de calor latente y sensible, así como la rugosidad, que impulsan las retroalimentaciones biofísicas del clima (Bonan, 2008; Chen et al., 2020; Lee et al., 2011). Además, los balances de energía y agua dependen de la humedad del suelo, controlada por las raíces, la textura del suelo y la geomorfología (Fan et al., 2017; Seneviratne et al., 2010; Zhou et al., 2021).

Efectos meteorológicos y climáticos en los bosques tropicales: Los sistemas convectivos de mesoescala aportan gran parte de las precipitaciones en África Central y el Amazonas (Andrews et al., 2024; Rehbein et al., 2017; Negrón-Juárez et al., 2024). Las tormentas, a su vez, afectan a la estructura de los bosques y a la mortalidad de los árboles a través de la acción del viento (por ejemplo, Negrón-Juárez et al., 2018; Feng et al., 2023a), y al funcionamiento de los ecosistemas, incluidos los procesos que influyen en la prevalencia de especies resistentes a las tormentas (Uriarte et al., 2019; Liu et al., 2017). Los bosques de tierras bajas se han adaptado a la sumersión y el anegamiento, ya que las precipitaciones provocan ciclos de inundación (Alsdorf et al., 2016; Hawes y Peres 2016), que pueden disminuir la disponibilidad de oxígeno, reducir la fotosíntesis y disminuir la conductancia del agua (Parolin et al., 2004; Parolin et al., 2016; Hawes y Peres 2016). Las inundaciones también provocan una mayor producción de CH₄ por parte de los microorganismos. La precipitación también afecta a los ciclos de nutrientes a través de la deposición húmeda de nutrientes como el nitrógeno (Bauters et al., 2018, 2021), la fotosíntesis y la reproducción a través de la nubosidad y la niebla (Philippon et al., 2019; Pohl et al., 2021), y la evapotranspiración a través de la deposición de rocío (por ejemplo, Gerlein-Safdi et al., 2018; Binks et al., 2019).

Impulsores de la variabilidad interanual del clima: El clima tropical se ve directamente afectado por la variación de la temperatura superficial del mar (TSM), que controla el transporte de energía a través del ecuador (Cook y Vizy 2015; Zhou et al., 2019) y afecta a los patrones de precipitación a través de cambios en la zona de convergencia intertropical (ITCZ; Schneider et al., 2014; Byrne et al., 2018), los monzones (Cook y Vizy 2019) y los sistemas dinámicos a escala regional (Cook y Vizy 2019; Creese et al., 2019; Montini et al., 2019). Fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), la Oscilación Madden-Julian, el Dipolo del Océano Índico y la Circulación Meridional de Oscilación del Atlántico se suman a la variabilidad interanual en la convección tropical (Raghavendra et al., 2020; Dias et al., 2017; Gu y Adler 2018). Las diferentes fases de estos fenómenos están fuertemente asociadas con sequías (Marengo et al., 2016;

Ndehedehe et al., 2018; Jiménez-Muñoz et al., 2016), estaciones secas más largas (Jiang et al., 2019; Staal et al., 2020) y cambios en la estación lluviosa y la intensificación de las tormentas (Taylor et al., 2018; Rehbein y Ambrizzi, 2023; Balaguru et al., 2018). Las respuestas a los cambios climáticos varían según las regiones. Los bosques africanos parecen menos vulnerables a las sequías que los bosques amazónicos (Tao et al., 2022; Asefi-Najafabady y Saatchi 2013; Saatchi et al., 2012; Bennett et al., 2021), y los bosques tropicales más húmedos muestran resiliencia a los cambios climáticos (Bennett et al., 2023), aunque aún se desconocen las consecuencias de unas condiciones más secas o variables.

Impacto de las perturbaciones antropogénicas en el tiempo y el clima: Las actividades humanas en forma de tala de bosques, agricultura, ganadería e incendios, interactúan con el cambio climático para ejercer importantes retroalimentaciones sobre los ciclos hidrológicos terrestres (Li et al., 2022; Li et al., 2024). Esto incluye cambios en la superficie, como la descarga de los ríos y las inundaciones (Ndehedehe et al., 2022; Bogning et al., 2022; Oliveira et al., 2021b), así como cambios en el desarrollo convectivo o en las condiciones dinámicas y termodinámicas de la capa límite atmosférica (Taylor et al., 2022; Commar et al., 2023; Sierra et al., 2023; Wright et al., 2017; Leite-Filho et al., 2019; Jiang et al., 2019). Los cambios en esta dinámica atmosférica conducen a cambios en la actividad de las tormentas tropicales, que ha aumentado entre un 5 % y un 25 % por década durante el último medio siglo y parece probable que continúe en el futuro (Taylor et al., 2018; Raghavendra et al., 2018; Lavigne et al., 2019; Harel y Price, 2020). Paralelamente al aumento de la actividad tormentosa, los bosques tropicales están experimentando estaciones secas más largas, un mayor estrés hídrico atmosférico y sequías más frecuentes (Fang et al., 2022; Boiser et al., 2015; Duffy et al., 2015; Trenberth et al., 2014). La deforestación y la degradación forestal aumentan el calentamiento de la superficie del suelo debido a la disminución del enfriamiento por evaporación (Devaraju et al., 2018; Li et al., 2015), y la magnitud de este efecto se ve influida por la cantidad de cubierta forestal perdida (Alkama y Cescatti, 2016). Las temperaturas más altas pueden aumentar posteriormente la respiración de los árboles, lo que reduce la NPP y cambia la forma en que los bosques tropicales ciclan el carbono (Choury et al., 2022; Das et al., 2023; Liu et al., 2017; Lloyd et al., 2023). La deforestación y la degradación pueden aumentar el caudal de los arroyos y afectar a la calidad del agua debido a los flujos de sedimentos (Levy et al., 2018), así como aumentar el flujo de calor sensible y disminuir la evapotranspiración y la infiltración (Costa et al., 2003; Souza-Filho et al., 2016; Longo et al., 2020; de Oliveira et al., 2021; Rangel-Pinagé et al., 2023). La cubierta terrestre y el cambio en el uso de la tierra pueden afectar a los patrones de precipitación al alterar la heterogeneidad de la superficie e influir en los flujos de humedad y calor aguas abajo (Mahmood et al., 2014; Snyder, 2010) y en los ciclos de nutrientes transcontinentales (Li et al., 2021; Barkley et al., 2019). Además, la quema de biomasa aporta aerosoles que afectan a la formación y la dinámica de las nubes (Liu et al., 2020; Zhang et al., 2008; Chaboureau et al., 2022; Tosca et al., 2015).

Transiciones críticas de los bosques tropicales inducidas por el clima: A medida que surgen nuevos regímenes climáticos, podrían producirse cambios de los bosques tropicales hacia ecosistemas alternativos de dosel abierto (Hirota et al., 2011; Flores et al., 2024). Sin embargo, la sensibilidad de la vegetación difiere entre los continentes tropicales, y las complejas interacciones con otros cambios, como el aumento del CO₂ atmosférico, pueden alterar la respuesta de la vegetación (Zhang et al., 2015; Bartlett et al., 2019). Por ejemplo, los bosques africanos, en particular los de África occidental, suelen estar expuestos a temperaturas más altas en comparación con los bosques tropicales relativamente más frescos y húmedos del sudeste asiático y, por lo tanto, pueden estar más adaptados al estrés térmico (Malhi et al., 2013). Sin embargo, esta adaptación puede producirse a costa de que los bosques de África Occidental funcionen más cerca de sus umbrales críticos de temperatura o hidráulicos. En última instancia, la superación de los umbrales climáticos históricos en los trópicos podría conducir a futuros cambios hacia estados de vegetación alternativos que no soporten los servicios ecosistémicos de los bosques tropicales contemporáneos (Aguirre-Gutiérrez et al., 2020; Flores et al., 2024; Nobre et al., 2016; Scheffer et al., 2001).

Efectos de retroalimentación clima-biosfera sobre los recursos de agua dulce: Los bosques tropicales de todo el planeta albergan también una extensa red de ríos y arroyos, que incluye dos de las mayores cuencas fluviales, la del Amazonas y la del Congo (Dai y Trenberth, 2002). Sin embargo, los cambios en la temperatura y el régimen de precipitaciones, junto con la expansión de la deforestación y la degradación forestal, están alterando los ciclos hidrológicos en ambas regiones. Mientras que la disminución de las precipitaciones reduce el suministro bruto de agua dulce en la parte superior de las copas de los árboles, la deforestación y la degradación forestal pueden aumentar el suministro de agua dulce a los ríos mediante la combinación de una mayor precipitación de paso y una menor evapotranspiración (Davidson et al., 2012). En el caso de la cuenca del río Amazonas, estudios anteriores indican que el efecto neto del cambio climático y la deforestación es espacialmente heterogéneo, con reducciones de la descarga fluvial en subcuenca con fuertes descensos de las precipitaciones o tasas de deforestación modestas, y aumentos en zonas muy afectadas por la deforestación (Coe et al., 2011; Lima et al., 2014; Arias et al., 2018). El cambio de los ciclos hidrológicos en los sistemas de agua dulce también afecta a la extensión y duración de las inundaciones estacionales a lo largo de las cuencas fluviales, lo que repercute aún más en los flujos de CO₂ y CH₄ (Hamilton, 2010; Alsdorf et al., 2016). Además, los cambios en la cubierta forestal tienen impactos significativos en la calidad del agua, como cambios en la concentración de nitrógeno y fósforo, el pH del agua, la disponibilidad de oxígeno y la transparencia (Neill et al., 2001; Ríos-Villamizar et al., 2017). Estos efectos, combinados con los cambios de temperatura debidos al clima y a la pérdida de la cubierta de copas, pueden afectar significativamente a los hábitats de agua dulce y a las comunidades fluviales vegetales, algales y animales (Lorion y Kennedy, 2009; Castello y Macedo, 2016; Taniwaki et al., 2017; Zeni et al., 2019).

2.4 Sistemas socioecológicos

Este tema científico de PANGEA investigará las interacciones y retroalimentaciones entre los sistemas sociales y ecológicos relacionados con la producción de alimentos y la seguridad alimentaria, las prácticas culturales, los medios de subsistencia, las estrategias de gestión y la resiliencia de los sistemas tropicales.

Sistemas socioecológicos: Para comprender plenamente la complejidad de los sistemas socioecológicos (SSE) de los bosques tropicales y cómo están siendo afectados por el cambio global, PANGEA adopta un enfoque sistémico que se centra en las retroalimentaciones e interacciones que existen entre las personas, el clima y el medio ambiente (**Figura 15**). La investigación sobre los SES ha evolucionado en las últimas décadas para comprender y modelar las relaciones entre los sistemas sociales y ecológicos y dentro de ellos, abarcando el marco de los medios de vida sostenibles (Scoones 1998), los subsistemas e interacciones de los SES (Ostrom 2009), la resiliencia de los SES (Folke 2006), la solidez en los SES (Anderies et al., 2004), sistemas humanos-naturaleza acoplados (Liu et al., 2007), sionaturaleza (Swyngedouw 1999), servicios ecosistémicos (Costanza et al., 2017; Daily et al., 1997), contribuciones de la naturaleza a las personas (Díaz et al., 2018; Pascual et al., 2017) y cobeneficios socioecológicos (Levis et al., 2024). Si bien estos marcos pueden diferir en sus definiciones (Colding y Barthel 2019), convergen en principios y variables clave que describen el sistema socioecológico, incluido un enfoque central en las interacciones y retroalimentaciones que pueden facilitar u obstaculizar el cambio en el SES. Una perspectiva de SES es particularmente importante en los trópicos, donde la tierra y los bosques están bajo alta demanda para satisfacer las necesidades de seguridad alimentaria y producción, los objetivos de conservación y biodiversidad, y apoyar los medios de vida y el desarrollo locales. Es necesario comprender los impactos sociales y ecológicos de estas compensaciones y las retroalimentaciones que las conforman

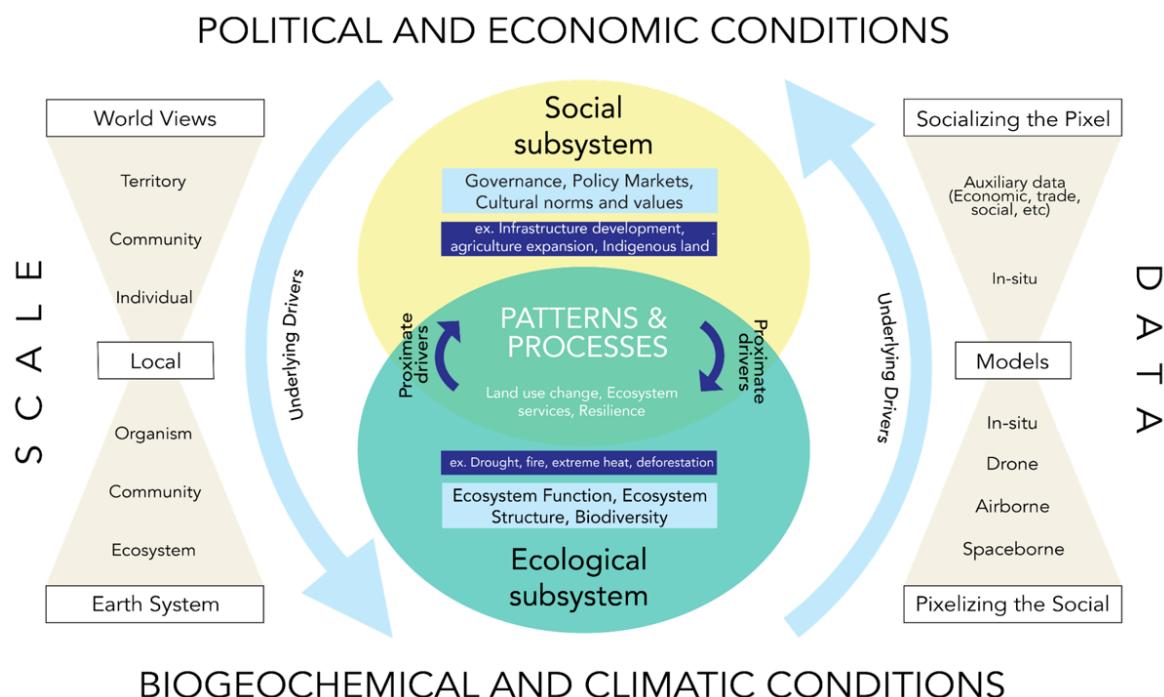


Figura 15. El enfoque de PANGEA sobre los SES vinculará los motores de cambio próximos y subyacentes en los sistemas sociales y ecológicos a través de escalas para entender cómo las interacciones en los SES impactan en la vulnerabilidad y resiliencia de los bosques tropicales.

para desarrollar una comprensión global de las fuerzas que conforman la vulnerabilidad y la resiliencia de los bosques tropicales y para orientar estrategias de adaptación y gestión eficaces y culturalmente sensibles.

Patrones e impulsores del cambio de uso de la tierra: En los trópicos, los distintos impulsores y patrones regionales del cambio de uso de la tierra, incluida la deforestación, la degradación y el rebrote forestal, tienen el potencial de afectar la resiliencia del sumidero de carbono tropical (Saatchi et al., 2021; Hubau et al., 2020). En el Amazonas y el Sudeste Asiático, la deforestación y la degradación están impulsadas principalmente por la expansión de la agricultura a gran escala basada en productos básicos para satisfacer la demanda de los mercados nacionales e internacionales (Curtis et al., 2018; Haddad et al., 2024). Concretamente, en la Amazonía el cambio de uso de la tierra está impulsado principalmente por la expansión de los pastos para el ganado y por la producción industrial de soja (Barlow et al., 2018; Londres et al., 2023). El cultivo de soja y la ganadería alteran los ciclos biogeoquímicos (por ejemplo, nitrógeno y fósforo), los regímenes hidrológicos y de incendios, y son una de las principales causas de deforestación (MapBiomas, 2023). En el Sudeste Asiático, donde las plantaciones a gran escala se están expandiendo rápidamente a expensas de los bosques primarios y las turberas, el cambio en el uso de la tierra está impulsado en gran medida por la demanda mundial de aceite de palma (Koh y Wilcove, 2008). Se calcula que en 2020 la expansión de la palma aceitera contribuirá en un 20% a las emisiones de carbono de la región (Carlson et al., 2013). Se ha demostrado que la mejora de los medios de vida de los pequeños agricultores gracias a la expansión de la palma aceitera en Indonesia produce compensaciones directas con la función de los ecosistemas (Clough et al., 2016). A diferencia de la Amazonía y el Sudeste Asiático, la mayor parte del cambio de uso de la tierra en la cuenca del Congo es a pequeña escala y está impulsado por la expansión de la agricultura de subsistencia y de cultivos básicos hiperlocales (Tyukavina et al., 2018). La persistente demanda de cacao y madera sigue determinando el cambio de uso de la tierra en África tropical, aunque el cambio de uso de la tierra a pequeña escala y basado en la subsistencia sigue desempeñando un papel preponderante en el impulso del cambio de uso de la tierra (Hosonuma et al., 2012; Kamath et al., 2024; Fuller et al., 2019). Por ejemplo, mientras que los cultivos de productos básicos como la palma aceitera se han expandido por África tropical desde la década de 1990, la expansión está vinculada a la demanda interna y la realizan pequeños agricultores y sistemas de mercado informales (Ordway et al., 2017a; Ordway et al., 2017b). Sin embargo, aún no se conoce bien el grado en que estas diferentes escalas, intensidad y formas de cambio en el uso de la tierra entre los continentes tropicales afectan a las distintas trayectorias de la biodiversidad y el ciclo del carbono.

Interacciones de retroalimentación: En los sistemas socioecológicos tropicales, la retroalimentación entre las personas y el sistema terrestre desempeña un papel fundamental en el mantenimiento de la resiliencia y la orientación de la trayectoria de estos sistemas integrados (Dearing et al., 2010). La dinámica de los sistemas socioecológicos en los bosques tropicales implica retroalimentaciones con una combinación de fuerzas próximas y subyacentes, entre las que se incluyen los incentivos basados en las políticas y/o el mercado, los marcos normativos, el acceso o las barreras a la información y los recursos, y las conexiones de larga data entre las comunidades locales, los pueblos indígenas y los ecosistemas forestales (Geist y Lambin, 2002; Lambin et al., 2003). Estos factores no sólo influyen en la dinámica ecológica, incluidos los ciclos del carbono y del agua, las interacciones entre plantas y animales y los sistemas meteorológicos y climáticos, sino también en el subsistema social (**Figura 15**), incluida la seguridad alimentaria y los medios de vida locales (Sonwa et al., 2012; Flores et al., 2024). Además, los impulsores del cambio conforman las retroalimentaciones y las interacciones entre los subsistemas social y ecológico, a través de cambios, por ejemplo, en el uso y la cobertura del suelo, la resiliencia de los ecosistemas y los regímenes de incendios (Whitfield et al., 2019; Gatti et al., 2023). Las retroalimentaciones entre los seres humanos y los bosques tropicales están estrechamente vinculadas a través de la provisión de servicios ecosistémicos y las actividades de conservación y manejo, donde, por ejemplo, la recolección de productos forestales no

maderables como semillas, hojas, frutos y raíces puede desempeñar un papel importante en el apoyo a los medios de subsistencia y las culturas de las comunidades de los bosques tropicales. Si bien estas interacciones se dan en todos los trópicos, las condiciones políticas, económicas, culturales y de gestión específicas de cada lugar influyen en la respuesta, resiliencia y adaptación de los bosques tropicales y las comunidades locales a la dinámica del cambio global (Saatchi et al., 2021; Geist y Lambin, 2002; Turner, 2014).

Impactos sobre la vulnerabilidad y la resiliencia: Las actividades humanas crean retroalimentaciones complejas entre los sistemas sociales y ecológicos, lo que da lugar a una cascada de impactos ambientales y sociales (Lambin & Meyfroidt, 2010). Una mejor comprensión no sólo de las retroalimentaciones que amplifican la vulnerabilidad, sino también de las que aumentan la resiliencia de los bosques tropicales, es esencial para desarrollar planes de gestión basados en el lugar y culturalmente sensibles que apoyen tanto la resiliencia del ecosistema como los medios de vida de la comunidad. Un ejemplo es una investigación reciente centrada en los "puntos de esperanza" socioecológicos, definidos como zonas que pueden tener un impacto significativo en la resiliencia socioecológica, donde las comunidades locales y la participación pública pueden combinarse estratégicamente con la ciencia, la ingeniería y la tecnología, incluida la teledetección, para lograr el mayor impacto posible en la conservación de la biodiversidad vulnerable (Levis, et al., 2024). Los autores destacan el ejemplo del Alto Xingu, situado en el arco de deforestación de la Amazonia brasileña, donde grupos indígenas como los Kuikuro han enriquecido la biodiversidad a través de milenios de gestión del paisaje, incluida la creación de suelos antropogénicos, la domesticación de diversos cultivos y el cultivo de bosques culturales, demostrando prácticas culturales y de gestión que promueven la resiliencia de los bosques (Levis, et al., 2024). PANGEA ofrece la oportunidad de ampliar investigaciones similares en otros lugares de los trópicos a través de la colaboración equitativa y la coproducción con las comunidades indígenas y locales para identificar prácticas que promuevan sistemas resilientes que beneficien tanto a la naturaleza como a las personas, incluidas aquellas que tienen el potencial de ser ampliadas. Se necesita mucho más trabajo para identificar métodos y prácticas culturalmente apropiados para integrar la teledetección y la ciencia indígena.

Implicaciones para el sistema socioecológico: Las regiones tropicales albergan muchas comunidades indígenas y locales cuya subsistencia está íntimamente ligada a la salud del medio ambiente que las rodea. Al comprender los ciclos de retroalimentación entre las actividades humanas y la función de los ecosistemas, las personas, tanto a escala local como global, pueden tomar decisiones más informadas sobre el uso de la tierra, la gestión de los recursos y los esfuerzos de conservación que se ajusten tanto a la resiliencia ecológica como a sus necesidades socioeconómicas (Aguiar et al., 2020). Los responsables de la toma de decisiones a nivel subnacional y nacional también pueden utilizar esta información para elaborar políticas que equilibren los objetivos de desarrollo con la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, garantizando que los beneficios de estos ecosistemas se compartan equitativamente y se mantengan para las generaciones futuras (Pörtner et al., 2021). PANGEA impulsará la investigación sobre la retroalimentación socioecológica en los trópicos para mejorar la comprensión y permitir predicciones más precisas de los impactos a largo plazo de las acciones humanas. Este trabajo es esencial para predecir las trayectorias futuras del sumidero de carbono tropical, la pérdida de especies, los cambios en los servicios ecosistémicos y la resiliencia de estos ecosistemas a las presiones externas (Leclère et al., 2020). Se necesitan predicciones precisas para identificar posibles puntos de inflexión, en los que pequeños cambios o la continuación de las tendencias en el uso y la gestión de la tierra podrían conducir a cambios de régimen irreversibles, y para diseñar intervenciones que puedan prevenir o mitigar tales resultados (Staal et al., 2020; Liu et al., 2024b; Flores et al., 2024). Los avances en la comprensión, los métodos y las capacidades de monitoreo de PANGEA tienen el potencial de empoderar a los pueblos indígenas, las comunidades locales y los responsables de la toma de decisiones con la información que necesitan para gobernar y relacionarse con estos ecosistemas de manera más sostenible. En última instancia, la capacidad

de predecir y gestionar las complejas retroalimentaciones de los ecosistemas tropicales es clave para fomentar la resiliencia ambiental y social en estas regiones críticas.

Impactos globales de los bosques tropicales: Los impactos de los bosques tropicales también se extienden mucho más allá de los trópicos. Los habitantes de EE.UU. y del resto del mundo se ven afectados por las interacciones entre la tierra y la atmósfera tropicales, y también son agentes de cambio para el clima y los ecosistemas tropicales, por ejemplo, a través de patrones de consumo, estilos de vida y cambios en el uso de la tierra. La Amazonía desempeña un papel fundamental en la estabilización de los sistemas climáticos de toda América, y la deforestación amazónica amenaza los patrones de precipitaciones en EE.UU., lo que podría provocar una reducción del 20% de las lluvias en el noroeste de EE.UU. y una disminución del 50% del manto de nieve de Sierra Nevada en California, que es la fuente de agua para la agricultura y las zonas urbanas de la que depende todo EE.UU. (Medvigy et al., 2013). Si se alteran los regímenes de precipitaciones en el Medio Oeste, el Noroeste y partes del Sur de EE.UU., se plantean graves riesgos para la agricultura y los recursos hídricos del país (Lawrence y Vandecar, 2015). La deforestación amazónica podría provocar una reducción del 20% de las precipitaciones en todo el noroeste de EE.UU. y una disminución del 50% del manto de nieve de Sierra Nevada en California, que es la fuente de agua de la que dependen la agricultura y las zonas urbanas de todo EE.UU. (Medvigy et al., 2013). Estos cambios en las precipitaciones, combinados con cambios en la circulación atmosférica, afectarían a la disponibilidad de agua, reducirían el rendimiento de los cultivos y desestabilizarían los ecosistemas desde las llanuras centrales hasta la costa oeste de Estados Unidos, lo que podría afectar a la seguridad alimentaria. La pérdida y degradación de los bosques amazónicos supone una amenaza directa y grave para la agricultura, los recursos hídricos y la estabilidad social de Estados Unidos. Además del papel que desempeñan los bosques tropicales en la regulación del clima mundial, muchos cultivos básicos clave se cultivan principalmente o en su totalidad en los trópicos, como el cacao, el café, el aceite de palma y el caucho. Numerosas especies maderables también se encuentran únicamente en los trópicos (Romero et al., 2017). PANGEA evaluará el alcance cambiante del uso de la tierra para apoyar estos cultivos y la extracción de madera en la deforestación tropical y el cambio climático y considerará las compensaciones, la adaptación y las estrategias de mitigación.

2.5 Dinámica de las perturbaciones

Este Tema Científico de PANGEA investigará cómo los regímenes de perturbación están alterando las retroalimentaciones del ciclo biogeoquímico a través del clima, la biodiversidad y el ciclo hidrológico.

Dinámica de las perturbaciones en los Trópicos: Existen dos regímenes principales de perturbación forestal: (1) la perturbación humana directa resultante del cambio de la cubierta terrestre y del uso de la tierra, como la deforestación, la degradación, el desarrollo agrícola y los incendios provocados por el hombre, y (2) las perturbaciones naturales que están asociadas en gran medida con las altas temperaturas, el estrés hídrico, las tormentas, los agentes bióticos y la ignición natural de incendios, que se ven exacerbadas indirectamente por las acciones humanas que contribuyen al cambio climático. Estos dos regímenes de perturbación contribuyen enormemente a la rotación total de los bosques y a las emisiones de carbono de los bosques tropicales (McDowell et al 2020, Qin et al., 2021), pero tienen distribuciones espaciales, intensidades, frecuencias y consecuencias distintas para las regiones tropicales. En el Arco de la Deforestación de Brasil, la degradación forestal por tala e incendios causó más pérdida de carbono que la tala de bosques entre 2016 y 2018 (Csillik et al., 2024). El efecto de las tormentas de viento en la pérdida de carbono fue casi tan grande como el de los incendios, y mayor que el de la tala (Csillik et al., 2024; Urquiza-Muñoz et al. 2024; Esquivel-Muelber et al. 2020). Los efectos del cambio en la frecuencia y severidad de las sequías y tormentas, el aumento de las temperaturas y la deforestación y degradación son muy variables

entre los ecosistemas y pueden afectar a la mortalidad de los árboles, la evapotranspiración, la respiración de los ecosistemas, la composición de las especies y mucho más. Las interacciones entre las perturbaciones pueden ser multiplicativas, en lugar de aditivas, lo que significa que necesitamos cuantificar explícitamente su impacto y sus interacciones para comprender sus efectos. Algunos ejemplos son la sequía que amplifica los efectos del fuego (Brando et al., 2014), la deforestación que amplifica el viento (Schwartz et al., 2017) y las lianas que amplifican los rayos (Gora et al., 2023). PANGEA cuantificará los efectos de las perturbaciones a través de gradientes de biodiversidad, climáticos, edáficos y de uso del suelo para comprender sus consecuencias individuales y multiplicativas.

Perturbación humana directa: En las últimas décadas, las perturbaciones humanas directas han supuesto el principal riesgo para la persistencia y el funcionamiento de los bosques tropicales. El hombre tala grandes extensiones de bosque tropical cada año y provoca su degradación mediante la tala selectiva, la caza y los incendios. Las perturbaciones humanas directas suelen conllevar impactos intensos y duraderos, como la eliminación extensiva de biomasa, la defaunación y la conversión de tierras en ecosistemas no forestales (Lewis 2015; Gibson et al., 2011; Wearn et al., 2012; Brodie et al., 2014; Silva Junior et al., 2020, Brando et al., 2014, Flores et al., 2024). La teledetección por satélite ha revolucionado la rápida detección y cuantificación de las perturbaciones humanas directas y ha permitido comprender mejor los factores que las provocan (véase la sección 2.4). La deforestación y el cambio de la cubierta terrestre se están cartografiando ahora activamente en alta resolución espacial en todos los trópicos y en asociación con sectores y prácticas específicos que impulsan estas tendencias (Curtis et al., 2018; Maxwell et al., 2019; Qin et al., 2021; Harris et al., 2021; Lapola et al., 2023; McGregor et al., 2024; Csillik et al., 2024). Con la llegada de pequeñas redes de satélites (por ejemplo, PlanetScope), ahora también es posible cuantificar tanto la deforestación como la degradación en algunos sistemas en cuestión de días o meses (Welsink et al., 2023; Dalagnol et al., 2023). Estos avances han demostrado que la degradación contribuye tanto o más que la deforestación al total de los regímenes de perturbación de los bosques tropicales (Maxwell et al., 2019; Qin et al., 2021), resaltando la importancia de los datos de alta resolución y alta frecuencia para comprender y monitorizar estas dinámicas. Aun así, las interacciones entre la deforestación y la degradación y factores como el ciclo hidrológico, las condiciones micrometeorológicas, las interacciones entre especies y el ciclo biogeoquímico siguen siendo poco conocidas, especialmente en África tropical.

Incendios: En los bosques tropicales húmedos, la dinámica del fuego suele interactuar con la deforestación y la degradación, donde los incendios provocados de forma natural siguen siendo raros y los provocados por el hombre son comunes (Uhl y Kaufmann, 1990; Cochrane, 2003; Brando et al., 2019a). Entre 2003 y 2018, en los bosques tropicales húmedos, se estima que el $41 \pm 14\%$ de toda la pérdida forestal estuvo relacionada con incendios, aunque esto varió considerablemente entre continentes (van Wees et al., 2021). De toda la pérdida de bosques tropical relacionada con incendios durante este periodo, el 69% se produjo en las Américas tropicales, el 22% en el Sudeste Asiático y solo el 8% en el África subsahariana (van Wees et al., 2021). Aunque los incendios están asociados a la deforestación, el impacto de la disminución de la deforestación amazónica, desde 2005, sobre la actividad de los incendios sigue siendo incierto. Algunos estudios mostraron un desacoplamiento entre los incendios y la deforestación (Aragão et al., 2018), mientras que otros informaron de descensos en la actividad de los incendios (por ejemplo, Andela et al., 2017; Libonati et al., 2021). En África se ha producido un aumento de la pérdida de bosques tropicales relacionada con los incendios, pero es probable que la mayoría de los incendios de la región no se detecten (Wimberly et al., 2024). Los incendios provocados por el hombre suelen propagarse por el sotobosque de los bosques tropicales intactos, donde causan la mortalidad de los árboles y hacen que los bosques sean más susceptibles a posteriores perturbaciones provocadas por el viento (Barlow et al., 2003; Brando et al., 2014; Silvério et al., 2019; Berenguer et al., 2021b). Los cambios en la estructura de los bosques asociados a los incendios y a la fragmentación forestal pueden aumentar el riesgo de incendios posteriores tanto por la mayor abundancia de cargas de combustible como hierbas y plantas del

sotobosque (Silvério et al., 2013, Sagang et al., 2024b) como por la mayor radiación solar que llega al suelo, que favorece condiciones más cálidas y secas cerca de la superficie (Brando et al., 2014; Longo et al., 2020; Nunes et al., 2022). Además, las sequías periódicas amplifican los efectos del fuego al aumentar la inflamabilidad del combustible, por lo que se espera que el aumento de las sequías graves provocado por el clima aumente los efectos del fuego (Alencar et al., 2006; Brando et al., 2014, 2019a; Barbosa, 2024; Burton et al., 2024a,b; da Veiga et al., 2024; Jones, 2024). Los incendios transfieren nitrógeno ecosistémico a la atmósfera a través de la pirodenitrificación, con el consiguiente efecto de empobrecimiento de nitrógeno, lo que conduce a una reducción de las tasas de regeneración de la vegetación (Davidson et al., 2007). Las mediciones satelitales y terrestres han revelado los efectos generalizados de los incendios y sus importantes contribuciones al ciclo del carbono pantropical (Cochrane 2001; Berenguer et al., 2021a). A través de mediciones terrestres coordinadas y co-localizadas y de observaciones avanzadas por satélite y aerotransportadas, PANGEA mejorará significativamente la comprensión de la dinámica de los incendios y sus impactos.

Dinámica de las perturbaciones naturales: Las perturbaciones naturales -principalmente sequías, tormentas y agentes bióticos- plantean distintos retos de detección, cuantificación y atribución en comparación con las perturbaciones humanas directas, como la deforestación y la degradación forestal, aunque la deforestación sigue siendo esencialmente imposible de detectar mediante teledetección. La mayoría de las perturbaciones naturales se producen a escalas espaciotemporales pequeñas, y más del 98% de la mortalidad de biomasa por caídas de árboles en la Amazonia se atribuye a eventos de menos de 0,1 ha de superficie (Espírito-Santo et al., 2014). Sin embargo, las pequeñas perturbaciones pueden causar colectivamente entre el 1,5% y el 2% de la renovación anual de biomasa, lo que indica que las perturbaciones naturales liberan el equivalente a toda la reserva de carbono de los bosques tropicales cada 50-75 años (Galbraith et al., 2013; Espírito-Santo et al., 2014). Las perturbaciones naturales también pueden variar enormemente en el espacio y el tiempo (Galbraith et al., 2013; Sullivan et al., 2020; Hubau et al., 2020; Dalagnol et al., 2021, Csillik et al., 2024, Negron-Juarez et al., 2023), con distintos impulsores en diferentes regiones y pruebas sólidas de que los regímenes de perturbaciones naturales están cambiando con el cambio climático (Gloor et al., 2013; McDowell et al., 2018, Gora et al., 2020a; Sullivan et al., 2020; Gora y Esquivel-Muelbert 2021; Fang et al., 2022). Dada su enorme contribución a la dinámica del ciclo del carbono de los bosques tropicales -por ejemplo, en la Amazonia brasileña, las perturbaciones naturales representaron más del 50% de las pérdidas totales de carbono de la biomasa (Csilik et al., 2024)-, incluso pequeños cambios en los regímenes de perturbaciones naturales tendrán un impacto en la función de los bosques tropicales, la biodiversidad y el presupuesto mundial de carbono.

La sequía: Las sequías son uno de los principales factores de perturbación natural en los bosques tropicales. El estrés hídrico atmosférico asociado a las altas temperaturas y a los déficits de presión de vapor ha aumentado en las últimas décadas (Fang et al., 2022), y las sequías episódicas se están produciendo con mayor gravedad y frecuencia (Boiser et al., 2015; Duffy et al., 2015; Trenberth et al., 2014). El estrés hídrico relacionado con la sequía se asocia con aumentos en la mortalidad de los árboles y disminuciones en su crecimiento, detectables en parcelas de inventario forestal y teledetección por satélite (Phillips et al., 2009; Saatchi et al., 2013; Qie et al., 2017; Hammond et al., 2022; Bauman et al., 2022; Bennett et al., 2023; Chen et al., 2024). El trabajo fisiológico y anatómico detallado ha revelado mucho sobre los mecanismos subyacentes a la resiliencia de los bosques al estrés hídrico (McDowell et al., 2008; McDowell 2011; Trugman et al., 2018; Smith-Martin et al., 2023; Tavares et al., 2023). La investigación de la sequía en los bosques tropicales proporciona pruebas sólidas de su importancia, pero también revela que los efectos de la sequía son muy variables entre los ecosistemas. Por ejemplo, El Niño de 2015-2016 tuvo fuertes efectos en el Amazonas (Bennett et al., 2023), pero sólo un efecto marginal en los bosques tropicales africanos (Bennett et al., 2021) y causó un aumento sustancial de la GPP en el centro de Panamá (Detto y Pacala 2022). Aunque las diferencias entre años de sequía y no sequía son claras, la contribución

de las sequías a las tendencias decenales de la dinámica forestal y las trayectorias futuras de los bosques tropicales siguen siendo muy inciertas.

Tormentas: Las tormentas tropicales (denominadas huracanes, ciclones o tifones dependiendo de su ubicación geográfica) están aumentando en intensidad y son una forma dominante de perturbación en los bosques tropicales costeros a 10° al norte y al sur del ecuador (Hoyos et al., 2006; Lugo 2008), aunque desempeñan un papel limitado en los régimenes de perturbación pantropicales. Por el contrario, existen abundantes pruebas de que el viento y los rayos asociados a las tormentas eléctricas son los impulsores dominantes de la mortalidad de los árboles y de la dinámica de la biomasa forestal (Chambers et al., 2013; Negron-Juárez et al., 2018; Negron-Juarez et al., 2017, Negron-Juarez et al., 2023, Gora et al., 2020b; Gora y Esquivel-Muelbert, 2021). En la Amazonia, la mortalidad de los árboles por tormentas se ha cuadruplicado desde la década de 1980 (Urquiza-Muñoz et al., 2024), aunque pocos estudios en la Amazonia han investigado los impulsores de las tormentas en la dinámica y composición de los bosques. La variación temporal en la actividad de las tormentas predice las tasas de perturbación del dosel (Araujo et al., 2021) y la variación espacial en la actividad de las tormentas es un fuerte correlato de la variación espacial en la biomasa forestal, las tasas de mortalidad de la biomasa y la composición de especies (Gora et al., 2020; Gorgens et al., 2021; de Lima et al., 2023; Feng et al., 2023a). Por ejemplo, la baja actividad de las tormentas se asocia con una alta biomasa en el Escudo Guayanés, mientras que la alta frecuencia de las tormentas se asocia con una menor biomasa y mayores tasas de perturbación en la Amazonia occidental (Gorgens et al., 2021). Es probable que las tormentas jueguen un papel similar en otros bosques tropicales, pero los análisis de perturbación por tormentas en los bosques tropicales africanos e indomalayos son casi inexistentes. Esta laguna de conocimiento es preocupante porque todos los datos existentes sugieren que las tormentas convectivas han aumentado en frecuencia entre un 5 y un 25% por década del siglo pasado, y se esperan aumentos continuos (Taylor et al., 2018; Raghavendra et al., 2018; Lavigne et al., 2019; Harel y Price 2020).

Aumento de las temperaturas: La mayoría de los bosques tropicales de tierras bajas experimentan temperaturas medias elevadas durante todo el año, con una variabilidad estacional e interanual relativamente baja, lo que puede hacer que los bosques tropicales sean especialmente vulnerables a los cambios de temperatura (Cunningham y Read, 2002). Las proyecciones climáticas indican que los bosques tropicales experimentarán cada vez más temperaturas medias anuales no análogas y episodios de calor extremo a lo largo del siglo XXI (Seneviratne et al., 2021). Las altas temperaturas pueden aumentar de forma rápida y no lineal el déficit de presión de vapor (VPD) (Barkhordarian et al., 2019), lo que a su vez afecta negativamente a la productividad primaria debido al cierre estomático (Lloyd y Farquhar, 2008). Los experimentos han indicado que las especies arbóreas tropicales son capaces de mantener la productividad hasta 38°C si el VPD no aumenta (Smith et al., 2020). Sin embargo, si las temperaturas medias aumentan más de 4°C por encima de los niveles actuales, los ecosistemas forestales tropicales podrían experimentar frecuentes períodos de temperaturas cercanas a los 50°C, lo que podría causar daños irreversibles en los tejidos y una pérdida persistente de la capacidad fotosintética (Doughty et al., 2023). El umbral exacto a partir del cual la temperatura y la PDV causarán daños permanentes y extensos en los bosques tropicales sigue siendo muy incierto (Slot y Winter, 2016; Winter y Roelfsema, 2024).

3 Lagunas e interrogantes

A pesar de la importancia mundial de los bosques tropicales, no comprendemos plenamente los patrones y procesos básicos que sustentan su supervivencia, lo que limita nuestra capacidad de prever eficazmente su futuro papel en el sistema terrestre. Es importante destacar que la mayoría de las lagunas de conocimiento actuales son inherentemente transdisciplinarias y requieren una comprensión avanzada de los procesos e

interacciones entre ecosistemas forestales tropicales estructural, funcional y socialmente diversos y heterogéneos, el efecto del cambio climático, los cambios en los régímenes de perturbaciones naturales y antropogénicas y sus impactos combinados sobre la biodiversidad y los ciclos biogeofísicos y biogeoquímicos. Las preguntas científicas de PANGEA, por lo tanto, abarcan los cinco temas científicos descritos en la Sección 2. Las preguntas que abordan estos temas -ciclos biogeoquímicos, biodiversidad, interacciones y retroalimentaciones climáticas, sistemas socioecológicos y dinámicas de perturbación- se organizan según consideraciones de patrón (Sección 3.1), proceso (Sección 3.2) y cambio futuro proyectado (Sección 3.3) para reflejar su naturaleza transdisciplinaria. Las mediciones necesarias para proporcionar datos ecológicos, sociales y geofísicos para abordar las cuestiones científicas se obtendrán mediante métodos terrestres, aéreos y por satélite, y se describen brevemente en esta sección, con más detalle en **la Tabla 2** de la Sección 6.2 y en **la Tabla -E1** del Apéndice E. En la **Figura 16** se muestra el alcance y la variedad de la recogida de datos para las mediciones por satélite, aerotransportadas y terrestres.

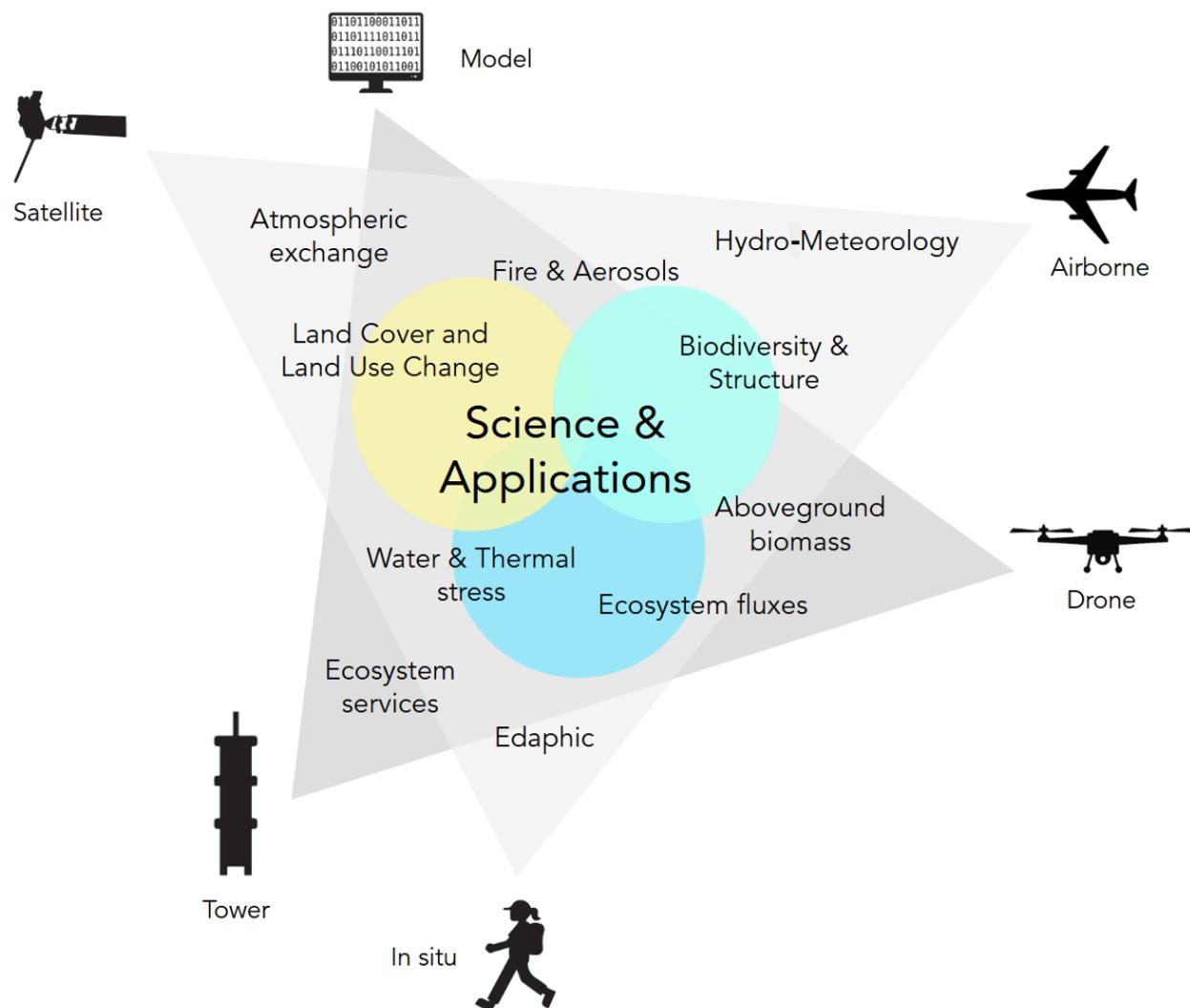


Figura 16. La ciencia y las aplicaciones de PANGEA conciliarán los desajustes de escala mediante mediciones *in situ*, desde torres, drones, aviones y satélites, en combinación con avances en la modelización y la comprensión de los procesos que sustentan la teoría de la escala.

3.1 Patrón

3.1.1 Patrón: Existencias y flujos de carbono

Las estimaciones actuales tanto de las reservas como de los flujos de carbono difieren notablemente entre los trópicos (Sullivan et al., 2020; Xu et al., 2021a; Muller-Landau et al., 2021; Wang et al., 2023a). Los datos de África, aunque escasos y con un sesgo geográfico y falta de representatividad, sugieren que los regímenes de perturbación y las respuestas de los bosques a las perturbaciones son distintos de los de otros continentes (Hubau et al., 2020; Bennett et al., 2021; 2023), aunque esto aún está abierto a debate. Además, en los trópicos, los patrones espaciales y temporales de la dinámica de las perturbaciones están mal caracterizados, lo que agrava la incertidumbre sobre el futuro del presupuesto mundial de carbono (Pugh et al., 2020). Para llenar los vacíos de conocimiento en nuestros datos y comprensión de las reservas y flujos de carbono tropical, PANGEA abordará las siguientes preguntas relacionadas con los patrones para responder a la pregunta general de PANGEA en la Sección 1:

- **Q1.** ¿En qué se diferencian los bosques de los trópicos en cuanto a reservas de carbono y flujos de dióxido de carbono, metano y laterales, y cómo se relaciona su **variación espacial** dentro de cada bosque con el microclima, el ciclo hidrológico, los suelos, la geomorfología y las interacciones socioecológicas?
- **Q2.** ¿Cómo se relacionan **las variaciones temporales** de los flujos de los bosques tropicales con las variaciones temporales del clima y cómo se verán afectadas por el cambio climático?
- **Q3.** ¿Cómo afectan **los tipos de perturbación** y los gradientes en los **regímenes de perturbación** a las reservas y flujos de carbono, incluidos el dióxido de carbono, el metano y los flujos laterales?
- **Q4.** ¿Cómo varían las diferencias geográficas y las variaciones espaciales y temporales en **la fenología** de los árboles de los bosques tropicales con las reservas y flujos de carbono, y está cambiando la fenología en relación con los cambios, incluidos los cambios climáticos y de uso de la tierra, y los regímenes de perturbaciones?

Para mejorar la **caracterización** espacial de la biomasa a escala de paisaje (es decir, bosques, tierras de cultivo, pastizales), y las diferencias en la biomasa a través de los dominios geográficos centrales y extendidos, PANGEA integrará datos de parcelas de inventarios forestales y mediciones adicionales en sitios seleccionados que cubren la escala de paisaje, con datos lidar satelitales y aerotransportados. PANGEA se asociará con GEO-TREES, un proyecto que está coordinando las mediciones terrestres de los inventarios forestales con el escaneado láser terrestre, los drones y la recopilación de datos lidar aerotransportados. PANGEA aprovechará la información sobre las estimaciones de las reservas de carbono basadas en la alometría de los árboles y dará prioridad a la ubicación de los paisajes con los sitios forestales de GEO-TREES para apoyar los esfuerzos de ampliación utilizando **GEDI**, **NISAR**, **BIOMASS** y **EDGE***. Para avanzar en la **cuantificación temporal** de los flujos de los ecosistemas, PANGEA integrará los datos de CO₂ y CH₄ recogidos utilizando las mediciones de flujo de covarianza de Foucault existentes (Baldocchi 2020) y también identificará áreas para la implementación de nuevas torres para llenar los vacíos de datos y conocimientos a través de gradientes climáticos, de biodiversidad y de perturbación. Se realizarán mediciones adicionales de CO₂ y CH₄ mediante el despliegue estratégico de cámaras automatizadas y manuales. Para evaluar las limitaciones regionales y pantropicales de los flujos de CO₂ y CH₄, PANGEA empleará mediciones aéreas de gases traza, que desempeñaron un papel clave en anteriores campañas de campo de la NASA, como las mediciones de perfiles verticales de Manaos durante LBA y las mediciones aéreas de gases traza de CARVE y Arctic-CAP durante ABoVE (Sweeney et al., 2022). Estas se utilizarán para validar las observaciones por satélite de sensores como **OCO-2 y -3**, **TROPOMI**, **Carbon Mapper** y nuevos productos de satélites geoestacionarios, incluido **GOES-R** (Crisp et al., 2017; Lorente et al., 2021; Khan et

al., 2021; Ranjbar et al., 2023). **NISAR** y **BIMASS** se utilizarán para cartografiar humedales tropicales, que se integrarán con los datos de aguas superficiales de la Misión de Topografía Oceánica y Aguas Superficiales (**SWOT**) para restringir las mediciones de flujos laterales de carbono.

PANGEA colaborará con la Red de Observación de la Columna de Carbono Total (TCCON) y la Red de Observación Colaborativa de la Columna de Carbono (COCCON) para colmar las lagunas de validación de las observaciones por satélite, especialmente en África, con el fin de resolver los debates sobre las estimaciones de las fuentes y sumideros continentales inferidas a partir de las observaciones OCO-2. TCCON y COCCON son redes de espectrómetros de transformada de Fourier terrestres que se utilizan para obtener una abundancia media en columna exacta y precisa de CO₂, CH₄, N₂O, HF, CO, H₂O y HDO, proporcionando un recurso de validación esencial para **OCO-2/3**, **GOSAT** y **GOSAT-2**, **TROPOMI** y otras misiones. En la actualidad, estas mediciones de validación son extremadamente escasas en los trópicos, lo que limita la interpretación de los patrones de flujo espaciotemporales inferidos a partir de los datos de CO₂ y CH₄ obtenidos por satélite. Estas mediciones también ayudarán a restringir los modelos y cuantificar las incertidumbres de las estimaciones a escala regional de los flujos de CO₂ y CH₄ derivados del modelado inverso (Beck et al., 2013b; Liu et al., 2016; Schuh et al., 2019) para paisajes en todo el dominio de PANGEA. Por último, PANGEA cuantificará el impacto de **las perturbaciones del dosel** provocadas por el viento, los rayos y la sequía, y **la fenología de los bosques tropicales** en los flujos y las reservas de carbono mediante una combinación de mediciones de campo, PhenoCams y drones y datos satelitales para abordar las lagunas de conocimiento relacionadas con las diferentes respuestas fenológicas de las hojas para las especies individuales y los tipos funcionales a los gradientes climáticos y de perturbación a través de los paisajes. Los conjuntos de datos de PANGEA complementarán los esfuerzos existentes para ampliar la cobertura geográfica de la fenología utilizando **Landsat**, **Sentinel-2** y **datos de satélites comerciales** (Guan et al., 2015; Yang et al., 2021b; Wang et al., 2023a).

3.1.2 Patrón: Biodiversidad y composición funcional

La biodiversidad varía notablemente entre los continentes tropicales, no solo debido a las diferencias climáticas, sino también como resultado de su pasado evolutivo (Corlett y Primack 2006; Slik et al., 2018; Raven et al., 2020). La biodiversidad se asocia positivamente con una mayor productividad primaria neta en los bosques tropicales (Durán et al., 2019). Comprender los mecanismos que sustentan esta relación a escala regional a pantropical es una laguna de conocimiento que PANGEA puede ayudar a llenar.

Carecemos de información detallada sobre la diversidad funcional de los ecosistemas forestales tropicales. Una evaluación inicial de la abundancia de datos de rasgos de plantas forestales tropicales en los trópicos americanos, basada en TRY (Kattge et al., 2020); LT-Brasil (Mariano et al., 2021) y Ngee-Tropics (<https://ngt-data.lbl.gov/dois/>), revela que unos pocos sitios en Panamá Central y la Guayana Francesa costera representan la mayor parte de los datos de rasgos de especies arbóreas forestales, y la mayoría de los rasgos tienen información limitada (**Figura 17**), especialmente para las especies arbóreas africanas. Al abordar estas lagunas de conocimiento y datos, PANGEA vinculará directamente las mediciones terrestres con la teledetección aérea y por satélite para comprender la distribución de los rasgos funcionales del dosel y la diversidad funcional en los biomas forestales tropicales, e investigará la fuerza y la dependencia de escala de los controles de la biodiversidad sobre la función de los ecosistemas. PANGEA responderá a las siguientes preguntas para colmar las lagunas de conocimiento en la comprensión de la biodiversidad y la composición funcional en los trópicos.

- **Q5.** ¿En qué se diferencian geográficamente la estructura y la función de los bosques tropicales y cómo varían espacialmente en función de la **biodiversidad** vegetal?

- **Q6. ¿Cuáles son las distribuciones de los rasgos funcionales de las plantas en los bosques tropicales de los distintos continentes y cómo reflejan estas diferencias las respuestas a las perturbaciones y los gradientes climáticos?**
- **Q7. ¿En qué medida están relacionadas las reservas tropicales de carbono y la dinámica del ciclo del carbono con la composición de los rasgos funcionales de las plantas?**

Para relacionar las métricas de biodiversidad con la diversidad estructural y funcional, PANGEA recopilará mediciones terrestres coincidentes y observaciones hiperespectrales aerotransportadas a través de la biodiversidad de especies y la composición de rasgos funcionales, así como gradientes de perturbación. PANGEA se basará en investigaciones anteriores que demuestran cómo estos enfoques permiten estimar la composición funcional y la diversidad de los ecosistemas forestales tropicales (Feret y Asner, 2013; Asner et al., 2014b; Asner et al., 2017; Chadwick y Asner 2020; Ordway et al., 2022). PANGEA empleará datos hiperespectrales aéreos y satelitales, incluidos los de las misiones **EMIT**; **PRISMA**; **DESIS**; Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem Mission (**PACE**), y **Planet Tanager**, y avanzará en la calibración y el desarrollo de algoritmos para apoyar la ciencia y las aplicaciones de PANGEA y la misión **SBG**. PANGEA también caracterizará la diversidad estructural de los bosques utilizando lidar terrestre y basado en UAV, aerotransportado y espacial (**GEDI**, **EDGE***) a escalas de árbol individual a ecosistema (por ejemplo, Decuyper et al., 2018; Dubayah et al., 2020; Momo et al., 2020, Terryn et al., 2022; Schneider et al., 2019; Ferraz et al., 2016; Jucker et al., 2018a; Schneider et al., 2020; de Conto et al., 2024). Para investigar la asociación entre la composición de las especies vegetales y el funcionamiento de los ecosistemas (Coverdale y Davies, 2023), PANGEA combinará mediciones sobre la diversidad estructural y funcional con observaciones in situ y por teledetección de CO_2 , CH_4 , flujos de agua y energía y ciclos de nutrientes, utilizando series temporales de mediciones y muestreos espacio-temporales a través de los paisajes.

Para relacionar la diversidad funcional con las respuestas de los ecosistemas a fenómenos extremos, la recopilación de datos de PANGEA abarcará paisajes que mostraron respuestas distintas a fenómenos extremos anteriores, como por ejemplo El Niño de 2015. Utilizaremos un enfoque espaciotemporal en ausencia de eventos extremos durante PANGEA. La detección de respuestas a eventos extremos, así como las relaciones emergentes entre la diversidad funcional y la función del ecosistema se utilizarán para escalar conjuntos de datos a través de los dominios PANGEA y para la evaluación comparativa de modelos basados en procesos. La sección 3.2.1 presenta cuestiones adicionales relacionadas con la biodiversidad de PANGEA que van más allá de la botánica para incluir taxones no vegetales e interacciones

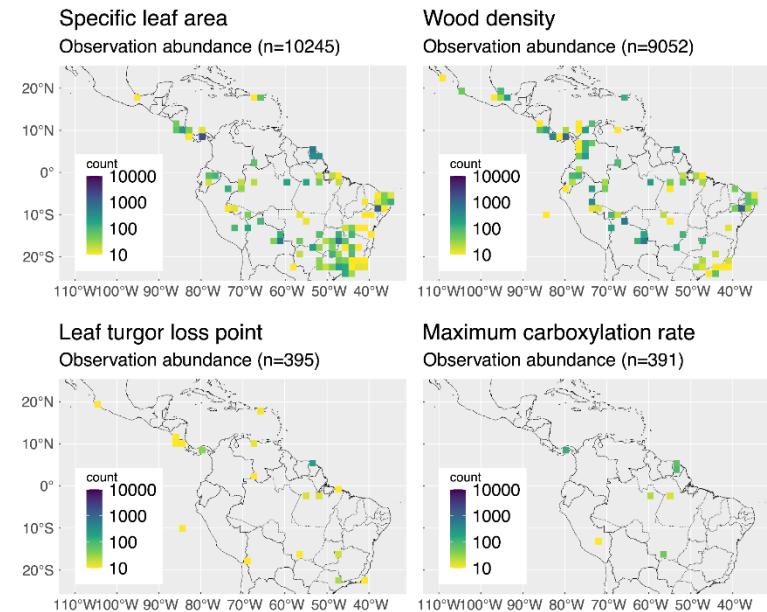


Figura 17. Número de observaciones para rasgos seleccionados en los trópicos americanos, basado en las bases de datos existentes-TRY (Kattge et al. 2020); LT-Brasil (Mariano et al. 2021, y sus referencias); y NGEE-Tropics (<https://ngt-data.lbl.gov/dois/>). Para el área foliar específica y la tasa máxima de carboxilación, el recuento incluye sólo las observaciones que se tomaron inequívocamente del dosel o de hojas expuestas al sol.

entre especies. Según las conversaciones mantenidas con los colaboradores indígenas durante la fase de definición del alcance de PANGEA, es más probable que las preguntas de la sección 3.2.1 se aborden mediante la integración de los conocimientos ecológicos indígenas, tradicionales y locales (IEK, TEK y LEK) con otras formas de conocimientos y datos. Creemos que IEK, TEK y LEK tienen el potencial de avanzar en la comprensión de todas las preguntas científicas de PANGEA de maneras que se explorarán a través de la ciencia co-desarrollada y equitativa.

3.1.3 Patrón: Interacciones tierra-atmósfera y umbrales

A pesar de los avances en la comprensión de las interacciones y retroalimentaciones entre la biosfera y la atmósfera en las regiones tropicales a partir de proyectos y campañas anteriores de la NASA (Davidson et al., 2012), sigue habiendo importantes lagunas de conocimiento sobre cómo varían estas interacciones dentro de los continentes y entre ellos (Phillipon et al., 2019; Pohl et al., 2021; Martins et al., 2018; Chakraborty et al., 2019; Jonard et al., 2022). Las condiciones hidroclimáticas en los bosques tropicales varían significativamente a lo largo de los gradientes de perturbación, desde bosques intactos hasta paisajes fuertemente fragmentados (Gutiérrez-Cori et al., 2021), y existen pruebas de estudios de modelización y teledetección de que la degradación generalizada de los bosques tropicales puede alterar los flujos de energía y agua (por ejemplo, Longo et al., 2020; Rangel Pinagé et al., 2023), aunque aún se desconocen los efectos de la degradación forestal en la intensidad y el reciclaje de las precipitaciones. Los impactos de la deforestación en las vías de transporte de la humedad atmosférica reciclada son un foco creciente de investigación en la Amazonía, pero en menor medida en África Central (van der Ent et al., 2010; Zemp et al., 2017; Baker y Spracklen 2022; Te Wierik et al., 2022; Xu et al., 2022; Staal et al., 2023; Theeuwen et al., 2023; Flores et al., 2024; Nyasulu et al., 2024). Esta laguna de conocimiento en África es preocupante, dadas las pruebas recientes que sugieren que los bosques tropicales de África Central dependen en mayor medida del reciclaje de la humedad para proporcionar humedad atmosférica para las precipitaciones que el Amazonas (Worden et al., 2021b, 2024; Baker y Spracklen 2022). Además, las actividades incendiarias relacionadas con el uso de la tierra pueden cambiar significativamente la concentración de aerosoles en la atmósfera y afectar directamente a las actividades convectivas en los ecosistemas tropicales (Andreae et al., 2004; Freire et al., 2020). Para abordar las lagunas de conocimiento relacionadas con las interacciones tierra-atmósfera y los umbrales hidroclimáticos, PANGEA responderá a las siguientes preguntas:

- **Q8.** ¿Cómo varían *las interacciones tierra-atmósfera*, incluidos el reciclaje de la humedad y los flujos de carbono, con las retroalimentaciones climáticas, las perturbaciones, la capacidad de almacenamiento de carbono y la resiliencia de los bosques tropicales, en condiciones ambientales cambiantes?
- **Q9.** ¿Cómo varían *los umbrales hidroclimáticos*, como los niveles críticos de humedad del suelo o los límites térmicos, dentro de los continentes tropicales y entre ellos?

Para investigar cómo varían las interacciones tierra-atmósfera en los distintos continentes, PANGEA se basará en las mediciones utilizadas para la variación espacial y temporal de las reservas de carbono (Sección 3.1.1), y la diversidad estructural y funcional (Sección 3.1.2), complementadas con mediciones terrestres de estaciones micrometeorológicas, flujos de calor latente y sensible de torres de covarianza de Foucault, humedad del suelo, mediciones ecofisiológicas del dosel, y humedad de combustible vivo y muerto. PANGEA escalará los datos terrestres y de torres sobre la humedad del suelo, el contenido de agua del dosel, los rasgos hidráulicos y el estrés térmico y la evapotranspiración (ET) a los panrópicos combinando radar aerotransportado e hiperespectral con **SMAP**, Soil Moisture and Ocean Salinity Mission (**SMOS**), **NISAR***, Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS Mission (**AMSR-E**), **EMIT**, **ECOSTRESS** y Fluorescence Explorer Mission (**FLEX**). Los datos terrestres de PANGEA mejorarán aún más las

estimaciones de humedad del suelo de **SMAP** en los bosques tropicales, que se sabe que están significativamente sesgadas en los ecosistemas tropicales (Cho et al., 2024), basándose en los recientes esfuerzos de corrección (Wang et al., 2024). Para identificar los umbrales hidroclimáticos críticos, PANGEA avanzará en los enfoques emergentes para cuantificar el estrés hídrico de la vegetación desde el espacio. Por ejemplo, el contenido de agua del dosel a partir de datos hiperespectrales aerotransportados ha ilustrado patrones ecológicamente significativos relacionados con el estrés hídrico en sistemas mediterráneos (Brodrick et al., 2019; Paz-Kagan y Asner 2017), y PANGEA probará la transferibilidad de este enfoque a los trópicos. La estimación de la profundidad óptica de la vegetación a partir de la teledetección por microondas es otra tecnología prometedora para la cuantificación del estrés relacionado con la sequía (Konings et al., 2021), y PANGEA investigará cómo escalar entre la respuesta a nivel de hoja y a nivel individual, y evaluar las incertidumbres y tener en cuenta los efectos de confusión, como que la señal esté dominada por el agua superficial de la hoja en lugar del agua intersticial (Xu et al., 2021b). PANGEA recogerá mediciones ecofisiológicas a nivel de las hojas del dosel y utilizará métodos de recuperación de la profundidad óptica de la vegetación (VOD) basados en torres utilizando señales de microondas GNSS (Humphrey y Frankenberg 2023). PANGEA también evaluará la escalabilidad de estas mediciones utilizando recuperaciones hiperespectrales y de microondas aerotransportadas y espaciales. También se utilizarán datos térmicos y de fluorescencia inducida por el sol (SIF) desde torres y desde el aire para evaluar las mediciones diurnas y estacionales de GPP y ET con el fin de restringir aún más los productos de datos y las métricas recuperadas de satélites **como ECOSTRESS** (por ejemplo, Fisher et al., 2020; Li et al., 2021) y las recuperaciones SIF de satélites como **OCO-2/3** y **TROPOMI** (Sun et al., 2018). Los productos restringidos proporcionarán valiosos datos de calibración para la humedad del suelo teledetectada, la ecofisiología de las plantas, la GPP y la ET a escalas regionales para modelos basados en procesos.

3.2 Proceso

3.2.1 Proceso: Interacciones entre especies y resiliencia

Aunque se sabe que los bosques tropicales son ecosistemas de alta biodiversidad, la ciencia y la tecnología para cuantificar y monitorear la biodiversidad a gran escala, así como la comprensión del proceso de cómo la diversidad estructural y funcional media en el ciclo del carbono, el agua, la energía y los nutrientes, aún son incipientes. Además, la mayoría de los modelos de la biosfera terrestre siguen representando bosques tropicales con menos tipos funcionales de plantas que los bosques templados (por ejemplo, Lawrence et al., 2019; Schaphoff et al., 2018). Incluso cuando los modelos representan múltiples estrategias de historia vital, obtener una coexistencia robusta en las simulaciones sigue siendo un reto importante (Koven et al., 2020; Li et al., 2023; Powell et al., 2018). Parte de este desafío se deriva del hecho de que las plantas en bosques tropicales densos deben competir por múltiples recursos limitantes (luz, agua, nutrientes) y existen fuertes compensaciones entre la adquisición de recursos, el crecimiento y la supervivencia (Choat et al., 2018; Oliveira et al., 2021a). Estas compensaciones se caracterizan por diferentes rasgos funcionales, pero la mayoría de los esfuerzos para caracterizar la distribución de rasgos a escala regional y global han dado como resultado un marcado desacuerdo en las estimaciones para los bosques tropicales (Dechant et al., 2024). Además, las comunidades vegetales de los diferentes continentes tienen historias evolutivas distintas (Slik et al., 2018), así como interacciones contemporáneas planta-animal únicas en cada continente tropical (Corlett & Primack 2006). Por ejemplo, en África Central, la megafauna herbácea, como los elefantes de bosque, al consumir selectivamente especies con menor densidad de madera y ayudar a la dispersión de especies de plantas de semillas grandes que tienen una densidad media de madera alta, puede apoyar directa e indirectamente bosques más densos en carbono y ayudar a su capacidad de secuestro de carbono (Berzaghi et al., 2019). Las investigaciones sugieren que la pérdida de megaherbívoros de los bosques tropicales reduce las reservas de carbono de los bosques tropicales hasta en un 9 % (Berzaghi et

al., 2018, 2023). Esta pérdida de megaherbívoros puede haber cambiado las relaciones entre la biodiversidad y la función de los bosques, pero esta hipótesis aún debe comprobarse. Los bosques tropicales también están experimentando cambios significativos debido a la deforestación y la degradación forestal. Investigaciones anteriores han indicado que incluso niveles modestos de degradación pueden agotar significativamente la biodiversidad en los bosques tropicales (Barlow et al., 2016). Comprender cómo afectan estas pérdidas a la capacidad de los bosques para recuperarse y responder a la intensificación de los cambios climáticos es una prioridad de investigación fundamental. Aunque cada vez hay más pruebas que demuestran el papel de la fauna silvestre en los ciclos biogeoquímicos, en particular en los flujos y el secuestro de carbono (Berzaghi et al., 2018, 2023; Schmitz et al., 2018), la medida en que la fauna silvestre afecta al ciclo natural del carbono sigue siendo un área de investigación activa y no está adecuadamente representada en los ESM existentes. Por lo tanto, PANGEA abordará las siguientes preguntas:

- **Q10.** ¿Qué papel desempeña la **biodiversidad** en las variaciones de las reservas y flujos de carbono de los bosques tropicales a escala local, regional y continental?
- **Q11.** ¿Cómo influyen **las interacciones entre plantas y animales** en la vulnerabilidad o resistencia de las reservas y flujos de carbono de los bosques tropicales?
- **Q12.** ¿Hasta qué punto son vulnerables o resilientes al cambio climático y de uso de la tierra las **interacciones entre especies** que sustentan la función de los bosques tropicales, incluidas las interacciones entre hábitos de vida (árboles, lianas, palmeras, hierbas/gramíneas y bambúes)?
- **Q13.** ¿Qué **rasgos funcionales y atributos estructurales de las plantas** confieren resistencia al ciclo del carbono, y cómo varían entre tipos de bosque, gradientes ambientales y verticalmente dentro de los bosques?

Además de las mediciones descritas en la Sección 3.1.2, la caracterización de la biodiversidad a distintas escalas combinará mediciones in situ que incluyan la diversidad taxonómica y la abundancia de plantas y datos sobre el movimiento de animales, recogidos mediante sensores bioacústicos, cámaras trampa, ADN ambiental, Conocimiento Ecológico Indígena (CEI), Conocimiento Ecológico Tradicional (TEK), Conocimiento Ecológico Local (LEK), lidar y radar hiperespectral aerotransportado, y lidar y radar hiperespectral por satélite (**EMIT, PRISMA, DESIS, PACE** y **Planet Tanager**) (**GEDI, EDGE***, **NISAR*** y **BIOMASS***). Estos conjuntos de datos (véase la Sección 6) permitirán realizar estimaciones directas e indirectas de la biodiversidad y proporcionarán condiciones iniciales y puntos de referencia para modelos de la biosfera terrestre basados en procesos que puedan representar la diversidad estructural y funcional (por ejemplo, BiomeE, ED/ED2, FATES; Sección 6.3). A continuación, se utilizarán para desarrollar la comprensión de los procesos y la atribución del papel de la biodiversidad en los flujos de carbono, agua y energía, y cómo varían estas relaciones dentro de los continentes y entre ellos. Para investigar cómo la biodiversidad y los cambios en la biodiversidad impulsados por el uso de la tierra afectan a la resistencia de los bosques tropicales a los extremos climáticos, PANGEA identificará paisajes a través de gradientes de perturbación, climáticos y edáficos, y cuantificará las relaciones emergentes entre la composición estructural/funcional de los bosques y su sensibilidad a los extremos climáticos. Los indicadores de estrés hídrico y función del ecosistema (Sección 3.1.3), por ejemplo, se desarrollarán utilizando datos de **SMAP**, **SMOS**, **NISAR***, **AMSR-E**, **EMIT**, **ECOSTRESS**, **FLEX**, **TROPOMI**, y **OCO- 2/3**. Estas relaciones se aplicarán para restringir los modelos inversos y los modelos de la biosfera terrestre basados en procesos, permitiendo a estos modelos atribuir el papel de la biodiversidad en la mitigación de los impactos del cambio global sobre el sumidero de carbono terrestre tropical.

3.2.2 Proceso: Retroalimentación perturbación-función del ecosistema

Los cambiantes regímenes de perturbaciones, como sequías, incendios, tormentas y cambios en el uso del suelo, están remodelando los bosques tropicales. Las regiones tropicales de los distintos continentes difieren en sus respuestas a perturbaciones similares, como los fenómenos de El Niño (Liu et al., 2017). Estas diferencias continentales pueden estar asociadas a diferencias en la resiliencia de los bosques tanto a la acción humana como al cambio climático (Bennett et al., 2021; Saatchi et al., 2021); sin embargo, los mecanismos subyacentes a las diferencias en la vulnerabilidad de los bosques son difíciles de determinar. Del mismo modo, carecemos de una cuantificación de los impulsores de la mortalidad arbórea a gran escala, y de las razones de una mayor mortalidad arbórea en diferentes continentes (McDowell et al., 2018; Gora y Esquivel-Muelbert 2021). Parte de esta dificultad se deriva de las limitaciones de escala. Aunque los huracanes, ciclones y tifones producen perturbaciones por tormentas a gran escala en los bosques tropicales costeros, no son comunes en los sitios PANGEA centrales de las Américas y África (Walsh et al. 2016). La mayoría de las perturbaciones relacionadas con tormentas se producen a escalas muy pequeñas (<0,1 ha) (Espírito-Santo et al., 2014; Negrón-Juárez et al., 2018; Negron-Juarez et al., 2023). Estas perturbaciones a pequeña escala son demasiado pequeñas para ser detectadas con los métodos satelitales contemporáneos (Cushman et al., 2021). Los grandes derribos forestales en la Amazonia pueden abarcar de cientos a miles de hectáreas y son cada vez más comunes (Feng et al., 2023b; Urquiza-Muñoz et al., 2024). Sin embargo, en comparación con los pequeños eventos de derribos por viento, los grandes derribos por viento son raros. Muchas pequeñas perturbaciones forestales por tormentas no pueden atribuirse de forma fiable utilizando los métodos tradicionales de parcelas forestales debido a los intervalos típicamente largos entre censos de árboles (Arellano et al., 2021). Los datos que describen los mecanismos subyacentes a la vulnerabilidad de los árboles a los vientos y rayos asociados a las tormentas también son limitados (Gora et al., 2017; 2020b; Jackson et al., 2019; 2021a, 2021b; Feng et al., 2023a). En términos más generales, la influencia relativa de la falta de carbono y el fallo hidráulico en la mortalidad de los árboles en los trópicos, y los impulsores y mecanismos de estas influencias, siguen siendo importantes lagunas de conocimiento (Anderegg et al., 2016; McDowell et al., 2018; Bauman et al., 2022). Comprender la eficiencia en el uso del carbono y el agua de los ecosistemas forestales tropicales que varía con el tiempo en relación con las tendencias de mortalidad de los árboles y la absorción y respiración de carbono a escala del ecosistema, particularmente en respuesta a eventos extremos, es fundamental para conciliar la dinámica fuente-sumidero de los bosques tropicales (Chambers et al., 2004; Peñuelas et al., 2010; Adams et al., 2019). Avanzar en la comprensión de las distintas respuestas de los ecosistemas a los eventos de mortalidad y perturbación requiere datos integrados sobre la mortalidad de los árboles, la eficiencia en el uso del carbono y el agua, y las tasas de recuperación posteriores a la perturbación que abarcan los regímenes de perturbación, los patrones de composición funcional y el uso de la tierra. PANGEA responderá a las siguientes preguntas:

- **Q14.** ¿Cómo están afectando los cambios en los regímenes de perturbación a la **eficiencia en el uso del carbono (EUC)** y a la **eficiencia en el uso del agua (EUA)** de los diferentes bosques tropicales?
- **Q15.** ¿Cómo varían las tasas y patrones de **mortalidad arbórea** dentro de los bosques tropicales y entre ellos en respuesta a los cambios en los procesos forzantes, incluyendo el clima, el cambio en el uso de la tierra y los regímenes de perturbaciones? ¿Cómo influye la variabilidad temporal y espacial de la mortalidad en la heterogeneidad de las reservas y flujos de carbono tropical en los bosques tropicales?

Para caracterizar la distribución espacial y temporal de la rotación del dosel y las perturbaciones de degradación en los trópicos, PANGEA aprovechará los esfuerzos avanzados para cuantificar la degradación forestal a escala fina desde el espacio utilizando el aprendizaje profundo (por ejemplo, Dalagnol et al., 2023). Con este enfoque, PANGEA investigará la integración de múltiples fuentes de teledetección por

satélite -datos RGB y lidar de drones y aeronaves, datos ópticos comerciales de alta resolución, **Landsat**, **Sentinel-1**, **Sentinel-2**, **GEDI**, **NISAR***, **BIOMASS*** y **EDGE*-** para avanzar en el seguimiento de la mortalidad de los árboles y los regímenes de perturbación natural desde el espacio, en formas que se han intentado previamente con datos lidar aerotransportados (Dalagnol et al., 2021). Los modelos de aprendizaje profundo se entrenarán combinando mediciones de campo de mortalidad y perturbación en los paisajes clave de PANGEA (Sección 6.3) con datos de mortalidad de parcelas de inventario de campo. Para investigar las relaciones emergentes entre regímenes de perturbación, CUE y WUE a través de diferentes paisajes, PANGEA combinará los productos de mortalidad y degradación forestal con estimaciones de alta resolución de WUE y CUE derivadas de datos hiperespectrales, multiespectrales y VOD aerotransportados y espaciales, incluyendo **Landsat**, **ECOSTRESS**, **EMIT** y **AMSR-E**, y probará la solidez de estas relaciones en sitios con flujos de covarianza de Foucault e inventarios de parcelas forestales. Los datos aéreos, especialmente los hiperespectrales, serán fundamentales para evaluar la escalabilidad de estas métricas a partir de árboles con eficiencias de uso del carbono y del agua diferentes y variables hasta ecosistemas enteros. Los mapas de degradación forestal dependientes del espacio y del tiempo se utilizarán para determinar los índices de perturbación en modelos basados en procesos. Tanto los mapas de mortalidad como las relaciones emergentes entre las tasas de mortalidad y la EUA y la CUE se utilizarán para la evaluación comparativa de modelos a lo largo de gradientes ambientales y de influencia antropogénica y entre continentes.

3.2.3 Proceso: Dinámica y gestión de la recuperación

A medida que el cambio climático aumenta la tasa de recurrencia de las perturbaciones naturales, la expansión de la deforestación y la degradación forestal amplifican aún más los regímenes de perturbaciones climáticas en los bosques tropicales (Armenteras et al., 2006; Portela & Rademacher, 2001 Jusys 2018; Hosonuma et al., 2012). Las perturbaciones más frecuentes suponen una amenaza para la resiliencia de los bosques tropicales, con el potencial de influir en transiciones críticas a estados alternativos (Verbesselt et al., 2016; Whitfield et al., 2019; Falk et al., 2022). Sin embargo, para evaluar estos riesgos es imprescindible cuantificar exhaustivamente la frecuencia con la que se producen las perturbaciones, la resistencia del ecosistema a las mismas y el tiempo de recuperación tras los impactos de las perturbaciones (Cole et al., 2014; Longo et al., 2018). Aunque muchas investigaciones se han centrado en los impactos de las perturbaciones (por ejemplo, McDowell et al., 2018; Brando et al., 2014), sigue habiendo grandes incertidumbres sobre las tasas de recuperación. Los bosques tropicales secundarios y degradados en recuperación cubren actualmente alrededor del 10 % de la superficie forestal tropical y tienen un gran potencial como sumideros de carbono (Heinrich et al., 2023). Investigaciones de campo anteriores indicaron que la trayectoria de restauración posterior a la perturbación y las tasas de recuperación, así como las escalas de tiempo, varían considerablemente en los trópicos y dependen de la intensidad y el tipo de perturbación (Poorter et al., 2016; Rutishauser et al., 2015). Además de las tormentas, también es fundamental el impacto de la conectividad geográfica de los cambios en la gestión de la tierra a diferentes escalas. Por ejemplo, los cambios de los sistemas de cultivo intensivo a los sistemas agroforestales y la gestión de la restauración (por ejemplo, la custodia indígena), así como las intervenciones dirigidas a la conservación, pueden dar lugar a la restauración de la biodiversidad y la biomasa locales y a una mayor resiliencia de los sistemas que apoyarán los medios de vida locales (por ejemplo, Ebeling & Yasué 2008; Santika et al., 2017; Mills et al., 2019; Pienkowski et al., 2024). Las regiones tropicales desempeñan un papel cada vez más importante en la agricultura mundial (Alexandratos y Bruinsma, 2012; Berenguer et al., 2021a) y existe una inmensa presión sobre los bosques tropicales debido a la expansión agrícola por la creciente demanda mundial de alimentos, fibras y biocombustibles (Erb et al., 2024; Pendrill et al., 2022). La intensificación de la agricultura para satisfacer la demanda mundial y los medios de subsistencia locales se beneficiará enormemente de los métodos de agricultura de precisión y del seguimiento del ciclo biogeoquímico (por ejemplo, fósforo y nitrógeno) para garantizar soluciones sostenibles. Por otro lado, la

intensificación agrícola y los esfuerzos por mejorar la sostenibilidad también pueden provocar fugas y el desplazamiento de las perturbaciones a otras geografías (Ewers y Rodrigues, 2008; Gan y McCarl, 2007; Henders y Ostwald, 2014, Meyfroidt et al., 2020; Hertel et al., 2019). Para abordar las lagunas de conocimiento relacionadas con la recuperación posterior a la perturbación y la resiliencia de los bosques tropicales vinculada a las prácticas de gestión de la tierra, PANGEA abordará las siguientes preguntas:

- **Q16.** *¿Cómo influyen el tipo y la intensidad de la perturbación -incluidos los diferentes usos del suelo- en el tiempo de recuperación tras la perturbación y en la trayectoria hacia la restauración de la estructura forestal, la composición de especies y la función del ecosistema?*
- **Q17.** *¿Qué actividades humanas y prácticas de gestión apoyan la resiliencia del sumidero de carbono tropical, incluyendo el uso de áreas protegidas y otras medidas de conservación basadas en áreas (OECMs) como las prácticas de comunidades indígenas y territoriales, sistemas agroforestales y prácticas de tala selectiva?*

Para cuantificar las escalas temporales de recuperación tras la perturbación, PANGEA integrará datos procedentes de inventarios de campo en regiones afectadas por perturbaciones con información sobre la edad de la perturbación derivada de teledetección a largo plazo (p. ej., **Landsat**) y la teledetección más reciente de la estructura forestal a partir de lidares (lidares aerotransportados, **GEDI, EDGE***, **NISAR*** y **BIOMASS***), la composición forestal a partir de imágenes hiperespectrales (hiperespectrales aerotransportadas, **EMIT, PRISMA, DESIS, PACE** y **Planet Tanager**), la función de los ecosistemas (**ECOSTRESS, TROPOMI**) y los sistemas agrícolas (**Landsat, EMIT, NISAR*, Planet**) para construir cronosecuencias en paisajes a través de gradientes medioambientales y de gestión. Estas cronosecuencias se utilizarán para reducir las incertidumbres de los modelos basados en procesos que, a continuación, se emplearán para atribuir el papel de los factores ambientales y las diferentes características de las perturbaciones en las escalas temporales de recuperación en todo el ámbito de PANGEA. Al incorporar las limitaciones de la recuperación en los modelos, éstos podrían simular mejor la recuperación de los bosques y las complejas interacciones entre la composición de las especies, la estructura de los bosques y los factores medioambientales. Esto mejorará la capacidad de los modelos de ecosistemas para proyectar futuros cambios en las reservas de carbono bajo regímenes de perturbación alterados e informar sobre los esfuerzos de conservación y restauración (Hérault y Piponiot, 2018; de Paula et al., 2015; Shi et al., 2024; Zhang et al., 2022).

Basándose en diversos marcos CSE, PANGEA adoptará una perspectiva sistémica que se centre en las retroalimentaciones entre los sistemas humanos (incluidos la gobernanza, la política, los mercados, las normas culturales y los valores) y los procesos medioambientales, para comprender mejor cómo influyen las actividades humanas y las prácticas de gestión en la resiliencia de los paisajes tropicales. PANGEA aprovechará los esfuerzos en curso de una variedad de actividades (por ejemplo, **NASA Harvest, SERVIR**) para detectar las actividades humanas y los agroecosistemas, que permiten el mapeo y monitoreo de los recursos naturales (Meemken et al., 2024), y los avances en el tipo de cultivo, el rendimiento y el mapeo del riesgo de desastres (Jain et al., 2016; Azzari et al., 2017; Meza et al., 2020; Song et al., 2021) necesarios para permitir los medios de subsistencia y mejorar el bienestar humano. Para abordar la diversidad de prácticas de gestión entre los diferentes actores en los sistemas tropicales, PANGEA se basará en la categorización global existente de los regímenes de gestión (Lesiv et al., 2022) junto con información local específica sobre la diversidad de opciones de implementación para estos diferentes regímenes. PANGEA también explorará enfoques recientes para extraer información socioeconómica de datos satelitales (Yeh et al., 2020). Mediante el uso de métodos que integran datos de teledetección con información y conocimientos in situ y otros auxiliares, PANGEA avanzará en la medición de los sistemas socioecológicos tropicales e investigará la causalidad para examinar si las retroalimentaciones de los SES apoyan la resiliencia de los sumideros de carbono tropicales y otros procesos ecosistémicos.

3.2.4 Proceso: Retroalimentación del ciclo hidrológico

Los bosques tropicales desempeñan un papel fundamental en el ciclo del agua (van der Ent et al., 2010; Spracklen et al., 2018), y las proyecciones climáticas de la CMIP6 indican aumentos tanto de la sequedad extrema como de la humedad extrema en diferentes partes de los trópicos (Vogel et al., 2020). La deforestación de los bosques tropicales tiene un marcado impacto en las precipitaciones que depende de la escala de la deforestación (Spracklen et al., 2018). Los cambios generalizados inducidos por la degradación en los flujos de agua y energía también podrían afectar al reciclaje de las precipitaciones en los trópicos, pero esta hipótesis aún no se ha comprobado. La degradación forestal tiene un marcado impacto en la evapotranspiración y los flujos de calor sensible (Brando et al., 2019b; Jucker et al., 2018b; Longo et al., 2020; de Oliveira et al., 2021; Rangel Pinagé et al., 2023). Estudios anteriores han encontrado una concordancia alentadora en la magnitud y la variabilidad estacional de la evapotranspiración entre las estimaciones de teledetección y las torres de covarianza de Foucault en bosques tropicales (Melo et al., 2021; Salazar-Martínez et al., 2022), pero se basan en un número muy limitado de sitios. En realidad, existe una considerable variación espacial en la magnitud y estacionalidad de la ET a escala regional y continental (por ejemplo, Baker et al., 2021; Weerasinghe et al., 2020). Los efectos combinados de los cambios en los regímenes de precipitaciones, las temperaturas más cálidas y la expansión de la deforestación y la degradación forestal afectan a las descargas fluviales, los hábitats de agua dulce y la calidad del agua (Lima et al., 2014; Castello y Macedo, 2016); sin embargo, la magnitud prevista de estos impactos es incierta (Guimbarteau et al., 2017; Farinosi et al., 2019). Comprender los efectos netos de los ciclos hidrológicos sobre los recursos de agua dulce también es importante desde el punto de vista económico, ya que muchos países de los trópicos dependen de la energía hidroeléctrica (Arias et al., 2020). Los estudios sobre los recursos tropicales de agua dulce se concentran en América del Sur tropical y rara vez se han estudiado en África y en la cuenca del río Congo (Fugère et al., 2016). Además, los modelos del Sistema Tierra tienen una capacidad limitada para cartografiar la distribución espacial de las precipitaciones en los trópicos porque son incapaces de representar fenómenos de precipitaciones extremas (Negron-Juarez et al., 2024), y existen marcadas diferencias en la forma en que los modelos representan el reciclaje de las precipitaciones en los distintos continentes (Baker y Spracklen, 2022). Los modelos también requieren representaciones precisas de la ET y del flujo de calor sensible para cuantificar el reciclaje de las precipitaciones, así como productos de teledetección para evaluar la ET a escala regional. Para abordar estas lagunas de conocimiento, PANGEA responderá a las siguientes preguntas:

- **Q18.** ¿Cuáles son los **controles hidroclimáticos** directos e indirectos sobre los ciclos del carbono (incluidas las emisiones de CO₂ y CH₄), la energía y el agua de los bosques tropicales?
- **Q19.** ¿Cómo influye el **reciclado de las precipitaciones** en la resistencia o **vulnerabilidad del equilibrio de carbono forestal** ante los **cambios en los regímenes de perturbaciones**, los cambios en la cubierta terrestre y en el uso del suelo, y el aumento del CO₂ atmosférico?
- **Q20.** ¿Cómo están alterando el clima y los cambios en el uso de la tierra las **propiedades biofísicas de la superficie terrestre** que influyen en la fuerza de las interacciones tierra-atmósfera?
- **Q21.** ¿Cómo alteran la **deforestación**, la **degradación** forestal y la **regeneración** forestal los **ciclos hidrológicos** regionales en las regiones tropicales, incluidos los regímenes de precipitaciones y los recursos de agua dulce?

Para investigar los impulsores hidroclimáticos de la función de los ecosistemas en los trópicos, PANGEA integrará mediciones meteorológicas y de covarianza de remolinos in situ con recuperaciones por satélite del contenido de vapor de agua y precipitaciones (**GOES-R, GPM**), temperatura de la superficie terrestre, evapotranspiración y estrés evaporativo (**ECOSTRESS**) y SIF (**FLEX***, **TROPOMI**, **OCO- 2/3**). Además, PANGEA empleará datos de **SMAP**, **SMOS**, **NISAR**, **AMSR-E** y **EMIT** para medir la humedad del suelo, el contenido de agua de las copas de los árboles, los rasgos hidráulicos y el estrés térmico. Para cuantificar

aún más las propiedades biofísicas de la superficie terrestre, PANGEA también obtendrá el albedo de la superficie y otros flujos de radiación de superficie de **VIIRS** y **GOES-R**. Las mediciones hidrológicas superficiales de **SWOT** se utilizarán para caracterizar las masas de agua terrestres tropicales (lagos, embalses, humedales) y evaluar los recursos de agua dulce. Estos conjuntos de datos se utilizarán junto con los cambios en la estructura, función y composición de las especies forestales asociados con la deforestación y la degradación de los bosques (Sección 3.2.3) para evaluar las relaciones emergentes entre los diferentes tipos de cubierta terrestre y los cambios en el uso de la tierra con los cambios en las precipitaciones y el almacenamiento de agua en todo el dominio PANGEA. Estos conjuntos de datos también proporcionarán condiciones iniciales y de contorno para los modelos basados en procesos (Sección 6.3) que exploran el alcance de la deforestación y la degradación forestal y proporcionarán puntos de referencia sobre los impactos de la deforestación y la degradación en los ciclos del agua, la energía y el carbono a diferentes escalas del paisaje. Las mediciones terrestres y los conjuntos de datos aéreos y satelitales obtenidos a través de PANGEA también proporcionarán conjuntos de datos críticos para evaluar la capacidad de los Modelos del Sistema Tierra para representar el reciclaje de las precipitaciones en los diferentes continentes.

3.3 Proyecciones

3.3.1 Proyecciones: Ciclos del carbono, el agua, la energía y los nutrientes

Los futuros patrones de precipitación en los trópicos son inciertos, pero las simulaciones de modelos del sistema terrestre sugieren que la precipitación media anual en Sudamérica tropical podría disminuir, mientras que la precipitación media anual en África Central podría mantenerse similar o incluso aumentar (Dobler et al., 2024). Sin embargo, la estabilidad en la precipitación media anual no significa estabilidad en el ciclo hidrológico. Por ejemplo, la estacionalidad de las precipitaciones puede acentuarse con una mayor variabilidad interanual (Gloor et al., 2013), y las tendencias al calentamiento pueden aumentar la sequedad atmosférica y del suelo, aunque las precipitaciones se mantengan similares a las medias históricas (Cook et al., 2020; Ukkola et al., 2020). Los efectos del CO₂ atmosférico sobre el hidroclima dependen de múltiples factores que interactúan y son inciertos. Por ejemplo, un nivel elevado de CO₂ puede reducir la transpiración a nivel foliar debido a una menor conductancia estomática (Sampaio et al., 2021), pero los cambios en el índice de área foliar y el número de estomas también afectarán a la respuesta a nivel de ecosistema (Li et al., 2018). La deforestación y la degradación forestal en toda la Amazonía (Spracklen et al., 2018; Baudena et al., 2021) podrían afectar potencialmente a las precipitaciones a través de impactos importantes en la evapotranspiración, la interceptación del dosel, la escorrentía y el almacenamiento de agua (Heerspink et al., 2020), aunque existe una gran incertidumbre sobre la magnitud de este efecto en los estudios de modelización (por ejemplo, Pires y Costa 2013; Swann et al., 2015).

Los cambios en el hidroclima, el CO₂ atmosférico, la cubierta terrestre y el cambio en el uso del suelo también interactúan con los cambios en el ciclo de los nutrientes, por lo que es fundamental comprender estas retroalimentaciones. La disponibilidad de fósforo y potasio influye en la productividad primaria neta durante las sequías (Manu et al., 2024), y el nitrógeno puede ser un importante factor limitante en los bosques secundarios (Davidson et al., 2007). Las investigaciones sugieren que los efectos de la fertilización con CO₂ pueden verse muy reducidos cuando el fósforo es un factor limitante (Yang et al., 2016; Fleischer y Terrer 2022). Sin embargo, nuestra comprensión de las retroalimentaciones entre el ciclo de los nutrientes y otros impulsores (clima, fertilización por CO₂ y cambios en la cubierta terrestre y en el uso del suelo) procede de experimentos de manipulación pequeños y localizados, lo que dificulta la ampliación a paisajes muy heterogéneos y a escalas continentales (Townsend et al., 2008). Mediante la integración de mediciones coordinadas a través de paisajes y escalas, PANGEA abordará las siguientes cuestiones:

- **Q22.** ¿Cómo alterarán los cambios en los regímenes de precipitaciones, el aumento de las temperaturas y los cambios en la dinámica de las perturbaciones en los bosques tropicales el **equilibrio hídrico terrestre** a través de los cambios en el momento y la duración de las precipitaciones estacionales, la evapotranspiración y la humedad del suelo?
- **Q23.** ¿Cómo afectarán los futuros cambios en la vegetación, incluida la deforestación, la degradación y el rebrote, al clima y la hidrología locales, regionales y continentales?
- **Q24.** ¿Cómo afectarán el aumento de las temperaturas, el CO atmosférico, y los fenómenos climáticos extremos a la disponibilidad de nutrientes y a las interacciones entre el suelo y la vegetación?

Considerando que estas preguntas explorarán simulaciones de cambios futuros a través de los trópicos, PANGEA utilizará modelos basados en procesos (Sección 6.3) que estarán completamente integrados con la teledetección (Sección 6.2). Por ejemplo, para inicializar los modelos mecanicistas basados en cohortes e individuos con una estructura y composición forestal realista y observada a través de gradientes ambientales, PANGEA integrará datos multiespectrales, hiperespectrales, lidar y radar recogidos tanto a través de las campañas aéreas de PANGEA como de mediciones por satélite (**GEDI, EMIT, VIIRS, Sentinel-3, NISAR***, imágenes visibles a infrarrojos de onda corta [**VSWIR***] de **SBG**). Las relaciones emergentes basadas en la teledetección relativas a la estructura, composición y función de los bosques (Sección 3.1.2), así como las variables hidroclimáticas y de estrés hídrico obtenidas por teledetección (Sección 3.1.3) se utilizarán para evaluar y reducir la incertidumbre del modelo. Además, las concentraciones de nutrientes del dosel estimadas a partir de la teledetección hiperespectral guiada por las características geomorfológicas derivadas del lidar se utilizarán para informar sobre los patrones y los impulsores de las distribuciones de nutrientes a través de paisajes forestales tropicales heterogéneos. A continuación, los modelos optimizados se aplicarán a una serie de simulaciones representativas para cuantificar y distinguir el papel de los cambios en el clima, el CO atmosférico₂, la cubierta terrestre y el uso del suelo a la hora de impulsar cambios en los ciclos biogeofísicos y biogeoquímicos.

3.3.2 Proyecciones: Resiliencia forestal heterogénea

Es probable que el cambio climático y la expansión de la deforestación y la degradación forestal en los trópicos expongan a los bosques a perturbaciones antropogénicas y naturales más frecuentes (Seidl et al., 2017; Lapola et al., 2023). Los cambios generalizados en los regímenes de perturbaciones tendrán profundos efectos en la estructura, composición y función de los ecosistemas y, a su vez, en los numerosos servicios ecosistémicos locales, regionales y mundiales que proporcionan los bosques tropicales (Malhi et al., 2014). Sin embargo, el impacto a largo plazo del cambio de los regímenes de perturbaciones en los bosques tropicales dependerá, en última instancia, de varios factores que aún no se conocen bien en los ecosistemas tropicales: (1) el impacto relativo de los cambios de intensidad y frecuencia de las perturbaciones (Williams et al., 2013); (2) la variabilidad de la resiliencia a las perturbaciones y la recuperación posterior a las perturbaciones entre especies y paisajes (Anderson-Teixeira et al., 2013, Powell et al., 2018; Liu et al., 2022); (3) las interacciones entre múltiples perturbaciones que afectan a la misma región; (4) las retroalimentaciones entre los cambios en la estructura y composición de los bosques provocados por las perturbaciones y las perturbaciones posteriores o adicionales (Silvério et al., 2019; Brando et al., 2020b); y (5) los impactos de las perturbaciones en los servicios ecosistémicos y los medios de vida de las personas (Mamalakis et al., 2021). Avanzar en la cuantificación basada en la observación y en la comprensión de los procesos de estos factores es fundamental para mejorar las capacidades de modelización. Por lo tanto, la investigación en PANGEA abordará las siguientes cuestiones:

- **Q25.** En un clima cambiante, ¿qué **tipos de bosques funcionalmente** distintos son más vulnerables a convertirse en fuentes netas de carbono a la atmósfera, qué tipos de bosques son resistentes y por qué?
- **Q26.** ¿Cómo interactuarán el calentamiento del clima y los cambios en los fenómenos extremos con la cubierta terrestre y el cambio en el uso del suelo para influir en **los cambios en los regímenes de incendios** y en su retroalimentación con la función forestal y el clima?
- **Q27.** ¿Cómo afectarán los futuros cambios climáticos y los fenómenos extremos al ciclo del carbono en los bosques tropicales? ¿Cuál es el umbral en el que se producirá **una transición a gran escala** en la composición funcional y/o las regiones se convertirán en una fuente neta de carbono?
- **Q28.** ¿Cómo interactuarán el cambio climático y el cambio en el uso de la tierra con la vulnerabilidad cambiante de los bosques tropicales, para influir en la disponibilidad de los servicios ecosistémicos y el acceso a **los cobeneficios socioecológicos**, incluyendo la disponibilidad de agua, la producción agrícola, la salud humana, la reducción del riesgo de desastres y las prácticas culturales?

Se utilizarán modelos basados en procesos y en sistemas socioecológicos (por ejemplo, modelos basados en agentes, bioeconómicos, de desequilibrio o de redes) para cuantificar los impactos de los cambios en los regímenes de perturbación en los bosques tropicales hiperdiversos, y las consecuencias para las provisiones y servicios de los ecosistemas que pueden afectar las actividades económicas y los medios de subsistencia de los Pueblos Indígenas y las Comunidades Locales. Para los modelos basados en procesos, PANGEA utilizará el mismo enfoque descrito en la Sección 3.3.1 para generar las condiciones iniciales y de contorno. Del mismo modo, las relaciones emergentes entre la diversidad funcional y las tasas de recuperación se derivarán utilizando datos de mediciones terrestres e investigaciones socio-ecológicas realizadas con investigadores y comunidades locales, campañas aerotransportadas combinadas con flujos de datos de SIF (**TROPOMI, OCO-2/3, FLEX***), mediciones infrarrojas térmicas (**ECOSTRESS, GOES-R, MTG- I**), y las cronosecuencias de la recuperación de los ecosistemas basadas en la teledetección (Sección 3.2.3). Para cuantificar los impactos de los bosques tropicales en los beneficios sociales y ecológicos colaterales, PANGEA llevará a cabo una investigación integrada de los sistemas sociales y ecológicos para comprender mejor los patrones y la influencia del uso de la tierra y su cambio, incluyendo la deforestación, la degradación, la restauración forestal, la sequía y las inundaciones, los regímenes de incendios y las temperaturas extremas en los biomas tropicales. PANGEA también estudiará las retroalimentaciones entre los sistemas sociales y ecológicos, desde la gestión forestal tradicional, local e indígena hasta los sistemas industriales, y cómo estos sistemas afectan a la resiliencia de los ecosistemas y a la provisión de servicios ecosistémicos. PANGEA integrará datos sociales y ecológicos en modelos existentes (por ejemplo, Andersen et al., 2017; von Essen y Lambin, 2023) y desarrollará nuevos modelos para captar las retroalimentaciones dentro de los sistemas socioecológicos bajo diferentes condiciones económicas, culturales, ambientales y de gobernanza.

4 Avances científicos y técnicos de PANGEA

PANGEA aprovechará décadas de esfuerzos científicos, incluidos grandes proyectos como LBA (Avissar et al., 2002; Davidson et al., 2012), redes internacionales de parcelas de inventario forestal (por ejemplo, ForestPlots.net et al., 2021), y múltiples esfuerzos de desarrollo de modelos, incluyendo (pero sin limitarse a) la Oficina de Modelización y Asimilación Global (GMAO) de la NASA, el GISS BiomeE de la NASA (Weng et al., 2022) y el modelo FATES apoyado por el DOE que se está desarrollando como parte de NGEE-Tropics (Koven et al., 2020; Huang et al., 2020; Xu et al., 2023; Knox et al., 2024; Shuman et al., 2024). A pesar de estos esfuerzos, los intentos de evaluar la resiliencia de los bosques tropicales a las perturbaciones

han arrojado resultados inconsistentes. Los estudios de campo sugieren que los bosques centroafricanos pueden ser más resistentes a las condiciones climáticas cambiantes y pueden ofrecer un sumidero de carbono a más largo plazo en comparación con otros bosques tropicales (Hubau et al., 2020; Bennett et al., 2021). Sin embargo, los estudios de teledetección por satélite indican que los bosques centroafricanos son tan sensibles a las anomalías climáticas como el Amazonas y otras regiones forestales tropicales (Liu et al., 2017; Palmer et al., 2019). Las incoherencias entre las mediciones de campo y las observaciones por satélite deben conciliarse para predecir el impacto del cambio climático en el papel de estos bosques en los ciclos globales del carbono y el agua. Varios factores pueden explicar estas inconsistencias, incluyendo (1) tasas cambiantes de mortalidad de los árboles, (2) diferente sensibilidad de la fotosíntesis, tasas de respiración y otros procesos del ecosistema, (que alteran los flujos netos de carbono y agua), a las perturbaciones naturales y antropogénicas, (3) diferentes intensidades y patrones de deforestación y degradación en la estructura y función del ecosistema, (4) diferentes trayectorias evolutivas que han dado lugar a una biodiversidad única e interacciones de especies que influyen directamente en la resiliencia del ecosistema (por ejemplo, (5) datos espaciales y temporales limitados y modelos incompletos o poco desarrollados).

PANGEA investigará los factores que podrían explicar las diferencias en las respuestas de los bosques tropicales en los distintos continentes, las incoherencias (señaladas anteriormente), y otros factores determinados por la comunidad PANGEA, añadiendo una visión pantropical obteniendo nuevos conocimientos a partir de mediciones de teledetección multidimensional mejoradas con mediciones colocadas y coincidentes y análisis novedosos. PANGEA hace hincapié en la integración de mediciones terrestres y conjuntos de datos de teledetección para los bosques tropicales, apoyando el desarrollo de algoritmos y modelos de teledetección y la integración de modelos y datos. Prevemos avances científicos significativos a partir de mediciones coordinadas y ciberciudadanas, tanto remotas como terrestres, y del uso de la información de las partes interesadas, incluida la procedente de los conocimientos ecológicos indígenas, tradicionales y locales, en el marco de un esfuerzo científico de colaboración que da prioridad a la transdisciplinariedad. Para hacer avanzar las capacidades y soluciones científicas y tecnológicas, PANGEA

- **Elucidar** los patrones de cambio reciente (5-30 años) y en curso en los paisajes, dinámicas y retroalimentaciones de los bosques tropicales, así como sus diferencias geográficas, haciendo hincapié en las comparaciones entre las Américas y África.
- **Aumentar la** comprensión de los procesos que controlan la heterogeneidad y la vulnerabilidad de los paisajes forestales tropicales al cambio estructural y funcional.
- **Mejorar** las capacidades de teledetección para medir, cartografiar y supervisar la biodiversidad, la dinámica del ciclo del carbono y los sistemas agrícolas.
- **Proporcionar** proyecciones mejoradas de los cambios futuros en los paisajes forestales tropicales, que englobarán las retroalimentaciones en los climas locales, regionales y globales y en los sistemas socioecológicos.

Estos avances científicos serán posibles gracias a los avances técnicos:

- **Integración de** los datos obtenidos en tierra y por teledetección, lo que permite calibrar de forma más fiable las variables obtenidas por teledetección;
- **Escalado** de datos y flujos de trabajo para el análisis integrado de datos terrestres y de teledetección;
- **Avances** en el uso de la IA y el aprendizaje automático para la asimilación, fusión y escalado de datos;
- **Desarrollo** de datos-modelos-integración que mejoren la representación de los componentes funcionalmente importantes de la diversidad de los bosques tropicales que sean escalables con teledetección;

- **Mejora de la** precisión y la validación, y **perfeccionamiento de las** estimaciones de incertidumbre de los productos de datos derivados de la teledetección.

PANGEA caracterizará la estructura y función de los ecosistemas en múltiples dimensiones, desde ecosistemas forestales tropicales intactos a degradados y de alta a baja diversidad. PANGEA medirá la diversidad taxonómica y filogenética de los árboles, así como los índices demográficos de la vegetación, utilizando datos terrestres existentes de parcelas de inventario forestal a largo plazo, y la diversidad funcional y estructural mediante teledetección. La coincidencia de imágenes hiperespectrales de teledetección y las mediciones in situ de los rasgos foliares cartografiarán los rasgos del dosel y las distintas comunidades funcionales, además de evaluar modelos escalables aprovechando las mediciones por satélite. Utilizando estos resultados, caracterizaremos las diferencias a través de gradientes abióticos, de uso del suelo y bióticos. Las mejoras resultantes en nuestra comprensión de las distribuciones de rasgos mejorarán nuestros modelos de flujos de ecosistemas bajo forzamientos de cambio climático y de cambio de uso de la tierra y nos permitirán evaluar las diferencias en las respuestas de los ecosistemas. Con esta combinación de mediciones y modelos, PANGEA abordará cómo las diferentes estructuras y funciones de los bosques tropicales influyen en su estabilidad frente a los impactos del cambio climático y del uso del suelo.

La integración de datos terrestres y de teledetección en el desarrollo y evaluación de modelos es parte integrante de PANGEA (Sección 6.3). Se utilizarán mediciones in situ y de teledetección (por ejemplo, hiperespectrales y lidar) a través de gradientes críticos para reducir la incertidumbre de los parámetros y proporcionar condiciones iniciales y de contorno para los modelos basados en procesos. Los equipos de PANGEA emplearán modelos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para obtener conjuntos de datos de síntesis que escalen las mediciones en los emplazamientos intensivos de PANGEA y los emplazamientos asociados a los dominios centrales y ampliados de PANGEA mediante teledetección por satélite. Estos conjuntos de datos de síntesis se utilizarán para parametrizar y comparar modelos basados en procesos y modelos de sistemas socioecológicos a gran escala, y proporcionarán condiciones de contorno para modelos inversos. La integración de modelos y datos será fundamental para responder a las preguntas clave de PANGEA (Sección 3), que servirán de base para muchos estudios que pretenden (1) comprender el papel de la diversidad estructural y funcional en el control de los ciclos del carbono, el agua, la energía y los nutrientes de los bosques tropicales; (2) investigar cómo el aumento de los niveles de CO₂ y el aumento de las temperaturas afectan específicamente a las tasas de secuestro de carbono en los bosques tropicales; (3) cuantificar los impactos de los fenómenos extremos, como las sequías severas, en la salud de los bosques y la emisión de CO₂ y CH₄; (4) avanzar en la comprensión de las consecuencias de la deforestación y la degradación forestal sobre la biodiversidad, los ciclos biogeofísicos y biogeoquímicos, los servicios ecosistémicos y el hidroclima; (5) evaluar la eficacia de las estrategias de restauración sobre la resiliencia de los bosques tropicales y la mitigación del cambio climático; y (6) caracterizar el riesgo de que los bosques tropicales alcancen transiciones críticas a estados alternativos debido al cambio climático, la deforestación y la degradación forestal, y determinar el papel de la biodiversidad en la mitigación de tales vulnerabilidades.

5 Papel fundamental de la teledetección de la NASA

PANGEA pretende determinar si los diferentes bosques tropicales compartirán el mismo destino o variarán sus respuestas a los efectos del cambio climático y de uso del suelo, con especial atención a los continentes de África y América, que albergan los dos mayores bosques tropicales de la Tierra.

Identificar los procesos que dan lugar a la estabilidad de los bosques tropicales es primordial para limitar la incertidumbre en las predicciones de la futura dinámica del flujo de carbono terrestre. Para conciliar las diferencias entre los conjuntos de datos terrestres y satelitales, mejorar las estrategias de escalado, avanzar en el seguimiento futuro y caracterizar cómo y por qué los bosques tropicales centroafricanos y americanos difieren en su resistencia al rápido cambio climático, necesitamos recuperaciones aéreas coordinadas. Por ejemplo, se necesita una resolución espacial suficientemente alta (~2-5 m) para escalar adecuadamente la dinámica de hojas y árboles a nivel de organismo a los paisajes, sirviendo de intermediario entre las mediciones de campo y las observaciones por satélite (**Figura 14**). PANGEA se basa directamente en los desarrollos a escala y los éxitos de NASA ABoVE en Norteamérica (por ejemplo, Virkkala et al., 2021; Peltola et al., 2019; Braghieri et al., 2023), que arrojan nueva luz sobre sistemas árticos previamente poco estudiados.

Para abordar sus objetivos científicos, PANGEA aprovechará el Programa Científico Aerotransportado de la NASA para obtener datos de alta resolución de sistemas hiperespectrales, lidares de pequeño tamaño, radares de apertura sintética (SAR) y otros sistemas de teledetección sobre bosques tropicales de África Central y América. La obtención de datos de alta resolución espacial- y espectral- en estas regiones permite una evaluación sin precedentes de la dinámica forestal, incluyendo flujos, crecimiento, mortalidad y estrategias funcionales (por ejemplo, eficiencia en el uso de nutrientes y agua, fenología) a la resolución de árboles individuales a través de grandes paisajes que varían en su composición de especies, características del suelo, topografía, regímenes de perturbación e interacciones humanas.

La nubosidad persistente es un problema importante a la hora de utilizar XCO₂ y XCH₄ desde el espacio para limitar los flujos tropicales de gases de efecto invernadero (p. ej., Rayner et al., 2002; Qu et al., 2021). Incluso con la mayor resolución espacial de los actuales sensores satelitales de órbita terrestre baja que recuperan XCH₄ (p. ej., **TROPOMI** [3,5 km × 7,0 km]) y XCO₂ (p. ej., **OCO-2** [1,3 km × 2,2 km]), más del 95% de la información recuperada se filtra debido a las nubes en los trópicos (Qu et al., 2021). Los sensores satelitales XCO₂ y XCH₄ de mayor resolución espacial, como el recientemente lanzado MethaneSat (100 m × 400 m), mejorarán en gran medida la capacidad de recuperar el flujo tropical a través de los vacíos de nubes. Otros sensores de satélite de cartografía de fuentes puntuales (por ejemplo, **EMIT**, **GHGSat**, **Carbon Mapper**, **PRISMA**) se han lanzado con una resolución espacial muy alta (<100 m × 100 m). Sin embargo, estas observaciones en modo objetivo no proporcionarán la cobertura global necesaria para restringir los presupuestos de gases de efecto invernadero tropicales. La nubosidad también afectará a las estimaciones de la temperatura de la superficie terrestre y la evapotranspiración a partir de la teledetección térmica, lo que requerirá métodos de corrección de sesgos (Van Niel et al., 2012).

PANGEA obtendrá una gran variedad de observaciones aéreas y terrestres coincidentes con sobrevuelos de satélites existentes de la NASA (por ejemplo, **OCO-2/3**, **EMIT**, **PACE**, **VIIRS**, **SMAP**, **GRACE**, **SWOT**, **AMSR-E**, **AMSR2**, **ICESat-2**, **Landsat**, **GEDI**), internacionales (por ejemplo, **TROPOMI**, **GOSAT**, **GOSAT-2**, **CO2M**, **RADARSAT**, **Envisat**, **PRISMA**, **DESIS**) y comerciales (**GHGSat**, **MethaneSat**, **WorldView**, **QuickBird/GeoEye**, **Planet**). Estas observaciones ayudarán a validar los datos obtenidos por estos satélites sobre la estructura de los bosques, los rasgos foliares, la diversidad de los bosques, las inundaciones, las precipitaciones, la dinámica de las perturbaciones y la composición atmosférica. También ayudarán a

evaluar la capacidad de los futuros sensores de satélite previstos (por ejemplo, **NISAR**, **SBG**, **BIOMASS**, **CHIME** (Misión Copérnico de Imágenes Hiperespectrales para el Medio Ambiente), **GLIMR**, **FLEX**, **Carbon Mapper**) y las estrategias de observación. PANGEA permitirá investigar las características necesarias de los instrumentos (por ejemplo, precisión, exactitud, resolución espacial/espectral) y las estrategias de observación (por ejemplo, órbita terrestre baja frente a geoestacionaria) para vigilar las emisiones de gases de efecto invernadero y las numerosas variables que determinan la dinámica fuente-sumidero tropical.

6 Estrategia de investigación y diseño del estudio

Al igual que en anteriores proyectos de la NASA, PANGEA permitirá a los investigadores estudiar las principales cuestiones científicas (Sección 3) respondiendo a las convocatorias de propuestas de la NASA. Se buscará cofinanciación, por lo que presentamos un diseño de proyecto modular y flexible. La investigación integrará estudios científicos terrestres, aéreos y por satélite, así como modelos que permitan una interpretación eficaz de los datos actuales y futuros obtenidos por satélite. Basándose en anteriores proyectos de la NASA en los trópicos, PANGEA se diseñará conjuntamente con instituciones y socios locales para facilitar colaboraciones y establecer nuevas relaciones dentro de la comunidad científica, con especial énfasis en las interacciones entre científicos de EE.UU. y de países con bosques tropicales. A lo largo de la definición científica y de los años del proyecto, PANGEA trabajará para implicar y formar a los científicos que inician su carrera, tanto de EE.UU. como de las instituciones locales de los bosques tropicales. PANGEA dejará un legado de datos abiertos, ciencia abierta, desarrollo de capacidades y asociaciones reforzadas, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones.

6.1 Enfoque general del estudio

La comprensión de los bosques tropicales a escala mundial, relevante para las políticas, requiere la teledetección por satélite.
requiere la teledetección por satélite.

La utilidad de la teledetección en los bosques tropicales depende de la integración multiescala de datos y conocimientos. La abundancia de nuevos datos satelitales, aéreos y terrestres puede combinarse ahora con nuevas capacidades de análisis de datos. También existe ahora una capacidad mucho mayor para llevar a cabo análisis numéricamente intensivos en comparación con anteriores proyectos TE de la NASA como LBA, con computación en la nube, recursos computacionales avanzados y capacidades de aprendizaje automático e IA en rápida evolución para la clasificación, regresión y predicción. Sin embargo, la escasez de observaciones y datos de etiquetas para entrenar y validar modelos de IA ávidos de datos, y el limitado conocimiento de los procesos ecológicos de las regiones tropicales hasta la fecha, han dado lugar a importantes retos en la mejora de los productos satelitales y la interpretación de los hallazgos científicos extraídos de estos productos. Siguen existiendo desajustes en la escala de los datos obtenidos por casi todos los satélites en los trópicos. Para superar estas limitaciones y avanzar en la utilidad de la teledetección por satélite sobre los biomas forestales tropicales, PANGEA se basa en los enfoques de escala desarrollados durante anteriores proyectos de campo TE de la NASA, como BOREAS, LBA y ABoVE. PANGEA reconciliará los desajustes de escala a través de mediciones terrestres, desde torres, drones, aviones y satélites, en combinación con avances en la comprensión de los procesos que sustentan la teoría de la escala. El resto de la Sección 6 describe la Estrategia de Ciencia a Escala (Sección 6.1.1), el Cronograma Nocial (Sección 6.1.2), las Mediciones Científicas Esenciales a través de las escalas (Sección

6.2), así como el enfoque de Modelado, Síntesis de Datos y Análisis Integrativo para unirlo todo (Sección 6.3).

6.1.1 Estrategia de ampliación científica de PANGEA

El diseño de muestreo anidado y la estrategia de ciencia a escala de PANGEA brindan oportunidades para avanzar en el seguimiento por satélite, el desarrollo de productos, la asimilación de datos y la evaluación comparativa de procesos en modelos de ecosistemas de próxima generación. Estos avances pueden mejorar significativamente la capacidad de las partes interesadas de aplicar modelos para mejorar la comprensión y la predicción a largo plazo de los procesos.

La estrategia de ciencia a escala de PANGEA implementa un enfoque de sistemas integrados que abarca mosaicos de paisajes complejos que abarcan desde bosques hasta humedales y turberas, desde bosques intactos hasta bosques alterados, y sistemas agrícolas y socioecológicos. Para asegurar que los procesos son capturados a través de una amplia diversidad de condiciones ambientales y múltiples fuentes de datos -sensores terrestres, torres, drones y aviones- los proyectos de campo y aéreos de Pangea incluirán muestreos a través de gradientes en la estructura y función del ecosistema, clima, geomorfología y suelos, disponibilidad de nutrientes y regímenes de perturbación. La incorporación de esta variabilidad es fundamental para escalar a escala regional y pantropical y para informar a los modelos y garantizar que puedan evaluarse y compararse en diferentes condiciones, reduciendo así el riesgo de equifinalidad, es decir, obtener las respuestas correctas debido a compensar las razones equivocadas. La elección de los gradientes prioritarios tendrá en cuenta las incertidumbres actuales de los modelos y los procesos novedosos que aún no se han evaluado con datos de teledetección a escala (por ejemplo, los cambios temporales en la estructura y composición del dosel y sus repercusiones en los flujos de energía, agua y carbono; las respuestas hidráulicas de las plantas a la variabilidad climática).

Las recuperaciones por teledetección suborbital (por ejemplo, drones y aviones) son fundamentales para establecer una escala entre las mediciones terrestres y las recuperaciones por satélite de resolución más gruesa. PANGEA se apoya en proyectos de campo y aéreos de gran éxito de la NASA en África y América, como SAFARI 2000, AfriSAR-1 y -2, BioSCape y varias misiones suborbitales de Earth Venture (EVS).

Las diferencias entre la huella de aproximadamente 1 km de los flujos de covarianza de Foucault basados en torres y las recuperaciones satelitales de resolución >2 km de la productividad primaria bruta, los flujos de metano y la respiración del ecosistema requieren reconciliación (por ejemplo, Li et al., 2018). Del mismo modo, la recuperación de atributos estructurales a nivel de árboles y copas a partir de lidar es necesaria para vincular los procesos y la dinámica de los organismos con las respuestas de los ecosistemas observadas a escalas de paisaje. Además, se ha demostrado que la variación vertical en la estructura forestal varía con la función del ecosistema, incluso cuando las métricas integradas verticalmente, como el índice de área foliar (LAI), no lo hacen (Ordway et al., 2022). El lidar espacial proporciona observaciones a escala comunitaria que, aunque increíblemente valiosas, siguen siendo insuficientes para emparejarlas con mediciones *in situ* a nivel de árbol. Debido a que estos datos espaciales exceden las dimensiones de la copa de un árbol, no permiten la recuperación de métricas a nivel de copa y de árbol, o métricas de ecosistema a escala fina como la detección de huecos en el dosel y la mortalidad de los árboles.

Otro ejemplo es el uso de datos hiperespectrales de teledetección para estimar métricas de biodiversidad. Las recuperaciones hiperespectrales de la parte superior del dosel de EMIT, PACE, SBG y CHIME tienen el

potencial de producir recuperaciones directas de la diversidad espectral de las plantas (Cawse-Nicholson et al., 2021; Schimel et al., 2020), que también pueden utilizarse para estimar la diversidad ecosistémica (Féret y Asner, 2014) y beta (Schweiger y Laliberte, 2022), la diversidad funcional de las plantas (Cawse-Nicholson et al., 2021; Rocchini et al., 2022; Thompson et al., 2021) y, en algunos casos, la diversidad taxonómica de las plantas (Schimel et al., 2020; Rossi y Gholizadeh, 2023). La fusión de estas recuperaciones y métricas con datos y conocimientos sobre el movimiento de los animales, las interacciones entre plantas y animales, el ensamblaje de comunidades multitaxa y la variación estructural de los ecosistemas a partir de IEK, TEK y LEK, así como eDNA, bioacústica, cámaras trampa y otros conjuntos de datos de teledetección (p. ej., **GEDI**, **NISAR**, **SWOT**) tiene el potencial de producir estimaciones y aproximaciones indirectas adicionales de la biodiversidad. Este enfoque integrador puede, por ejemplo, mejorar la aplicación de programas de incentivos basados en el carbono (Castro-Magani et al., 2021), o mejorar los servicios nacionales y maximizar los beneficios sociales (Schiavon et al., 2023). Sin embargo, actualmente se carece de datos de calibración y validación en los trópicos, para probar la generalizabilidad de los algoritmos existentes. Por ejemplo, es necesario abordar adecuadamente la resolución espectral, el tamaño del píxel y la coexistencia de múltiples especies arbóreas en un píxel dado, o la resolución temporal para cuantificar los procesos diurnos característicos asociados a esas especies (Schimel et al., 2020; Rocchini et al., 2022). La diversidad de miembros finales es un enfoque para abordar algunos de estos retos (Rossi y Gholizadeh, 2023). Además, los mapas de rasgos funcionales todavía requieren la estimación mediante modelos calibrados para sitios específicos basados en mediciones de rasgos foliares *in situ* (por ejemplo, Chadwick y Asner 2016a), y se ha realizado un trabajo muy limitado para explorar la fusión de tipos de datos dispares para desarrollar métricas o indicadores basados en procesos (Mairotta et al., 2015; Schimel et al., 2020; Ordway et al., 2022; Portillo-Quintero et al., 2022).

PANGEA se coordinará con los marcos de escalado existentes, facilitando la normalización de los métodos de recopilación de datos.

El equipo EMIT de la NASA está trabajando activamente con la Red Nacional de Observatorios Ecológicos (NEON) para desarrollar flujos de trabajo de escalado entre los datos de NEON y de satélite en preparación de la próxima misión Biología y Geología de Superficie (SBG) de la NASA. Las adquisiciones terrestres y aéreas de PANGEA extenderán estos flujos de trabajo a los trópicos. PANGEA también se coordinará con otras iniciativas financiadas por la NASA, como [CMS4D](#), un prototipo de sistema de fusión de datos multiescala para la vigilancia de la dinámica del carbono desde el espacio. CMS4D, dirigido por Carlos Alberto Silva, es un estudio de caso en el Cerrado brasileño centrado en la dinámica del fuego, que tiene muchos paralelismos de flujo de trabajo con PANGEA. La coordinación con estos esfuerzos para estandarizar y armonizar la recopilación de datos y los flujos de trabajo de escalado ayudará a garantizar datos coherentes y de alta calidad, permitiendo una colaboración más amplia y la validación cruzada de los resultados. Un excelente ejemplo de este tipo de trabajo colaborativo es la Red de Ecología de Drones de Altas Latitudes (HiLDEN) (<https://arcticdrones.org/>), que PANGEA pretende emular en los biomas tropicales. PANGEA también aprovechará otros esfuerzos de colaboración sobre el terreno, como la iniciativa de la Sociedad para la Protección de las Redes Subterráneas (SPUN), que se ha centrado en el muestreo de hongos micorrízicos en zonas históricamente poco muestreadas (<https://www.spun.earth/>). Estas redes demuestran el poder de la coordinación y el compromiso sobre el terreno para colmar lagunas en los datos de los ecosistemas, un enfoque que PANGEA adoptará en sus múltiples escalas de estudio. Este enfoque multiescala de los conjuntos de datos de campo, aéreos y satelitales hará avanzar la vigilancia por satélite y la capacidad de los modelos de próxima generación para simular procesos clave y mejorar las predicciones a largo plazo de los ecosistemas.

Para avanzar eficazmente en el uso de la teledetección por satélite se requiere una recopilación de datos e información rigurosa, creativa y reflexiva, así como la integración de conocimientos a través de escalas espaciales y temporales. Una década de esfuerzos coordinados durante el proyecto ABoVE de la NASA permitió avanzar en la comprensión de las transiciones y no linealidades del bioma boreal, revelando tendencias de aumento y disminución de la resiliencia espacialmente explícitas (Zhang et al., 2024) y produciendo un nuevo sistema de evaluación comparativa de modelos específicos de biomas (Stofferahn et al., 2019). PANGEA se basará en la teoría de escalamiento avanzada por ABoVE e integrará aún más ML/AI con datos de teledetección para avanzar en la medición y el monitoreo de procesos heterogéneos, dinámicas y cambios en todas las regiones forestales tropicales, incluida la dinámica de fuente/sumidero de flujo de carbono, la clasificación del uso de la tierra, el modelado de distribución de especies, la estimación del índice de área foliar y las predicciones climáticas. PANGEA ofrece oportunidades para modelos numéricos que representan procesos que median la diversidad forestal y las interacciones de bosques estructuralmente heterogéneos con el clima, el uso de la tierra y los ciclos biogeoquímicos (por ejemplo, Rödig et al., 2019; Longo et al., 2020; Schneider et al., 2023). *En la sección 6.3.3 se describe con más detalle el enfoque de modelización, síntesis de datos e integración de PANGEA.*

PANGEA mejorará nuestra capacidad para ampliar los límites de lo que podemos inferir con los sensores de satélite y definir mejor las limitaciones, lo que permitirá a la comunidad investigadora centrar sus esfuerzos y recursos allí donde necesitemos información para complementar la investigación por teledetección con el fin de comprender mejor el funcionamiento de los bosques tropicales.

La nubosidad persistente, por ejemplo, es una limitación importante para los sensores ópticos en los bosques tropicales (por ejemplo, Landsat, EMIT, OCO-2/3). Aunque algunos aspectos de la enorme biodiversidad de los bosques tropicales pueden estudiarse desde el espacio, es poco probable que las observaciones espaciales suplanten los inventarios de especies de los estudios terrestres. Es poco probable que los taxones no vegetales salgan a la luz gracias a las investigaciones por satélite en los bosques tropicales, aunque algunos aspectos de la biodiversidad no vegetal pueden predecirse a partir de datos satelitales. La densa cubierta vegetal de los bosques tropicales también bloquea nuestra visión del suelo y de otras dinámicas subterráneas. Se necesita urgentemente interrogar y clarificar las capacidades y límites de la teledetección de los trópicos mediante avances metodológicos y computacionales y la fusión de datos para orientar las actividades de investigación e implementación en tierra y los esfuerzos de seguimiento multiescala a largo plazo. Véase en el Apéndice D las actividades de investigación y vigilancia previstas y en curso que pueden beneficiarse de PANGEA.

6.1.2 Calendario teórico del proyecto

La Oficina del Proyecto PANGEA elaborará el calendario definitivo del proyecto. Aquí ofrecemos un esquema teórico de los principales eventos del proyecto PANGEA que se ejecutarán a lo largo de 6 a 9 años (véase la Sección 9.4). Antes de la ejecución del proyecto, PANGEA desarrollará un Plan Experimental Conciso (CEP) durante la fase de Definición Científica que durará entre uno y dos años. En esta fase se seleccionarán los paisajes prioritarios, se perfeccionarán los planes de recogida de datos terrestres, aéreos y por satélite, se definirán los análisis para responder a las preguntas científicas del proyecto y se determinará un presupuesto preliminar. El plan conciso del experimento constituirá la base para que la NASA anuncie la oportunidad de contratar al equipo científico de la fase 1 de PANGEA. Nominalmente, esperamos que la NASA solicite propuestas para la participación del Equipo Científico cada tres años. Tras la fase de Definición Científica y la selección de un Equipo Científico de Fase 1, consideraremos que un proyecto PANGEA se ejecutará a lo largo de unos 8 años, aunque son posibles períodos de

implementación más largos o más cortos utilizando un enfoque flexible y modular. Un enfoque modular permite una amplia gama de perfiles de presupuesto y calendario, ya que las campañas individuales tienen dependencias limitadas. El objetivo inicial será establecer y aumentar los emplazamientos de campo con nueva instrumentación, así como análisis de datos basados en satélites y modelos para optimizar futuras mediciones. El desarrollo temprano de modelos y los análisis de los datos existentes revelarán las mayores sensibilidades que guiarán los detalles de la implementación y la recogida de datos de la campaña. El pico de adquisición de datos se produciría durante los años 2-6, asegurando que los recursos se gastan en adquisiciones con el mayor rendimiento científico. En una síntesis final durante los años 7 y 8, la actividad de campo será limitada, y PANGEA se concentrará en estudios de síntesis y modelización que utilicen ampliamente los datos adquiridos previamente.

6.2 Componentes científicos esenciales

Para colmar las lagunas de datos y conocimientos en los trópicos es necesario coordinar proyectos terrestres y aéreos que abarquen los dos mayores bosques tropicales de África y América.

PANGEA aprovecha el historial de la NASA de exitosas campañas de campo y aerotransportadas en los trópicos para medir la dinámica y el estado de los ecosistemas al final de la estación húmeda y al final de la estación seca, cuando los sistemas forestales tropicales están menos y más estresados, revelando diferencias funcionales (Yang et al., 2021b), y la densa nubosidad limita la teledetección sobre los trópicos durante la estación húmeda. Entre los logros recientes que demuestran la viabilidad se incluye la exitosa campaña AfriSAR-2, que recopiló datos aéreos UAVSAR de banda L y P sobre Camerún, la República Democrática del Congo (RDC), Gabón, Ghana, la República del Congo y Santo Tomé y Príncipe. A pesar del éxito de estas campañas, sigue existiendo una necesidad crítica de mediciones coincidentes y colocadas en el mismo lugar en los paisajes tropicales altamente variables, especialmente en África, donde las lagunas de datos son mayores y la comprensión basada en procesos es más pobre. Las mediciones limitadas a la estación seca corren el riesgo de sesgar la comprensión de los bosques tropicales, dadas las fuertes diferencias estacionales en la dinámica y los procesos (Cleveland et al., 2015), incluyendo el ciclo del carbono, las interacciones de las especies, las actividades de uso de la tierra (por ejemplo, el fuego y el desmonte), el ciclo hidrológico, y más. PANGEA llenará importantes lagunas temporales en la teledetección mediante la coordinación de recuperaciones suborbitales programadas durante el final de la estación húmeda y el final de la estación seca con adquisiciones de datos continuas y/o más frecuentes desde torres de flujo, drones y otros sensores. La consecución de los objetivos de PANGEA requiere, por tanto, campañas de vuelo que cumplan los requisitos de medición descritos en la Sección 6.2.1, con base en múltiples países de África Central y las Américas tropicales, para abarcar la gama de entornos presentes en estos sistemas. Estas observaciones enlazarán mediciones de procesos de alta resolución (parcelas forestales, mediciones en cámara, torres de flujo, eDNA, datos de movimiento de animales, datos agrícolas, TEK, IEK y LEK) con amplias recuperaciones de teledetección aerotransportada y por satélite, proporcionando una línea de base para los conjuntos de datos terrestres, aerotransportados y por satélite en curso, y permitiendo la comparación con estudios anteriores.

PANGEA proporciona un marco para escalar e integrar los datos obtenidos por satélite y aerotransportados con las mediciones de campo *in situ*, las mediciones de flujo-torre por covarianza de Foucault y los modelos para avanzar en la comprensión científica y las capacidades de teledetección en áreas temáticas que abordan directamente los objetivos del Área de Enfoque del Ciclo del Carbono y los Ecosistemas de la NASA, en consonancia con las Áreas de Enfoque del Ciclo del Agua y la Energía y la Variabilidad y el Cambio Climático.

PANGEA establecerá una red de campañas coordinadas de campo y aerotransportadas distribuidas a lo largo de ecosistemas forestales tropicales seleccionados para cubrir lagunas de datos y permitir el escalado entre conjuntos de datos de campo y de teledetección, así como la modelización a escala regional y pantropical (**Tabla 2**). Utilizando conjuntos de datos coordinados, PANGEA caracterizará las diferencias a través de gradientes bióticos, abióticos y de uso de la tierra. PANGEA utilizará estas medidas integradas para modelizar la estructura, función y flujos de los ecosistemas bajo escenarios de cambio climático y de uso de la tierra para evaluar las diferencias en las respuestas de los ecosistemas. De este modo, PANGEA aborda cómo las diferentes dinámicas de los bosques tropicales influyen en su estabilidad frente a los impactos del cambio climático y de uso de la tierra.

6.2.1 Línea de base, umbral y estrategia de descope

Derivamos tres niveles alternativos de Mediciones Científicas Esenciales, a saber, la **Línea de Base**, el **Umbral** y el **Desalcance**, a partir de los Objetivos Científicos de PANGEA para (1) comprender las diferencias en las reservas y flujos de carbono tropical y las fuerzas que impulsan la heterogeneidad, (2) resolver los problemas de escalamiento entre los datos de campo y satelitales mediante el avance en la comprensión de los procesos y los métodos de escalamiento, y (3) pronosticar las respuestas variables de los ecosistemas forestales tropicales al cambio climático y de uso de la tierra. A continuación se describen los requisitos funcionales de la investigación PANGEA.

La **Investigación de Referencia** cumple todos los Objetivos Científicos (Sección 1.1) y todas las Preguntas Científicas (Sección 3) en los paisajes forestales tropicales americanos 3-6 y africanos 3-6. Para cumplir estos Objetivos de la Investigación de Referencia, establecemos los siguientes requisitos:

1. Recoger datos aéreos mediante mosaicos de líneas de vuelo de pared a pared y transectos de muestreo en un mínimo de tres paisajes prioritarios en África y tres paisajes prioritarios en las Américas, donde los paisajes cubren cientos de kilómetros que abarcan una variedad de sistemas socioecológicos: los ecosistemas y las personas que dependen de ellos (véanse las Secciones 6.2.3 y 6.2.4 para más detalles sobre las mediciones del paisaje).
 - a. Las capturas aéreas incluirán una captura con éxito al final de la estación seca y una captura con éxito al final de la estación húmeda en cada paisaje. Las capturas al final de la estación seca (de seco a húmedo) y de la estación húmeda (de húmedo a seco) se producen en meses diferentes en continentes distintos. Los bosques tropicales pueden tener una estacionalidad unimodal (una estación seca y una húmeda) o bimodal (dos estaciones secas y dos húmedas). Por este motivo, los calendarios de recuperación se definirán en función de la estacionalidad específica del paisaje.
 - b. Los paisajes se seleccionarán a partir de los lugares candidatos durante el desarrollo del Plan Experimental Conciso.
 - c. Se utilizará un análisis de variabilidad basado en **la Figura 11** y un análisis de la incertidumbre del modelo para informar sobre los miembros finales importantes que se

deben capturar y contribuirá a la selección del paisaje durante el desarrollo del Plan conciso de experimentación.

2. Recoger mediciones en tierra coincidentes y coubicadas durante las adquisiciones aerotransportadas para las mediciones requeridas (por ejemplo, rasgos químicos de las hojas, mediciones de flujo en cámara de CO₂ y CH₄).
3. Recoger mediciones terrestres continuas con las frecuencias temporales requeridas a lo largo del proyecto (por ejemplo, adquisiciones mensuales de mortalidad y fenología de árboles con drones y terrestres, mediciones de flujo subhorarias).
4. Desarrollar y aplicar enfoques de síntesis de datos para escalar las observaciones de campo y aerotransportadas al Dominio Central de PANGEA, utilizando datos de satélite para obtener estimaciones restringidas (e incertidumbres) de las variables de interés.
5. Evaluar la transferibilidad de los productos de síntesis de datos en todo el ámbito básico mediante validación cruzada.
6. Modelizar los flujos de carbono, agua y energía, así como la dinámica de la vegetación, utilizando modelos de la biosfera terrestre inicializados, parametrizados y contrastados con los productos de síntesis de datos basados en la teledetección.
7. Aplicar modelos optimizados para probar la estabilidad de los bosques tropicales dentro y entre todos los paisajes de investigación y a escala regional basándose en los resultados de los modelos de la biosfera terrestre y de los sistemas socioecológicos.
8. Modelizar el papel relativo del clima, los suelos y las historias evolutivas divergentes en la determinación de la variación de la estabilidad de los bosques tropicales frente a los impactos climáticos.

La **Investigación del Umbral** cumple todos los Objetivos Científicos (Sección 1.1) en dos paisajes forestales tropicales americanos y dos africanos. La Investigación de Umbral requiere una captura aérea exitosa al final de la estación húmeda y una captura aérea exitosa al final de la estación seca en cada paisaje.

Nuestra **Investigación Descópica** cumple todos los Objetivos Científicos (Sección 1.1) en sólo dos paisajes en África. Para los trópicos americanos, nuestra Investigación Descópica se basa en datos existentes, campañas planificadas (ver Sección 6.2.4), compras comerciales de datos y drones desplegables, y datos satelitales sobre las Américas para comparaciones.

Requisitos de revisita temporal: Son necesarias dos campañas aerotransportadas focalizadas con mosaicos de pared a pared y transectos a través de múltiples paisajes para captar las variaciones estacionales y tener en cuenta la heterogeneidad intra e intercontinental de forma estandarizada. El calendario de los muestreos tendrá en cuenta la estacionalidad de las precipitaciones de cada paisaje. En los paisajes en los que existan dos estaciones secas, las campañas de PANGEA se centrarán en la estación seca más larga. Las campañas aerotransportadas captarán los endmembers necesarios para escalar las diferencias estacionales en flujos, stocks, rasgos, interacciones planta-animal, hidrodinámica, interacciones tierra-atmósfera, y actividades de uso del suelo agrícola y del fuego. El tiempo transcurrido entre las dos capturas y entre los distintos paisajes no afectará a la capacidad de captar estos miembros finales, lo que permite un diseño modular y la incorporación de una valiosa flexibilidad en las campañas aéreas. Dentro de las subsecciones a nivel de paisaje de estas adquisiciones aerotransportadas (por ejemplo, 10-20 km²), las recuperaciones de alta frecuencia (\leq mensual) de la estructura y los espectros forestales realizadas con drones permitirán cuantificar las tendencias temporales a pequeña escala (por ejemplo, mortalidad, fenología) y proporcionarán datos de calibración y validación para el desarrollo de métodos por satélite para monitorizar estas dinámicas. Además, a lo largo de un proyecto de 6 a 9 años, es muy probable que se

produzcan fenómenos extremos, como un gran incendio, una sequía o un fenómeno de El Niño, lo que brindará nuevas oportunidades de análisis.

Requisitos de variabilidad espacial: La estructura, función, flujos y biodiversidad del ecosistema se caracterizan a través de gradientes multidimensionales de sistemas forestales tropicales intactos a degradados, de alta a baja diversidad y de altas a bajas reservas de carbono. **PANGEA aplica un enfoque de muestreo a escala, con un diseño de muestreo anidado.** Las mediciones terrestres y aéreas abarcarán gradientes dentro de un paisaje, y los paisajes abarcarán gradientes climáticos y de biodiversidad dentro de un continente (**Figura 11 y 18**). La recopilación de datos PANGEA se llevará a cabo en paisajes que abarcan condiciones intactas, alteradas y degradadas en bosques, turberas y ecosistemas de humedales, así como agroecosistemas adyacentes. Se recopilarán datos coordinados y coincidentes sobre flujos, rasgos foliares, estructura forestal, mortalidad arbórea, diversidad faunística, interacciones entre especies, humedad del suelo, etc. a lo largo de estos gradientes dentro de cada paisaje. Para más información, véase la Sección 6.2.2, *Paisajes candidatos*, y la Sección 6.2.5, *Observaciones de campo y estudios*.

Enfoque flexible y modular: PANGEA se ejecutará con una combinación de adquisiciones plurianuales de datos desde tierra, torres y drones en paisajes específicos y campañas estacionales de recopilación intensiva de datos que pueden incluir componentes terrestres y aéreos. Cada paisaje y cada campaña pueden ejecutarse y financiarse por separado. PANGEA requerirá campañas plurianuales en cada paisaje para permitir que las adquisiciones de datos terrestres, aéreos y por satélite se solapen espacialmente. Sin embargo, hacemos hincapié en que no habrá requisitos para que las campañas en estaciones separadas o en continentes separados se lleven a cabo en el mismo año o en un orden determinado (por ejemplo, húmedo antes que seco). El número de continentes y paisajes dentro de los continentes puede variar en función de la estrategia seguida (Línea de base, Umbral o Descope). La combinación de estrategias y calendarios de campaña da lugar a múltiples opciones de calendarios y perfiles presupuestarios que ofrecen flexibilidad a la dirección de la NASA y a los posibles cofinanciadores de las actividades de PANGEA.

Tabla 2. Descripción de las variables ecológicas y geofísicas relevantes para este proyecto, con los requisitos de observación correspondientes y los recursos de observación de la Tierra existentes o futuros.

ARES: Centro Aerotransportado de Investigación del Sistema Terrestre. ET: evapotranspiración. LST: temperatura de la superficie terrestre. SIF: fluorescencia inducida por el sol. El texto **en morado** indica satélites de agencias federales no estadounidenses. * Indica misiones que aún no han sido lanzadas y/o que todavía pueden estar bajo consideración competitiva. ** Indica misiones finalizadas recientemente. Véase la **Tabla -E1** en el Apéndice E para una *Tabla Detallada de Mediciones PANGEA*.

| VARIABLE(S) | PREGUNTAS CIENTÍFICAS | MEDICIONES SOBRE EL TERRENO | TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN | ACTIVOS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA | |
|--|---|---|--|--|--|
| | | | | SATÉLITE (PREVISTO/PROPUESTO) | AEROTRANSPORTADO (DRON/AVIÓN) |
| FLUJOS DE LOS ECOSISTEMAS (GPP, ET, Respiración del ecosistema) | Q1-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q20-Q24 | Torres de flujo, espectros a nivel de hoja | Espectroscopía infrarroja, térmica | OCO-2/3, TROPOMI , GOES-R ABI, AHI, MTG-I, NASA GHG ESE*, Sentinel 5P/5* , FLEX* , CO2M* , GOSAT-2, GOSAT-GW*, Landsat, ECOSTRESS, SBG*, CHIME* , TRISHNA* , LSTM* , VIIRS, Sentinel-3 , Commercial* , GEO weather satellites | NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER |
| INTERCAMBIO ATMOSFÉRICO (Flujos CO ₂ & CH ₄ , Columna CO /CH ₂₄ /CO) | Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q20, Q21, Q24, Q27 | Torres de flujo, mediciones en cámara, TCCON, COCCON, Espectrómetros EM27/SUN | Hiperespectral, Covarianza de Foucault aerotransportada (AEC), Espectroscopía infrarroja | EMIT, MethaneSat, SBG*, Carbon-i*, CarbonMapper*, OCO-2/3, NASA GHG ESE*, Sentinel 5P/5*, FLEX*, CO2M*, GOSAT-2, GOSAT-GW*. | NASA AVIRIS-NG/3, CARAFE, CFIS (SIF), DLR CoMet (CO /CH ₂₄), UZH ARES, NEON AOP, GAO |
| BIOMASA Y ESTRUCTURA SOBRE EL SUELO (altura del dosel, heterogeneidad de la altura vertical, dinámica de los huecos, mortalidad de los árboles) | Q1, Q2, Q4-Q13, Q15, Q17-Q21, Q23, Q25, Q28 | Datos de parcelas de inventario forestal, escaneado láser terrestre, datos de parcelas de inventario forestal de censos repetidos | Lidar, radar, multiespectral | GEDI, Icesat-2, MOLI*, EDGE*, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*, Landsat, Sentinel-1/2, Planet | LVIS de la NASA, UAVSAR, lidar de pequeña huella (avión), dron de repetición RGB o Lidar |
| DIVERSIDAD (espectral, funcional, rasgos foliares del dosel, fauna, fenología) | Q2, Q4-Q7, Q10-Q15, Q20, Q24, Q25, Q28 | Espectros a nivel foliar, diversidad taxonómica; rasgos vegetales; IEK, TEK, LEK; cámaras trampa; sensores bioacústicos; movimiento animal; ADNe; PhenoCams; observaciones fenológicas a largo plazo. | Hiperespectral, Lidar, Radar, Radiómetros ópticos (OR) | EMIT, PACE, PRISMA , EnMAP, Planet & Planet Tanager , SBG*, CHIME* , FLEX* , NISAR*, BIOMASS* , Landsat, Sentinel-2 , OLCI | NASA AVIRIS-NG/3, UAVSAR, LVIS, UZH ARES, GAO, lidar de pequeña huella, dron de repetición RGB |

| VARIABLE(S) | PREGUNTAS CIENTÍFICAS | MEDICIONES SOBRE EL TERRENO | TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN | ACTIVOS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA | |
|--|--|---|--|---|--|
| | | | | SATÉLITE (PREVISTO/PROPUESTO) | AEROTRANSPORTADO (DRON/AVIÓN) |
| UMBRALES CRÍTICOS (Estrés hídrico, estrés térmico) | Q1-Q4, Q6-Q9, Q12-Q20, Q22, Q23, Q25 | Sondas de humedad del suelo, contenido de agua de las hojas, potenciales hídricos de hojas/tallo y conductancia, VOD desde torre (GNSS de banda L), cámaras FLIR | Radar/radiometría de microondas, GNSS-R/señales de oportunidad, hiperespectral | SMAP, SMOS, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*, LSTM*, AMSR-E, EMIT, SBG VSWIR & TIR*, CHIME*, FLEX*, SNOOPI*, CYGNSS, Lemur-2, Landsat, ECOSTRESS, TRISHNA*, Comercial*. | UAVSAR de la NASA, AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER, AirMOSS |
| INCENDIOS Y AEROSOLES (Fuego activo, aerosoles de combustión de biomasa) | Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q21, Q26, Q28 | Humedad vital del combustible, humedad del suelo, área quemada, gravedad de la quema, IEK, TEK, LEK, tipo de combustible, densidad del combustible, mediciones de aerosoles. | Térmico, UV/Infrarrojo, Fotómetros, Lidar | Landsat, VIIRS, Sentinel-3, SBG*, TRISHNA*, LSTM*, Comercial*, OMPS, EMIT, PACE, OLCI, NISAR*, BIOMASS*, CALIPSO-CALIOP**, AOS*. | NASA HyTES, MAESTRO |
| USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS: (Alimentación, agua dulce, medicina, prácticas espirituales y ceremoniales) | Q1, Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q14, Q16, Q19, Q21, Q23, Q28 | Actividad agrícola, severidad de la tala, prácticas de incendios, IEK, TEK, LEK, prácticas de gestión de la conservación, identificaciones culturales, cantidad y calidad del agua. | Radiómetros ópticos (OR), hiperespectrales, Lidar, radar | Landsat, Sentinel-1/2, Planet, VIIRS, OLCI, EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, SWOT, SMAP, SMOS, GRACE-FO, SBG*, CHIME*, FLEX*, CarbonMapper*. | NASA AVIRIS-NG/3, UAVSAR, LVIS, UZH ARES, GAO, lidar de pequeña huella |
| HIDROMETEOROLOGÍA (aguas superficiales, aguas subterráneas, humedad atmosférica, VPD, viento) | Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q22, Q23, Q25, Q28 | Altura de la superficie del agua, extensión de la inundación, caracterización de la descarga, mediciones de pozos, estaciones meteorológicas | Altímetro, radar, radiómetro, gravimétrico, microondas, sondas infrarrojas, generadores de imágenes, lidar de viento Doppler | SWOT, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*, GRACE-FO, ATMS, GeoXO*, AOS*, Aeolus | UAVSAR de la NASA, observaciones por radiosonda |
| EDÁFICO (Nutrientes y textura del suelo, topografía, geomorfología) | Q1, Q8, Q18, Q19, Q22-Q25, Q28 | Muestras de suelo | Hiperespectral, Lidar, Radar | EMIT, PACE, SBG*, CHIME*, SRTM, Copernicus GLO-30 | NASA AVIRIS-NG/3, UAVSAR, LVIS, lidar de pequeño tamaño |
| Nota: PANGEA explorará las relaciones correlativas con variables teledetectadas, no con mediciones directas. | | | | | |

6.2.2 Paisajes candidatos

PANGEA colaborará estrechamente con las instituciones asociadas del país para garantizar la ejecución sin problemas de las actividades de campo y aéreas en los paisajes seleccionados, que tendrán una extensión aproximada de 10.000 km². **El diseño de muestreo anidado de PANGEA apoya un enfoque de muestreo a escala (Figura 18)**. Las mediciones terrestres abarcarán gradientes dentro de un paisaje, y los paisajes abarcarán gradientes climáticos y de biodiversidad dentro de un continente (Figura 11). PANGEA dará prioridad a los países que abarquen paisajes con una confluencia de ecosistemas intactos, alterados y degradados de bosques, turberas y humedales, con agroecosistemas adyacentes. La recogida coordinada de datos sobre el terreno abarcará estos gradientes dentro de cada paisaje. **La Tabla 3** resume los paisajes candidatos basándose en la información proporcionada por los socios. Los paisajes PANGEA darán prioridad a los lugares donde ya se estén recogiendo los datos descritos al principio de la Sección 6.2.4 o donde se pueda ampliar la recogida de datos en el marco de PANGEA.

Tabla 3. Paisajes PANGEA candidatos. Los círculos de color indican los datos disponibles, por tipo.

Yellow = Datos terrestres; Orange = Datos socioeconómicos; Green = Datos de torre; Blue = Datos de drones; Purple = Datos de aeronaves.

Blue with a 'N' = Datos de aeronaves de la NASA. * Indica actividades previstas. ATTO: Observatorio de torres altas del Amazonas. Los paisajes **en negrita** son emplazamientos GEO-TREES confirmados. Los paisajes *en cursiva* son lugares confirmados de la iniciativa One Forest Vision.

| PAISAJE | PAÍS | DATOS DISPONIBLES | PAISAJE | PAÍS | DATOS DISPONIBLES | | |
|---|------------------|-------------------------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------|--|--|
| POSIBLES PAISAJES FORESTALES TROPICALES AMERICANOS | | | | | | | |
| KM34/ATTO (Manaus) | Brasil | Yellow, Green, Blue, Purple | Nalohou | Benín | Yellow, Green | | |
| KM67 (Santarem) | | Yellow, Green, Purple | Bellefoungou | | Yellow, Green | | |
| Rebio Jaru | | Yellow, Green | La Lama | | Yellow, Green | | |
| Tanguro | | Yellow, Green, Purple | Dja | Camerún | Yellow, Orange, Blue, Purple | | |
| Caxiuaná | | Yellow, Green | Mbalmayo | | Yellow, Blue, Purple | | |
| Amacayacu | Colombia | Yellow | Korup | | Yellow | | |
| Amazonas | | Yellow | Campo Ma'an | | Yellow | | |
| La Planada | | Yellow, Purple | <i>Luki</i> | Dem. República del Congo | Yellow, Blue | | |
| Santa Rosa | Costa Rica | Yellow, Orange, Green, Blue, Purple | Mai Ndombe | | Yellow, Orange, Blue, Purple | | |
| Turrialba | | Yellow, Blue, Purple | Yangambi | | Yellow, Green, Blue | | |
| Tiputini | Ecuador | Yellow, Purple | Reserva de Yoko | | Yellow, Orange | | |
| Yasuní | | Yellow, Purple | Ankasa | Ghana | Yellow, Blue | | |
| Paracou | Guayana Francesa | Yellow, Green, Blue, Purple | Bia Tano | | Yellow, Green | | |
| Agua Salud | Panamá | Yellow | Bobiri | | Yellow, Blue | | |
| ICB | | Purple | Kogyae | | Yellow, Blue | | |
| Darién | | Yellow, Orange | Lopé | Gabón | Yellow, Purple | | |
| Iquitos | Perú | Yellow | Ipassa | | Yellow | | |
| Huánuco | | Yellow, Green | Mondah | | Yellow, Purple | | |
| Jenaro Herrera | | Yellow, Green | Mabounié | | Yellow, Purple | | |
| Los Amigos | | Yellow, Green | Rabi | | Yellow, Purple | | |
| Madre de Dios | | Yellow | Bokatola | República del Congo | Yellow | | |
| San Martín | | Yellow, Green | Kolongomba | | Yellow | | |
| Tambopata | | Yellow, Green | Lago Tele | | Yellow | | |
| Ucayali | | Yellow | Loundoungou | Ruanda | Yellow, Blue | | |
| Guánica | Puerto Rico | Yellow, Green, Purple | Odzala-Kokoua | | Yellow, Blue, Purple | | |
| Luquillo | | Yellow, Blue | Nyungwe | | Yellow | | |
| <i>Volcanes</i> | | | | | | | |
| Kibale | | | | | | | |
| <i>Sebitoli</i> | | | | | | | |
| Uganda | | | | | | | |

PANGEA coordinará estrechamente la selección de paisajes con los esfuerzos que están activamente en el proceso de selección de emplazamientos para la recogida de datos complementarios y la inversión en infraestructuras. Entre ellos se incluyen GEO-TREES, la campaña amazónica INPE-ESA, la iniciativa One

Forest Vision, las mediciones de campo de metano y turberas tropicales financiadas por la Fundación Moore y la Fundación Nacional de Ciencias (NSF), así como múltiples propuestas del Instituto Virtual de Ciencias Schmidt para el Ciclo del Carbono centradas en los trópicos. En el Plan conciso de experimentos se formalizará un proceso de selección de paisajes y emplazamientos para garantizar la transparencia en la selección y aprobación de paisajes y emplazamientos dentro de paisajes para la recogida de datos terrestres y aéreos. Este proceso se basará en los debates en curso con los socios institucionales locales y los administradores de sitios que comenzaron durante el proceso de definición del alcance e incluirá el co-diseño con los Pueblos Indígenas y las Comunidades Locales (véase la Sección 8 para más información).

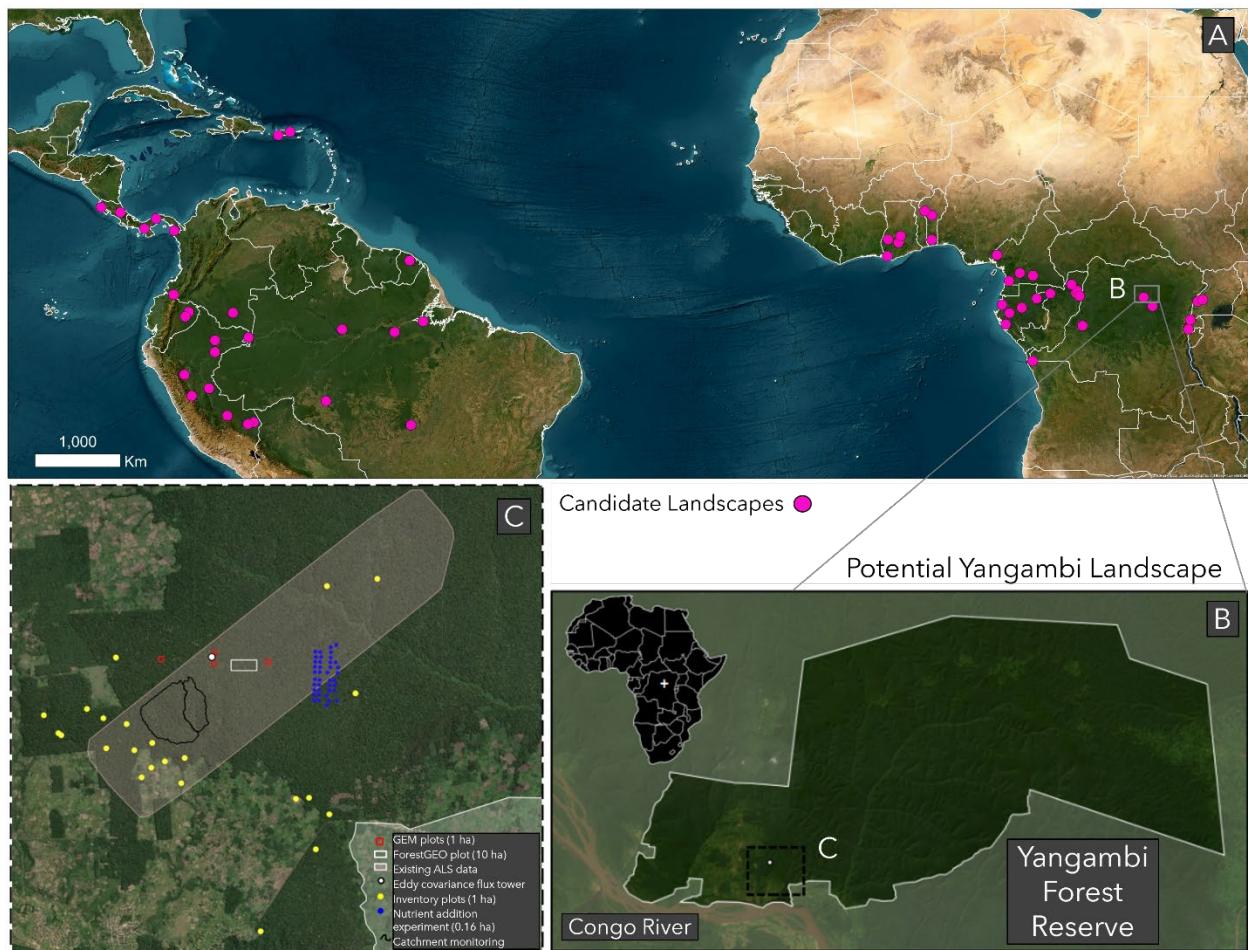


Figura 18. Los posibles paisajes candidatos abarcan los trópicos americanos y africanos (A). Yangambi, un ejemplo de paisaje candidato potencial, se ilustra en el panel B, que cuenta con parcelas de inventario existentes, una torre de flujo y datos de aeronaves (C) que podrían situarse dentro de un paisaje PANGEA más amplio que abarque ecosistemas agrícolas, intactos y degradados.

6.2.3 Observaciones de teledetección por satélite

Hay una gran cantidad de plataformas de satélites de la NASA que contribuirán a los objetivos científicos y de aplicaciones de PANGEA, así como un ecosistema cada vez mayor de sensores de otras agencias espaciales y organizaciones no gubernamentales (ONG) (**Tablas 2 y E-1**). PANGEA está bien preparado para aprovechar las misiones del Sistema de Observación de la Tierra (EOS) para comprender los patrones de las propiedades de los ecosistemas tropicales y sus cambios en el pasado reciente, así como para avanzar en la forma en que

utilizamos los sensores espaciales en la era de las misiones del Observatorio del Sistema Terrestre (ESO). PANGEA también está preparado para contribuir a la mejora y el perfeccionamiento de los algoritmos de ESO para representar mejor los ecosistemas tropicales y satisfacer las necesidades de los usuarios en estas regiones de importancia mundial. El trabajo in situ realizado por PANGEA, junto con las observaciones de teledetección por satélite, permitirá que los biomas forestales tropicales y las personas que viven en estas regiones formen parte del círculo virtuoso de la Ciencia de la Tierra a la Acción, garantizando su inclusión en el proceso.

Tabla 4. Ejemplos de observaciones y avances de la teledetección por satélite.

El texto **en morado** indica satélites de agencias federales no estadounidenses. * Indica misiones que aún no se han lanzado y/o que pueden estar aún en fase de estudio competitivo.

| OBSERVACIONES POR SATÉLITE | CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y AVANCES EN LOS ALGORITMOS DE PANGEA |
|---|---|
| Sentinel-1 , NISAR*, BIOMASS* | <ul style="list-style-type: none"> Ampliar la calibración/validación de la cartografía de la biomasa a lo largo de gradientes de perturbación y climáticos. Apoyar el desarrollo de productos de datos de NISAR y BIOMASS en bosques densos. |
| EMITIR, TIMBRE* , SBG-VSWIR* | <ul style="list-style-type: none"> Ampliar los datos de validación del producto derivado de la EMIT en los bosques tropicales. Apoyo a los productos de vegetación L3 mejorados del SBG VSWIR. |
| OCO-2/3, TROPOMI, MethaneSat, EMIT, CarbonMapper | <ul style="list-style-type: none"> Obtener muestras de calibración sin nubes XCO₂ y XCH₄ en regiones tropicales. Datos de apoyo para productos L3, escalado entre datos de modo objetivo y de amplia cobertura espacial. |
| Carbono-I* | <ul style="list-style-type: none"> Datos de validación de los flujos de gases de efecto invernadero de los humedales. |
| GEDI, ICESat-2, EDGE* | <ul style="list-style-type: none"> Datos de alta precisión sobre la estructura de los bosques para mejorar los productos lidar espaciales L3. Oportunidades para los datos de calibración de los productos de cuantificación de biomasa L4. |
| SMAP, SMOS | <ul style="list-style-type: none"> Datos de calibración para productos de humedad del suelo en bosques densos. |
| Geoestacionarios: GOES-R ABI (América), MTG-I (África) y AHI (Asia) | <ul style="list-style-type: none"> Datos de calibración para estimaciones de la función de los ecosistemas a escalas temporales subdiarias. |
| VIIRS, Sentinel-3 | <ul style="list-style-type: none"> Apoyar el desarrollo de productos L3 de dinámica de incendios. Datos de calibración para la detección de incendios a pequeña escala. |
| ECOSTRESS, SBG-TIR, FLEX* | <ul style="list-style-type: none"> Datos de apoyo para derivar estimaciones de la función de los ecosistemas L3 y L4 en todas las condiciones meteorológicas. Datos de calibración de las relaciones emergentes entre la estructura y composición de los bosques y la función de los ecosistemas. |

En la **Tabla 4**, destacamos una variedad de sensores espaciales de la NASA operativos y de próxima aparición, sus necesidades de avances en los trópicos que PANGEA puede abordar, y la ciencia que el equipo de PANGEA podrá avanzar con el uso de estos sensores en concierto con las actividades planificadas de PANGEA. Esta tabla también incluye algunos sensores que son operados por agencias espaciales que no pertenecen a la NASA y cuyos datos están disponibles abiertamente. PANGEA también explorará conjuntos de datos comerciales disponibles a través del programa Commercial SmallSat Data Acquisition (CSDA) de la NASA durante las fases de Definición e Implementación Científica del proyecto.

6.2.4 Observaciones por teledetección aérea

Las observaciones aéreas de PANGEA, incluidos los aviones instrumentados y los drones, se diseñarán conjuntamente con los socios locales. Todas las solicitudes de autorizaciones nacionales y permisos de vuelo serán coordinadas por los programas aerotransportados de la NASA y el JPL en colaboración con la Oficina de Relaciones Internacionales e Interinstitucionales (OIIR) de la NASA y el Departamento de Estado de Estados Unidos (véase **el recuadro 2**). Cuando se utilicen aeronaves de la NASA o contratadas por la NASA, todos los procesos de aeronavegabilidad apropiados y la aprobación y liberación de vuelos se coordinarán a nivel del proyecto PANGEA con los centros apropiados, la sede central de la NASA y el JPL. Los sensores y aeronaves exactos se determinarán durante el desarrollo del Plan Experimental Conciso.

PANGEA aprovecha y se basa en la historia de la NASA de campañas aéreas internacionales exitosas, incluyendo muchas en África. Recientemente, la NASA llevó a cabo las campañas AfriSAR 2016 y AfriSAR-2 2023/2024, en las que AfriSAR-2 amplió el alcance y los éxitos iniciales de AfriSAR en Gabón para recopilar además datos sobre Camerún, la República Democrática del Congo (RDC), Ghana, la República del Congo y Santo Tomé y Príncipe. En 2023, la campaña BioSCape voló con dos aviones de la NASA integrados con cuatro instrumentos de teledetección aerotransportada, adquiriendo observaciones contemporáneas desde el UV hasta el VSWIR y el rango térmico, así como datos lidar de forma de onda completa. Esta combinación de instrumentos fue acompañada de una extensa campaña de observación sobre el terreno, ejecutada por un equipo científico diverso con una participación local de ~50%. El éxito de AfriSAR y BioSCape y el continuo desarrollo de sus capacidades han servido de excelente ejemplo de diplomacia científica y han influido positivamente en la percepción pública de la NASA y de Estados Unidos en África.

Recuadro 2 Acuerdos internacionales y de otro tipo

Los socios internacionales de PANGEA participarán desde el principio y de forma continua para garantizar unas relaciones sólidas que contribuyan al éxito de las campañas sobre el terreno y aéreas. Para cada paisaje PANGEA, se obtendrán acuerdos formales y/o permisos de los gobiernos pertinentes y de los líderes de las comunidades indígenas. Tan pronto como se seleccione PANGEA, el equipo científico de PANGEA comenzará a involucrar a socios institucionales para apoyar el desarrollo de discusiones formales sobre los acuerdos diplomáticos requeridos que serán necesarios para llevar a cabo el trabajo de campo y desplegar aeronaves en apoyo de la campaña TE de la NASA. A medida que se establezcan las vías con cada gobierno extranjero, el Equipo Científico de PANGEA trabajará con NASA SMD a través del Director del Programa TE para desarrollar los acuerdos diplomáticos adecuados para llevar a cabo el trabajo de campo y las campañas aéreas en cada país. Los acuerdos diplomáticos (tales como memorandos de entendimiento [MOUs], acuerdos de aplicación [IAs], y/o autorizaciones de vuelo) tendrán que ser creados entre el Gobierno de EE.UU. y la Nación Extranjera dada tan pronto como sea posible. Cuando se requieran tales documentos entre la NASA y un Gobierno Extranjero, el Equipo Científico PANGEA y el Director del Programa TE, en colaboración con la OIIR de la NASA, SMD, los Centros de la NASA incluyendo JPL, la Oficina de Apoyo CCE, y el Departamento de Estado de los EE.UU., trabajarán a través de los canales diplomáticos y protocolos adecuados para establecer los documentos necesarios para el éxito de las campañas de campo y aéreas. El Equipo Científico de PANGEA también consultará con la NASA, el Departamento de Estado, el Servicio Forestal de EE.UU. (USFS) y la Agencia de EE.UU. para el Desarrollo Internacional (USAID) para identificar y buscar sinergias entre las actividades de PANGEA y los objetivos diplomáticos de EE.UU., incluyendo la cooperación científica y los lazos entre países. El Equipo Científico de PANGEA, el Programa TE y la Oficina de Apoyo al CCE trabajarán estrechamente para garantizar que las tierras indígenas y los territorios soberanos sean copartícipes en cualquier proceso de aprobación diplomática. La experiencia del actual Equipo Científico de PANGEA en numerosas campañas internacionales sobre el terreno y aerotransportadas facilitará el establecimiento de los acuerdos internacionales adecuados para el proyecto PANGEA.

Varias campañas Earth Venture Suborbital (EVS) y otras campañas internacionales aerotransportadas de la NASA también han demostrado la viabilidad del despliegue internacional de aeronaves de la NASA y aeronaves contratadas por la NASA con instrumentos in situ y de teledetección en apoyo de campañas plurianuales a gran escala en los trópicos americanos. En 2023, el JPL de la NASA realizó con éxito una campaña con AVIRIS-NG en la que se recopilaron datos de teledetección con una aeronave contratada por la NASA sobre Chile, Colombia y Ecuador para realizar observaciones de fuentes puntuales de metano en coordinación con cada país. Esto se basó en exitosas campañas anteriores en la región, incluyendo, por ejemplo, vuelos UAVSAR en Colombia, Ecuador, Perú y la Guayana Francesa; vuelos AVIRIS en Colombia, Ecuador y Chile; con vuelos AVIRIS planeados en Panamá y Costa Rica; y vuelos LVIS en la Guayana Francesa. Todas estas campañas representan décadas de experiencia de la sede central de la NASA y de los centros (incluido el JPL) trabajando conjuntamente con universidades y colaboradores internacionales para adquirir con éxito datos de teledetección aérea e in situ durante campañas de campo globales.

A medida que PANGEA desarrolle su Plan Experimental Conciso, seguirá aprovechando la experiencia de los miembros del equipo de anteriores campañas internacionales.

Es importante destacar que la recogida de datos aéreos PANGEA no requiere necesariamente el despliegue de activos o aeronaves de la NASA. Las compras de datos comerciales y los vuelos en aeronaves extranjeras y comerciales también son opciones viables para las adquisiciones aéreas de PANGEA. Los sensores de la NASA pueden volarse en aeronaves comerciales. Por ejemplo, los sensores AVIRIS suelen volar tanto a nivel nacional como internacional en un avión de Dynamic Aviation. Las misiones EVS Oceans Melting Greenland (OMG), Delta-X y Coral Reef Airborne Laboratory (CORAL) desplegaron con éxito aeronaves contratadas por el JPL de la NASA con instrumentos y miembros del equipo del JPL. Las compras comerciales de datos también ampliarán considerablemente las capacidades aerotransportadas. Por ejemplo, los transectos lidar comerciales financiados por Estados Unidos adquiridos con el apoyo de USAID a través de Sustainable Landscapes Brazil abarcan grandes áreas de Brasil (dos Santos et al., 2019), y esfuerzos similares permitieron el muestreo sobre los bosques en la República Democrática del Congo (Xu et al., 2017), demostrando la viabilidad en importantes geografías PANGEA. El Airborne Research Facility for the Earth System (ARES) de la Universidad de Zúrich, es otro socio importante que apoya las adquisiciones aéreas de PANGEA. ARES ha adquirido con éxito datos para campañas de colaboración de la NASA y la ESA. Los sensores a bordo de ARES incluyen el espectrómetro de imágenes AVIRIS-4, un lidar de forma de onda completa y una cámara fotogramétrica de alto rendimiento.

Existe un fuerte alineamiento e interés por parte de las agencias espaciales asociadas en la adquisición de datos aéreos (por ejemplo, ESA, ISRO, JAXA). Por ejemplo, una serie de campañas Amazon 2025/26 coordinadas entre el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil y la Agencia Espacial Europea (ESA) planean recoger datos aéreos de fluorescencia, metano e in situ, así como posibles datos de flujo de carbono y especies, incluyendo CO₂ y CH₄ recuperados mediante un sensor HELiPOD transportado por un helicóptero. El Centro Aeroespacial Alemán (DLR) está planeando una campaña coordinada en Brasil en 2026 con el objetivo de desplegar un lidar de metano (CHARM- F) y sistemas de imagen para la detección de metano. La Agencia Espacial Francesa (CNES) participa con un enfoque similar sobre el metano, utilizando la recogida de datos desde el aire y desde tierra. La ESA también está planificando actividades de campañas aerotransportadas sobre África centradas en la validación de las observaciones de gases de efecto invernadero por satélite. Los planes de la ESA están en curso y se definirán con más detalle tras un taller dirigido por la ESA en la primavera de 2025. Muchos miembros del equipo actual de PANGEA colaboran estrechamente con los equipos del INPE, la ESA, el DLR y el CNES. PANGEA puede beneficiarse enormemente de este tipo de colaboraciones internacionales y contribuir a ellas.

PANGEA también aprovechará las capacidades de los drones para complementar la recogida de datos con aeronaves y realizar adquisiciones de datos que requieran una mayor frecuencia temporal (por ejemplo, mortalidad de árboles, fenología). PANGEA utilizará instrumentos lidar y RGB UAV de nivel de preparación tecnológica (TRL) 9. Las actuales ofertas comerciales hiperespectrales basadas en UAV a menudo presentan desafíos y tienden a cubrir sólo el rango VNIR, perdiendo la porción de onda corta del espectro, que es importante para las mediciones relevantes del ecosistema. El equipo de PANGEA continuará haciendo un seguimiento de la disponibilidad y utilidad de estas tecnologías e incorporará protocolos para emplearlas, según proceda, en apoyo de las actividades científicas.

Algunas de las adquisiciones de datos de PANGEA requerirán mediciones de campo y observaciones aéreas casi simultáneas, lo que se conseguirá mediante la planificación anticipada de las campañas de campo; métodos claros y fiables de comunicación entre los equipos de vuelo y de campo; y planes que incorporen flexibilidad de tiempo. En la preparación de las campañas y durante las mismas, PANGEA se basará en herramientas de seguimiento de vuelos y observaciones rápidas casi en tiempo real, como las utilizadas en BioSCape (Cardoso et al., 2024), para optimizar la recopilación de datos aéreos, facilitar mejores coincidencias de campo y aumentar la transparencia.

PANGEA también apoya la colaboración internacional inclusiva. Inspirándose en el éxito de BioSCape a este respecto, PANGEA aplicará un sistema transparente de priorización de las regiones de interés para el equipo científico y solicitará opiniones sobre el sistema de priorización antes de la campaña aérea mediante asambleas públicas, talleres, reuniones bilaterales y encuestas. PANGEA compartirá los planes de vuelo preliminares y pondrá en marcha un proceso iterativo para que el Equipo Científico y los socios locales puedan contribuir a perfeccionar el diseño de adquisición de datos, dejando claro al mismo tiempo al Equipo Científico y a los socios locales que no se garantiza la obtención de datos aéreos, y que todas las adquisiciones propuestas son provisionales hasta que se ejecuten con éxito. La información sobre las actividades de vuelo diarias, incluidas las llamadas "go/no-go", se transmitirá puntualmente una vez que se hayan tomado las decisiones diarias.

6.2.5 Observaciones y estudios de campo

Las mediciones terrestres son necesarias para (1) validar las observaciones espaciales de las propiedades de los ecosistemas, tanto del programa de registro de la NASA como de las nuevas misiones lanzadas; (2) descubrir los impulsores mecánicos de los flujos y patrones observados, que luego pueden informar el desarrollo de modelos y la interpretación de las observaciones espaciales; y (3) evaluar las dependencias de escala de los procesos ecológicos. A pesar de la importancia de los ecosistemas tropicales, éstos están dramáticamente subrepresentados con respecto a las mediciones de campo, lo que puede llevar a una pobre representación en los productos de datos de más alto nivel de las misiones satelitales (ver **Tabla 3**), subrayando la importancia de las mediciones y estudios PANGEA basados en el campo. Los productos de datos de campo incluyen en general los siguientes:

- **Los datos y conocimientos manuales in situ** incluyen todos los datos que deben ser medidos y/o recopilados directamente por personas sobre el terreno y que no pueden automatizarse fácilmente. Algunos ejemplos son las parcelas de inventario forestal, los rasgos de las hojas y la madera, el escaneado láser terrestre, las mediciones de flujo en cámara, la identificación de especies, el ADN electrónico, los datos de movimiento de animales, las mediciones de tipo de cultivo y rendimiento, y el conocimiento ecológico indígena, tradicional y local (IEK, TEK y LEK). Estas bases de datos y conocimientos son importantes para comprender las relaciones mecanicistas entre patrón y proceso y para la validación de los conjuntos de datos de drones, aviones y satélites.

- **Los datos in situ automatizados** incluyen todas las mediciones sobre el terreno que apoyan la validación y la comprensión de los procesos ecológicos, pero no requieren visitas frecuentes al lugar y son más fáciles de automatizar. Algunos ejemplos son las mediciones de dendrómetros, flujo de savia y humedad del suelo, así como los datos de cámaras trampa y bioacústica. Al igual que el muestreo biológico, estas mediciones son importantes para desarrollar y comprender los procesos y validar las observaciones a distancia.
- **Los datos meteorológicos y de flujos** incluyen todos los datos recogidos en una torre de flujos o estación meteorológica, incluidos los flujos de carbono, agua y energía, la temperatura del aire, la temperatura del suelo, el contenido volumétrico de agua del suelo, la humedad relativa y las precipitaciones. La técnica de la covarianza de Foucault utiliza torres de andamiaje situadas por encima del dosel forestal y mide los datos de alta frecuencia del viento y escalares (concentración de gases, energía, momento) para estimar los flujos de agua y carbono del ecosistema, refiriéndose el carbono a los flujos de CO₂, CH₄ y laterales.
- **La teledetección proximal desde** torres incluye todos los datos que pueden recogerse desde plataformas montadas en torres. Estas mediciones complementarán la teledetección obtenida por drones y aeronaves para vincular más directamente los rasgos y flujos de los ecosistemas con las observaciones por satélite. Las mediciones de teledetección proximal basadas en torres PANGEA incluyen reflectancia hiperespectral, fluorescencia inducida por el sol (SIF), radiación infrarroja térmica (TIR), retrodispersión de microondas, lidar, VOD (GNSS de banda L) y PhenoCams.
- **La teledetección próxima basada en** drones incluye lidar, imágenes RGB tanto de estructura como espectrales, datos multiespectrales y el desarrollo potencial de un sensor hiperespectral basado en drones. Hay tres aspectos clave en el seguimiento con drones: (1) permite la recogida de datos de alta frecuencia y el seguimiento continuo de las tendencias temporales de una manera que no es posible con aviones; (2) proporciona la capacidad de capturar tendencias incluso en condiciones de nubosidad, que son comunes en las regiones forestales tropicales; y (3) puede complementar las mediciones terrestres que pueden pasar por alto la parte superior del dosel debido a la oclusión en los sistemas forestales y agroforestales. Cuando se combinan con la validación en tierra, las adquisiciones basadas en drones son fundamentales para cuantificar fenómenos como la mortalidad de los árboles, los flujos de carbono, la fenología y los cambios en los rasgos funcionales con variación estacional.

Varios factores pueden restringir o limitar las mediciones de campo en los bosques tropicales. En primer lugar, el acceso a terrenos densos y difíciles de transitar y a zonas remotas puede limitar la capacidad de desplegar y mantener el equipo de campo en múltiples emplazamientos. Asimismo, las condiciones meteorológicas extremas, como las lluvias torrenciales durante las estaciones monzónicas y el calor y la humedad extremos, crean entornos de trabajo duros, que pueden limitar la duración y el alcance del trabajo de campo. Además, muchos bosques tropicales se encuentran en regiones que sufren inestabilidad política, conflictos o disputas por el uso de la tierra, lo que puede suponer riesgos para los investigadores y dificultar la realización de estudios a largo plazo. Además, la financiación y los recursos para la ciencia proceden en su mayoría del norte global, lo que limita los recursos para financiar directamente el trabajo de campo en los trópicos. Estas limitaciones han dado lugar históricamente a la realización de campañas intensivas de medición en sólo unos pocos lugares de los bosques tropicales. Las mediciones realizadas en los trópicos no pueden generalizarse fácilmente porque los ecosistemas tropicales presentan una gran biodiversidad y los datos pueden ser representativos únicamente de las condiciones locales.

PANGEA abordará estas limitaciones mediante la creación de asociaciones de colaboración duraderas y mutuamente beneficiosas con organizaciones tropicales locales para aprovechar, reforzar y cubrir las lagunas existentes en infraestructuras y esfuerzos (**Tabla 5**). Los socios han participado en el proceso de definición del alcance y participarán a lo largo de PANGEA, incluso durante el desarrollo del Plan

Experimental Conciso de PANGEA. Para más información, véase *la sección 8, Estrategia de participación comunitaria*. PANGEA planea basarse en las relaciones con todos estos socios para abordar los objetivos científicos del proyecto. Señalamos en particular que los emplazamientos de flujo, como los de la red global de torres de flujo por covarianza de Foucault (FLUXNET), suelen disponer de infraestructura y suministro eléctrico suficientes para albergar medidas de apoyo adicionales, como la teledetección proximal. Por ello, PANGEA dará prioridad a las mediciones de campo que se asocien con los emplazamientos FLUXNET para aprovechar la infraestructura existente y establecer colaboraciones. También hay que tener en cuenta que NGEE-Tropics desaparecerá cuando PANGEA entre en su fase más activa. PANGEA se basará directamente en los esfuerzos de recopilación de datos de NGEE-Trópicos extendiendo mediciones similares a África y recopilando datos de teledetección ubicados en el mismo lugar, además de basarse en los esfuerzos de modelización de NGEE-Trópicos (véase *la Sección 6.3*).

Tabla 5. Organizaciones asociadas con investigaciones de campo en curso y actividades sinérgicas con PANGEA.

AMMA-CATCH: African Monsoon Multidisciplinary Analysis Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique.

AndesFlux: Torres de flujo operadas por la PUCP. ForestGEO: Observatorio Forestal Mundial de la Tierra. GEM: Red Mundial de Vigilancia de Ecosistemas. PUCP: Pontificia Universidad Católica del Perú. RAINFOR: Red de Inventarios Forestales de la Amazonia.

| ORGANIZACIONES | POSIBLES CONTRIBUCIONES |
|--|--|
| Alianza para la Ciencia de los Bosques Tropicales (ATFS) | <ul style="list-style-type: none">• 11 redes de investigación (por ejemplo, AfriTRON, ForestGEO, GEM, RAINFOR).• 11.656 parcelas de inventario forestal en 56 países.• Fuerte liderazgo en el desarrollo de capacidades. |
| Observatorio Amazon Tall Tower (ATTO) | <ul style="list-style-type: none">• Proyecto conjunto germano-brasileño.• Tres torres de flujo (incluida una de 325 m).• Datos auxiliares (ciclos biogeofísicos/biogeoquímicos y meteorología). |
| AndesFlux | <ul style="list-style-type: none">• 6 torres de flujo inducido y parcelas permanentes en la Amazonia occidental.• Lugares que abarcan un gradiente de duración de la estación seca (0-6 meses). |
| Instituto de la Cuenca del Congo (CBI) | <ul style="list-style-type: none">• 2 estaciones de campo biológicas en Camerún.• Redes organizativas en la cuenca del Congo.• Escuela del CBI para el Conocimiento Indígena y Local (SILK). |
| Iniciativa Científica de la Cuenca del Congo | <ul style="list-style-type: none">• Plataforma dirigida por científicos para la inversión científica a largo plazo.• Esfuerzos para crear capacidad científica local.• Iniciativas de desarrollo sostenible. |
| CongoFlux | <ul style="list-style-type: none">• Estación de investigación tropical de Yangambi (República Democrática del Congo).• Flujos de covarianza de Foucault (CO₂, N₂O, CH₄, H₂O, calor sensible).• Datos adicionales para caracterizar el ciclo del carbono. |
| FLUXNET | <ul style="list-style-type: none">• Red internacional de redes (por ejemplo, la red de torres de flujo por eddy-covarianza de las Américas [AmeriFlux], el Sistema Integrado de Observación del Carbono [ICOS]).• Datos de flujo de covarianza de Foucault consolidados y normalizados. |
| GEO-TREES | <ul style="list-style-type: none">• Red de redes (por ejemplo, AfriTRON, ForestGEO, GEM, RAINFOR).• Coordinación de parcelas de inventario forestal y teledetección aérea.• Datos para calibrar las estimaciones de reservas de carbono a partir del espacio. |
| Alianza Global de Comunidades Territoriales (GATC) | <ul style="list-style-type: none">• Red de Pueblos Indígenas y Comunidades Locales.• Representan a 35 millones de personas en 24 países (África, América, Asia).• Capacitación para la gestión sostenible y la protección cultural. |
| Guyafor y Guyaflux | <ul style="list-style-type: none">• Guyafor: Red de 54 parcelas a largo plazo en 17 lugares de la Guayana Francesa.• Guyaflux: Torre de covarianza de Foucault a largo plazo (21 años) en la Guayana Francesa. |
| LBA | <ul style="list-style-type: none">• Programa permanente del gobierno brasileño.• Plataforma de apoyo a infraestructuras y colaboración en investigación en la Amazonia. |
| NGEE-Trópicos | <ul style="list-style-type: none">• Proyecto decenal multiinstitucional del Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE).• Centros intensivos en Australia, Brasil, Malasia, Panamá y Puerto Rico.• Recogida de datos para mejorar la modelización de bosques diversos. |
| Red Flux de África Occidental | <ul style="list-style-type: none">• 3 torres de flujo inducido: 2 forestales (Bellefoungou y La Lama), 1 de cultivos mixtos (Nalohou)• Bellefoungou y Nalohou: Mediciones meteorológicas y de covarianza de Foucault a largo plazo (16 años), aguas superficiales (red AMMA-CATCH) y muestras de suelo que abarcan gradientes topográficos y geomorfológicos.• La Lama: Estudio de especies disponible en GBIF |

6.3 Modelización, síntesis de datos y análisis integradores

6.3.1 Modelización e integración de datos

La modelización y la síntesis de datos son componentes fundamentales de PANGEA. Las actividades de modelización y síntesis de datos abarcarán todos los Temas Científicos (Sección 2) y serán fundamentales para responder a las preguntas científicas clave de PANGEA (Sección 3). A lo largo del proyecto, PANGEA dará prioridad a los conjuntos de datos terrestres y aéreos que puedan sintetizarse a través de múltiples escalas e integrarse en los modelos, ya sea para la inicialización, las condiciones de contorno o la evaluación. Este enfoque se ha aplicado con éxito en proyectos anteriores de integración de modelos y datos (por ejemplo, ABoVE y NGEE-Tropics), y tenemos previsto basarnos en estos proyectos. Los objetivos de la modelización y la síntesis de datos son los siguientes

- Identificar los procesos clave que están mal representados y las regiones dentro del dominio PANGEA que impulsan la incertidumbre de las variables y procesos clave en los modelos existentes.
- Desarrollar actividades similares a los Experimentos de Simulación de Sistemas de Observación (OSSE) que ayudarán a informar sobre las mejores ubicaciones y gradientes necesarios para maximizar la representatividad de los sitios intensivos dentro del dominio PANGEA.
- Sintetizar y escalar mediciones de paisajes a los dominios Core y Extended PANGEA utilizando teledetección y modelización.
- Implementar nuevos procesos y técnicas, así como mejorar los ya existentes, que aprovechen la integración de datos de teledetección y modelos, y aplicarlos para responder a las preguntas científicas de PANGEA.

En las últimas décadas, los modelos de la biosfera terrestre han ampliado su alcance e incorporado muchos procesos nuevos que no podían abordarse durante el LBA (**Figura 19**). Por ejemplo, los modelos basados en procesos ahora resuelven la diversidad estructural y funcional, una amplia variedad de dinámicas de perturbación naturales y antropogénicas, y un fuerte acoplamiento con los ciclos biogeoquímicos (Fisher et al., 2018; Fisher y Koven, 2020; Negron-Juarez et al., 2020). Nos encontramos en una época en la que deben tenerse en cuenta los procesos ecológicos en diversos ecosistemas que impulsan los ciclos de la energía, el agua, el carbono y los nutrientes en la Tierra (Bonan et al., 2024). Del mismo modo, varias clases de modelos han ido aprovechando cada vez más la amplia gama de observaciones de teledetección, y a lo largo de PANGEA contaremos con la participación de una amplia gama de modelos que pueden utilizar la teledetección para la inicialización, la cuantificación de la incertidumbre y la asimilación de datos (**Tabla 6**). Además, nuevas tecnologías como la inteligencia artificial pueden avanzar tanto en la calibración de modelos (Li et al., 2023) como convertirse en partes integrales de la modelización predictiva (Schneider et al., 2017; Reichstein et al., 2019; Eyring et al., 2024). No obstante, a medida que evolucionen los modelos, será cada vez más importante abordar los retos futuros, como la aclimatación, la limitación de nutrientes, los cambios en la composición funcional, la contabilización de las emisiones de metano y la partición de la asignación de carbono entre la biomasa aérea y subterránea, para mantener la precisión de los modelos.

Proyectar la trayectoria futura de los ecosistemas tropicales supone un reto importante para los ESM, ya que estos modelos deben representar con precisión dinámicas físicas, biogeoquímicas y ecosistémicas complejas. Los proyectos de intercomparación de modelos como CMIPs (Taylor et al., 2012; Eyring et al., 2016) y TRENDY (Friedlingstein et al., 2023; Sitch et al., 2024) son cruciales para seguir el desarrollo de modelos basados en procesos e identificar las áreas que deben mejorarse (Arora et al., 2020). Aunque la evaluación comparativa y la validación de los ESM se han vuelto más comunes en los últimos años (Fisher et al., 2018), sigue siendo poco frecuente evaluar sistemáticamente el rendimiento de los modelos del ciclo

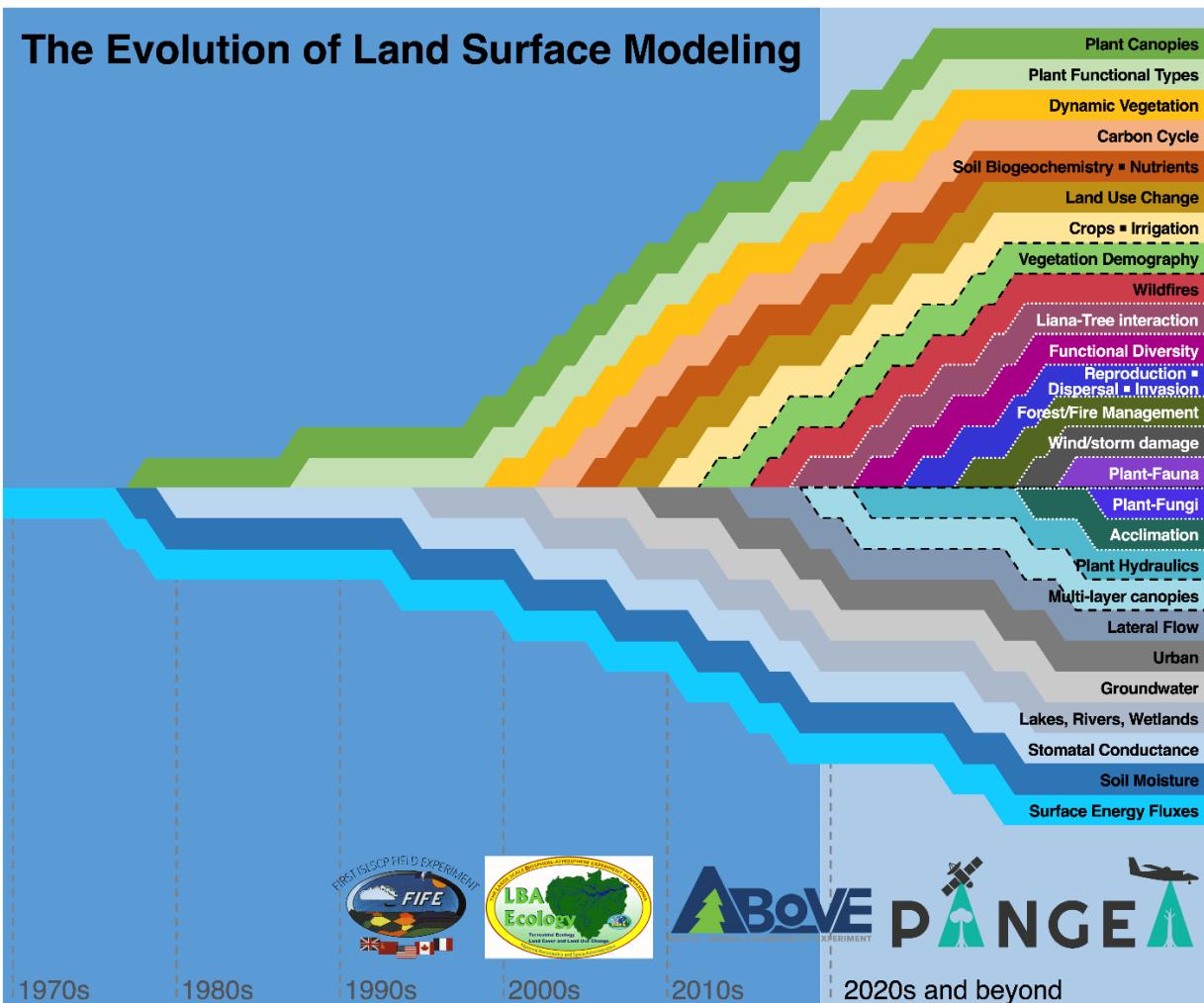


Figura 19. Cambio en los procesos resueltos por los modelos de la biosfera terrestre a lo largo de las décadas, junto con campañas anteriores de Ecología Terrestre de la NASA. Líneas negras discontinuas: procesos implementados, aún en fase de desarrollo significativo. Líneas blancas discontinuas: procesos que empiezan a emerger y que se espera que lo hagan en los próximos años. Fuente de la figura original: Fisher y Koven (2020).

del carbono después de su actualización (Fer et al., 2021). Sin embargo, estas comparaciones con conjuntos de datos observacionales son esenciales para probar hipótesis y evaluar la precisión predictiva (Negron-Juarez et al 2015, Fisher et al., 2018). El proyecto ILAMB proporciona herramientas para rastrear y comparar el rendimiento del modelo utilizando un método integral de puntuación de habilidad e incorpora múltiples conjuntos de datos observacionales para dar cuenta de la incertidumbre del modelo (Hoffman et al., 2017; Collier et al., 2018; Braghieri et al., 2023). La mejora de la concordancia entre las simulaciones históricas y las observaciones puede indicar que los componentes del modelo pueden perfeccionarse para representar mejor los procesos, aumentando así la confianza en las proyecciones futuras. Además de representar los procesos con precisión, el rendimiento del modelo puede verse influido significativamente por la calidad y representatividad de las condiciones iniciales y de contorno (Hurt et al., 2004; Antonarakis, 2014; de Frenne et al., 2021). Los datos recopilados a través de PANGEA se utilizarán para ampliar las herramientas de evaluación comparativa mediante la integración de datos de observación terrestre y teledetección, y para proporcionar condiciones iniciales y de contorno que sean representativas del estado real de los ecosistemas forestales tropicales.

Tabla 6. Lista no exhaustiva de modelos que pueden integrar datos de PANGEA y ayudar a responder preguntas científicas y probar hipótesis de PANGEA.

Clases de modelos: PBM, modelos de biosfera terrestre basados en procesos; HM, modelos híbridos basados en datos; TDM, modelos descendentes; AI/ML, modelos basados en aprendizaje automático de inteligencia artificial; y ABM, modelos basados en agentes. Subclases de modelos PBM: IBM, modelos basados en individuos; CBM, modelos basados en cohortes; DGVM, modelos dinámicos de vegetación global (excluidos los IBM y los CBM). CliMA: Alianza para la Modelización del Clima.

| MODELOS | | | | | EJEMPLOS DE OPORTUNIDADES DE INTEGRACIÓN DE MODELOS DE DATOS | | CUESTIONES CIENTÍFICAS ABORDADAS | |
|---------|----------|--|--|---|--|--|--|---|
| CLASE | SUBCLASE | EJEMPLOS | REFERENCIAS | EJEMPLOS DE PROCESOS DE INTERÉS | AEROTRANSPORTADO/ESPACIAL TELEDETECCIÓN | MEDICIONES SOBRE EL TERRENO | | |
| PBM | IBM | FORMIND TROLL | Fischer et al. (2016) Maréchaux y Chave (2017) | <ul style="list-style-type: none"> • Reservas y flujos de carbono • Diversidad estructural/funcional • Tasas demográficas • Índices de perturbación | <p>ESTRUCTURA FORESTAL/EXISTENCIAS DE CARBONO:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lidar aerotransportado • GEDI, EDGE*, NISAR*, BIOMASA* • Landsat, Sentinel1-, -Sentinel2 <p>COMPOSICIÓN FORESTAL:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hiperespectral aerotransportado • DESIS, EMIT, PACE, PRISMA, SBG* <p>OTROS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flujos agua/energía: ECOSTRESS • Flujos C: FLEX, OCO-2/3, TROPOMI • Agua del suelo: SMAP, SMOS, SWOT • Contenido de agua en el dósol: AMSR-E, EMIT • Fenología: Landsat; Sentinel-2; dron RGB • Nube/precipitación: GOES-R, GPM • Cubierta terrestre: Landsat; Sentinel-2 • Área quemada: Landsat, Sentinel-2, VIIRS | <ul style="list-style-type: none"> • Parcelas de inventario forestal • Hojarasca/restos leñosos gruesos • Escaneado láser terrestre • Rasgos funcionales de las plantas • Datos meteorológicos • Flujos de covarianza de Foucault • COS/isótopos • Sapflow • Humedad/temperatura del suelo • Cámaras de flujo del suelo • Datos GNSS desde torre • PhenoCams | Q1-Q27 | |
| | | BiomeE ED/ED3 ED2 Ent TBM FATES LPJ-GUESS | Weng et al. (2022) Ma et al. (2023) Longo et al. (2019) Kim et al. (2015) Koven et al. (2020) Hickler et al. (2012) | <ul style="list-style-type: none"> • Reservas y flujos de carbono • Diversidad estructural/funcional • Tasas demográficas • Índices de perturbación • Ciclo agua/energía • Ciclo de nutrientes • Cambios en la ocupación y el uso del suelo • Superficie quemada/emisiones de incendios | | | | |
| | DGVM | CLM | Lawrence et al. (2019) | <ul style="list-style-type: none"> • Reservas y flujos de carbono • Índices de perturbación • Ciclo agua/energía • Ciclo de nutrientes • Cambios en la ocupación y el uso del suelo • Superficie quemada/emisiones de incendios | | | | |
| | | ELM JSBACH JULES LPJ ORCHIDEE | Ricciuto et al. (2018) Reick et al. (2021) Harper et al. (2018) Sitch et al. (2008) Krinner et al. (2005) | <ul style="list-style-type: none"> • Reservas y flujos de carbono • Índices de perturbación • Ciclo agua/energía • Ciclo de nutrientes • Cambios en la ocupación y el uso del suelo • Superficie quemada/emisiones de incendios | | | | |
| | HM | CARDAMOM CliMA NASA-CASA | Bloom et al. (2016) Braghieri et al. (2023) Potter et al. (2012) | <ul style="list-style-type: none"> • Reservas y flujos de carbono • Ciclo agua/energía • Cambios en la ocupación y el uso del suelo • Superficie quemada/emisiones de incendios | | | | |
| | | CarbonTracker CMS-Flux HYSPLIT STILT-VPRM | Peters et al. (2007) Liu et al. (2020) Stein et al. (2015) Dayalu et al. (2024) | <ul style="list-style-type: none"> • Flujos de carbono • Ciclo agua/energía • Superficie quemada/emisiones de incendios | <ul style="list-style-type: none"> • Flujos C: FLEX, OCO-2/3, TROPOMI • Flujos agua/energía: ECOSTRESS • Área quemada: Landsat, Sentinel-2, VIIRS | <ul style="list-style-type: none"> • Flujos de covarianza de Foucault • Datos meteorológicos • COS/isótopos • Cámaras de flujo del suelo • PhenoCams | <ul style="list-style-type: none"> • Q1-Q4; Q6; Q8; Q9; Q14-Q16; Q18; Q22-Q27 | |
| | TDM | | | | | | | <ul style="list-style-type: none"> • Q1-Q2; Q4; Q6; Q9; Q14; Q17 |
| | | | | | | | | |

| MODELOS | | | | | EJEMPLOS DE OPORTUNIDADES DE INTEGRACIÓN DE MODELOS DE DATOS | | CUESTIONES CIENTÍFICAS ABORDADAS |
|---------|----------|---|--|--|--|--|-----------------------------------|
| CLASE | SUBCLASE | EJEMPLOS | REFERENCIAS | EJEMPLOS DE PROCESOS DE INTERÉS | AEROTRANSPORTADO/ESPACIAL TELEDETECCIÓN | MEDICIONES SOBRE EL TERRENO | |
| AIML | | MapaBiomass Fuego MetaFlux | Alencar et al. (2022) Nathaniel et al. (2023) | <ul style="list-style-type: none"> Reservas y flujos de carbono Ciclo agua/energía Superficie quemada/emisiones de incendios | RESERVAS DE CARBONO: <ul style="list-style-type: none"> Lidar/hiperspectral aerotransportado GEDI, EDGE*, NISAR*, BIOMASA* Landsat, Sentinel-1 y -2 OTROS: <ul style="list-style-type: none"> Flujos agua/energía: ECOSTRESS Flujos C: FLEX, OCO-2/3, TROPOMI Área quemada: Landsat, Sentinel-2, VIIRS | <ul style="list-style-type: none"> Rasgos funcionales de las plantas Datos meteorológicos Flujos de covarianza de Foucault COS/isótopos Cámaras de flujo del suelo Datos GNSS desde torre PhenoCams | Q1-Q2; Q4; Q6; Q9; Q14; Q17 |
| ABM | | ABSOLUG SimPachamama RepastSimphony | von Essen & Lambin (2023) Andersen et al. (2017) North et al. (2013) | <ul style="list-style-type: none"> Cubierta terrestre/cambio de uso del suelo Estado/dinámica del hogar Métricas bioeconómicas Tasa de reproducción del ganado | RESERVAS DE CARBONO: <ul style="list-style-type: none"> Lidar aerotransportado/ hiperspectral GEDI, EDGE*, NISAR*, BIOMASA* DESI, EMIT, PACE, PRISMA, SBG* Landsat, -Sentinel1 y -2 OTROS: <ul style="list-style-type: none"> Cubierta terrestre: Landsat; -Sentinel2 Área quemada: Landsat, Sentinel2-, VIIRS | <ul style="list-style-type: none"> Parcelas de inventario forestal Datos de gestión forestal Rendimiento de los cultivos/madera Datos de dinámica ganadera Límites territoriales Datos del censo humano Datos de la encuesta Datos del experimento de elección | P21; P28 |

Cuadro 3. Ejemplo de modelización PANGEA y enfoque de integración de datos de teledetección

Utilizando la Pregunta 6 de PANGEA (variabilidad de rasgos funcionales intercontinentales y efectos en el ciclo tropical del carbono) y el modelo FATES como ejemplo, el equipo de PANGEA utilizará enfoques de incertidumbre de parámetros (por ejemplo, a través de conjuntos de simulación utilizando PEcAn) para identificar qué rasgos foliares e hidráulicos medibles impulsan la sensibilidad del modelo de flujos de CO₂ y H₂O en FATES (en adelante, rasgos clave). A continuación, el equipo caracterizará los rasgos clave en los lugares de interés mediante trabajo de campo y teledetección a través de gradientes climáticos y de perturbación en ambos continentes. Utilizarán los datos recogidos para restringir las distribuciones de los parámetros en los gradientes de interés. Utilizarán mediciones de flujos desde torres y teledetección para establecer relaciones emergentes entre gradientes de rasgos y flujos derivados de teledetección a través de los mismos gradientes como referencias. A continuación, utilizarán el modelo restringido para investigar cómo responden a sequías extremas los ecosistemas en diferentes regímenes de precipitación y severidad de las perturbaciones, y qué procesos (por ejemplo, la limitación de la humedad del suelo o el déficit de presión de vapor) impulsan las respuestas a las sequías extremas. Al utilizar un enfoque integrado entre los modelos y la adquisición de datos, PANGEA permitirá un avance significativo de la capacidad predictiva de los modelos para cuantificar la vulnerabilidad de los bosques tropicales al cambio global.

Las actividades de síntesis de datos de PANGEA facilitarán la ampliación de las mediciones terrestres del paisaje y las observaciones aéreas descritas en las Secciones 6.2.4 y 6.2.5 a escalas regionales y pantropicales. Al sintetizar variables clave utilizando conjuntos de datos de teledetección aerotransportada emparejados con mediciones terrestres (por ejemplo, humedad del suelo, rasgos funcionales de las plantas, flujos), podemos establecer relaciones empíricas sólidas utilizando modelos estadísticos para interpolar las variaciones de pared a pared en variables críticas. Por ejemplo, las mediciones sobre el terreno de las pérdidas de carbono en la biomasa debidas a las sequías en múltiples lugares pueden utilizarse para desarrollar modelos estadísticos que predigan los cambios en la biomasa en respuesta a la variación de la humedad del suelo, la VPD, la frecuencia de las sequías y los grupos funcionales de las plantas. El producto derivado puede utilizarse para cartografiar los impactos pantropicales en la biomasa forestal tras escenarios de sequía específicos, mejorando nuestra comprensión de las respuestas de los ecosistemas a los factores de estrés ambiental en diversos paisajes tropicales. Además, la combinación de múltiples productos de síntesis de datos puede utilizarse para explorar las relaciones emergentes de los ecosistemas forestales tropicales. Por ejemplo, los mapas de altura del dosel antes de las sequías pueden contrastarse con los índices de estrés evaporativo durante las condiciones de sequía. Estos conjuntos de datos pueden aplicarse después como restricciones y puntos de referencia adicionales para los modelos basados en procesos.

PANGEA aprovechará los modelos de inteligencia artificial y aprendizaje automático (IA/AM) para la síntesis de datos debido a su solidez en el tratamiento de las no linealidades y las interacciones entre los procesos multifactoriales y los predictores. La IA/ML puede utilizarse además para emular modelos basados en procesos (Swaminathan et al., 2024) y explorar de forma más eficiente el espacio paramétrico de los modelos o realizar previsiones a corto/largo plazo (Li et al., 2023; Meunier et al., 2024). Para mejorar la interpretabilidad y la comprensión de los procesos ecológicos subyacentes de los modelos de IA/ML, PANGEA implementará técnicas como (1) el Análisis de Importancia de Características, que cuantifica y destaca los factores más influyentes que impulsan las predicciones del modelo; y (2) los Gráficos de Dependencia Parcial, que pueden emplearse para visualizar cómo los cambios en variables específicas afectan a los resultados previstos. Además, PANGEA empleará técnicas ajenas a la IA, como la inferencia

causal (Venelli Pyles et al., 2022), el análisis de series temporales (Bullock et al., 2020), incluido Breaks For Additive Season and Trend Monitor (BFAST; DeVries et al., 2015; Verbesselt et al., 2012), y la estadística bayesiana (Goulamoussène et al., 2017), que permiten comprender las relaciones causa-efecto, descubrir patrones temporales y cuantificar la incertidumbre en las predicciones y los análisis. Estas estrategias también proporcionarán información valiosa y flujos de trabajo eficaces que pueden integrarse en modelos basados en procesos para reducir la incertidumbre de los parámetros y aumentar la precisión de las predicciones (Dietze et al., 2013; Meunier et al., 2021).

Un reto importante a la hora de comprender la dinámica de los bosques tropicales a gran escala es la relativa brevedad de las series temporales de la mayoría de los productos de datos relacionados con la estructura, composición, reservas de carbono y función de los bosques. Para superar este desafío y obtener datos de rebrote de biomasa forestal a largo plazo y de alta resolución, trabajos anteriores utilizaron un enfoque de sustitución espacio-temporal, que calcula las tasas de recuperación de variables de interés (por ejemplo, biomasa, altura del dosel) a partir de un tiempo de referencia en áreas que experimentaron perturbaciones en años diferentes (y conocidos) (Heinrich et al., 2021; Rappaport et al., 2018). Este enfoque, junto con los modelos AI/ML y las técnicas tradicionales de síntesis de datos, garantiza que PANGEA pueda evaluar y predecir con solidez la dinámica de los bosques tropicales a través de varias escalas y marcos temporales, apoyando el uso de registros satelitales a largo plazo como resultado de las adquisiciones de datos de PANGEA y los avances metodológicos. Las cronosecuencias se han utilizado para restringir los modelos basados en procesos que caracterizan las distribuciones de edad desde la última perturbación (Ma et al., 2017).

6.3.2 Coordinación con otras comunidades de modelización e integración de datos

La coordinación con las comunidades establecidas de modelización, síntesis de datos e integración de datos será crucial para ampliar el impacto de PANGEA más allá de proporcionar observaciones de campo y por satélite. Por ejemplo, el proyecto TRENDY (Sitch et al., 2024), que coordina simulaciones del ciclo global del carbono, representa otra asociación potencialmente importante. Los detallados datos específicos de PANGEA sobre los bosques tropicales serán fundamentales para mejorar la parametrización y el rendimiento de los modelos TRENDY, en particular para la dinámica y los flujos regionales de carbono en los biomas tropicales. Del mismo modo, el CMIP (Eyring et al., 2016), líder mundial en modelización climática, se beneficiará de las observaciones de PANGEA, especialmente en el contexto de la mejora de la representación de los ecosistemas tropicales. Estos conjuntos de datos serán muy valiosos para evaluar y mejorar los modelos utilizados en los esfuerzos globales, incluidos los componentes terrestres del CMIP. Esta asociación mejorará la representación de los ecosistemas tropicales en los modelos del sistema terrestre al proporcionar puntos de referencia específicamente adaptados a los bosques tropicales, lo que ayudará a los modelos globales a lograr una mayor precisión en sus predicciones.

PANGEA se asegurará de que sus datos y hallazgos contribuyan a los esfuerzos en curso para mejorar el rendimiento de los modelos terrestres y reducir las incertidumbres en las proyecciones globales como resultado de las respuestas de los bosques tropicales al cambio climático y de uso de la tierra. Por ejemplo, un socio importante de PANGEA es el proyecto ILAMB (Collier et al., 2018). Los datos recopilados a través de PANGEA y los productos derivados desarrollados a través de la síntesis de datos pueden convertirse en nuevos puntos de referencia sobre procesos que actualmente muestran una alta incertidumbre entre los conjuntos de datos (por ejemplo, la productividad primaria bruta) o están ausentes en ILAMB (por ejemplo, la demografía de la vegetación, la hidráulica de las plantas). Del mismo modo, PANGEA colaborará con PEcAn (Predictive Ecosystem Analyzer; LeBauer et al., 2013), que se centra en aprovechar los conjuntos de datos de campo y satélite para optimizar los parámetros del modelo y mejorar las predicciones de los flujos

de carbono y agua (Dokooohaki et al., 2022; Meunier et al., 2021). PANGEA colaborará con comunidades de modelos basados en procesos que integraron con éxito observaciones de teledetección de la demografía de la vegetación, como el Modelo de Demografía de Ecosistemas (ED2; Antonarakis et al., 2014; Longo et al., 2020). Otro socio clave es NGEE-Tropics, que, aunque está previsto que finalice más o menos cuando PANGEA entre en su fase más activa, proporciona una rica base de herramientas de modelado, incluido el modelo FATES (Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator; Koven et al., 2020), y una amplia experiencia en el diseño y la ejecución de campañas de campo para recopilar datos destinados a reducir la incertidumbre del modelo. PANGEA también puede contar con la colaboración de un equipo transdisciplinar de científicos y tecnólogos, financiado recientemente por el programa Advanced Information Systems Technology (AIST) de la NASA, que desarrollará un Gemelo Digital del Sistema Terrestre (ESDT) titulado "Corredores de almacenamiento de carbono y biodiversidad de África Central". Este ESDT integra amplios datos avanzados de teledetección sobre carbono y biodiversidad, datos socioeconómicos y modelos de movimiento de animales en modelos del sistema Tierra. Su propósito es evaluar el estado actual y proyectado de las reservas forestales de carbono y la biodiversidad, evaluar la eficacia de las estrategias de conservación y analizar los impactos potenciales de acciones globales como el Acuerdo de París y REDD+ en los ecosistemas de África Central. Por último, la Oficina de Modelización y Asimilación Global (GMAO) puede complementar los esfuerzos de PANGEA con técnicas avanzadas de asimilación de datos que pueden utilizarse para los puntos de referencia y las condiciones límite de los modelos predictivos de la dinámica de los bosques tropicales. Entre los ejemplos de productos se incluyen los productos SMAP Nivel-4 sobre temperatura y humedad del suelo en la zona de enraizamiento (Reichle et al., 2019) y el análisis retrospectivo moderno para investigación y aplicaciones, Versión 2 (MERRA-2, Gelaro et al., 2017).

Además de las comunidades que desarrollan modelos basados en procesos, productos de síntesis de datos y flujos de trabajo de evaluación comparativa, PANGEA pretende colaborar con iniciativas que asimilan directamente datos de teledetección en predicciones de modelos. Por ejemplo, la modelización inversa desempeñará un papel fundamental en la estrategia de coordinación de PANGEA, ofreciendo un marco para conciliar las discrepancias entre los flujos observados y simulados de los ecosistemas. Esta técnica ayudará a asimilar los conjuntos de datos a gran escala obtenidos por satélite con las mediciones de campo, lo que permitirá realizar predicciones más precisas de la dinámica del carbono y el agua en los biomas tropicales (Liu et al., 2016). PANGEA también tiene como objetivo colaborar con esfuerzos de modelado innovadores como el NASA-CASA (NASA Carnegie-Ames-Stanford ecosystem model; Potter et al., 1993; 2012) y CARDAMOM (CARbon DAta-MOdel fraMework; Bloom et al., 2020), que combinan adquisiciones satelitales y terrestres para la asimilación y modelado de datos del ciclo del carbono y se han aplicado eficazmente en OSSE (Philip et al., 2019). Por último, la colaboración con CliMA (Climate Modeling Alliance; Schneider et al., 2017), que está desarrollando un modelo del sistema terrestre de vanguardia que integra técnicas de aprendizaje automático y asimilación de datos, mejorará la capacidad de PANGEA para escalar las observaciones de los bosques tropicales. Estas colaboraciones ayudarán a salvar la brecha entre la recopilación de datos de campo y la modelización predictiva, impulsando nuevos conocimientos sobre el funcionamiento de los ecosistemas tropicales y su papel en el sistema terrestre.

6.3.3 Actividades de modelización e integración de datos

Las actividades de modelización y síntesis de datos tendrán lugar a lo largo de todo el PANGEA. Sin embargo, estas tareas cambiarán de enfoque a medida que avance el proyecto. Una vez seleccionado un equipo científico para PANGEA, se creará un grupo de trabajo de modelización y síntesis de datos (SWG). Este grupo identificará las áreas y procesos clave que actualmente generan incertidumbre en los modelos basados en procesos relacionados con los ciclos del carbono, el agua, la energía y los nutrientes, así como con la biodiversidad y las interacciones humanas en los bosques húmedos tropicales. El grupo desarrollará

esfuerzos de intercomparación de modelos utilizando puntos de referencia establecidos (por ejemplo, TRENDY, FLUXCOM) y herramientas (por ejemplo, ILAMB) para informar el diseño del proyecto. El SWG también buscará respuestas rápidas mediante el uso de enfoques basados en Experimentos de Simulación de Sistemas de Observación (OSSEs) utilizando modelos y controladores existentes para proporcionar una primera evaluación de áreas clave de incertidumbre y áreas que carecen de representatividad en las observaciones existentes.

Tras las evaluaciones iniciales y los esfuerzos de OSSE, el SWG se centrará en objetivos múltiples y complementarios. Las actividades relacionadas con los modelos basados en procesos se centrarán en la aplicación de los mecanismos clave que faltan y que se identificaron durante la Fase 1, lo que permitirá avanzar en la comprensión de los factores que impulsan los patrones observados en los ciclos del carbono, el agua, la energía y los nutrientes en las campañas de campo. Las actividades vinculadas a la síntesis permitirán la ampliación de los resultados de las escalas local y regional a la mundial. La investigación sobre síntesis de datos se centrará en el uso de los conjuntos de datos PANGEA para generar productos a escalas que puedan ser asimilados por modelos inversos e híbridos, así como utilizados para la evaluación comparativa de modelos basados en procesos. Los enfoques de síntesis incluirán, entre otros, la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y la sustitución espacio-temporal. Los miembros del grupo que trabajen con modelos inversos e híbridos utilizarán los conjuntos de datos PANGEA y los productos de síntesis derivados para cuantificar la incertidumbre en la cuantificación a escala de variables de estado y flujos. Los esfuerzos no se centrarán en un único conjunto de modelos y técnicas, sino que reunirán métodos que permitan escalar las mediciones limitadas en el espacio y el tiempo a toda la región pantropical junto con estimaciones sólidas de la incertidumbre.

Durante la síntesis final, PANGEA se centrará en los estudios que utilicen los modelos restringidos y mejorados y los productos de datos desarrollados anteriormente para abordar directamente las preguntas científicas de PANGEA y probar las hipótesis clave. La investigación que utilice modelos basados en procesos en esta fase debería identificar y atribuir las causas y los impulsores de los cambios en el funcionamiento de los bosques aprovechando los conjuntos de datos de PANGEA para la inicialización y la cuantificación de la incertidumbre. La síntesis de datos y los esfuerzos de modelización inversa se centrarán en describir cómo los principales ejes de variabilidad en los bosques húmedos tropicales impulsan la heterogeneidad de los flujos de carbono, energía, agua y nutrientes, así como la biodiversidad dentro de los continentes y entre ellos. En conjunto, estas actividades permitirán avanzar en la comprensión de la resiliencia de los bosques tropicales ante el cambio global y ofrecerán respuestas integradoras a través de los Temas Científicos (Sección 3).

7 Capacitación, formación y educación

Fortalecer la capacidad de los participantes estadounidenses y de los países tropicales mediante la inversión en formación, educación e intercambio de conocimientos es fundamental para el éxito de PANGEA, y crítico para preparar a la próxima generación de científicos con la experiencia y las herramientas necesarias para aprovechar plenamente el Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de la NASA, y el conocimiento de los sistemas socio-ecológicos, y los métodos científicos y la gestión de datos y análisis y desarrollo de modelos científicos. El desarrollo de capacidades, la formación y la educación de PANGEA se comprometerán con las comunidades de investigación y mano de obra con sede en Estados Unidos, y con las comunidades locales y nacionales de los países con bosques tropicales asociados a PANGEA. La experiencia adquirida durante anteriores proyectos de campo de TE, especialmente LBA, demostró que el desarrollo de capacidades aportaba longevidad a los proyectos y justificaba los proyectos para los países anfitriones. PANGEA se asociará con los programas existentes de la NASA, así como con instituciones colaboradoras locales e internacionales, para planificar y participar en el intercambio de conocimientos, la

creación de capacidad, la formación y las actividades educativas que sean apropiadas para una amplia gama de participantes potenciales, incluidos los estudiantes, los científicos que inician su carrera, la fuerza de trabajo en general, los pueblos indígenas y las comunidades locales (IPLC), y los científicos. El desarrollo de capacidades, la formación y la educación se centrarán en fomentar la participación de los pueblos indígenas y las comunidades locales, el personal en general y un grupo de estudiantes universitarios y de posgrado.

Las actividades de capacitación, formación y educación de PANGEA se diseñarán en función de cada público específico. Durante el desarrollo del Plan Experimental Conciso, y después de forma intermitente a lo largo de PANGEA, se llevarán a cabo evaluaciones para valorar lo que los diferentes miembros de la comunidad PANGEA necesitan y desean en términos de desarrollo de capacidades, formación y actividades educativas. La evaluación identificará a los beneficiarios potenciales y los alinearán con los recursos disponibles. La formación es un objetivo preferente para muchas oportunidades de cofinanciación (véase la sección 10.2, *Oportunidades de cofinanciación*).

7.1 Desarrollo de la mano de obra

PANGEA promoverá los objetivos descritos en la Visión 2030 del Consejo Nacional de Ciencia (NSB) fomentando el desarrollo de la mano de obra en los campos STEM. Mediante tecnologías avanzadas de teledetección, el desarrollo y las aplicaciones de modelos del sistema terrestre y un amplio trabajo de campo internacional, PANGEA creará una mano de obra con formación en STEM dotada de experiencia en investigación fundamental en ciencia e ingeniería y ML/AI, incluido el aprendizaje profundo, los grandes modelos lingüísticos, la visión por ordenador y la asimilación de datos, para hacer frente a retos ecológicos y sociales críticos en regiones pantropicales y habilidades aplicables a nivel mundial. PANGEA ofrece oportunidades de capacitación práctica para estudiantes y científicos que inician su carrera, tendiendo un puente entre la ciencia fundamental y las herramientas aplicadas y la toma de decisiones orientada a soluciones, y garantizando la inclusión mediante la participación de instituciones que atienden a minorías (MSI). Además de apoyar los actuales esfuerzos de formación y desarrollo de la fuerza laboral de la NASA a través de ARSET, DEVELOP y la Iniciativa de los Pueblos Indígenas de la NASA, los programas de formación de PANGEA se alinean bien con la Inteligencia Artificial para la Predictibilidad del Sistema Terrestre (AI4ESP) del DOE y los programas de Investigación, Innovación, Sinergias y Educación (RISE) y Oportunidades de Geociencia para el Liderazgo en la Diversidad (GOLD-EN) de la NSF (**Tabla 1**). Mediante la integración de socios del mundo académico, la administración pública y las instituciones internacionales, PANGEA impulsará la investigación fundamental y la preparación de la mano de obra en consonancia con la Visión 2030 del NSB.

7.2 Educar a una cohorte de estudiantes de posgrado

PANGEA brindará una oportunidad única a una generación de estudiantes universitarios y de posgrado de todo Estados Unidos y de los países tropicales anfitriones para desarrollar una investigación altamente integradora y transdisciplinaria. Los objetivos científicos de PANGEA permitirán a los estudiantes comprender los ecosistemas tropicales y su importancia para el planeta, apreciar los sistemas socio-ecológicos y llevar a cabo proyectos de investigación intensivos en datos, utilizando tanto observaciones de campo como conjuntos de datos de teledetección, y desarrollar habilidades críticas en la síntesis de datos (incluyendo inteligencia artificial, aprendizaje automático y asimilación de datos), así como la modelización basada en procesos. Equipar a los estudiantes con las habilidades para comprender la importancia y promover la conservación y la gestión sostenible de los paisajes forestales tropicales, manejando "big data", inteligencia artificial y modelado computacionalmente intensivo, preparará a los estudiantes para múltiples oportunidades de carrera en el mundo académico, el gobierno y la industria. Además, la implementación del proyecto PANGEA será inherentemente colaborativa, y reunirá a científicos de múltiples instituciones y

universidades, tanto dentro de los EE.UU. como a nivel internacional. Al participar en actividades de trabajo de campo y eventos científicos, los estudiantes universitarios y de posgrado interactuarán y colaborarán directamente con investigadores de la NASA y otras agencias estadounidenses (por ejemplo, DOE, USFS, USGS). Esto abrirá posibilidades para que los estudiantes sigan carreras a largo plazo en estas agencias y realicen actividades empresariales y del sector privado en sectores relacionados. PANGEA permitirá a los estudiantes desarrollar las habilidades de pensamiento crítico colaborativo necesarias para las asociaciones multiinstitucionales e internacionales.

PANGEA también continuará el papel crítico de la NASA en la promoción de una fuerte creación de capacidades a nivel internacional, basándose en la experiencia de LBA, durante la cual la creación de capacidades fue mutuamente beneficiosa para la contribución del Programa de Ecología Terrestre de la NASA a la primera fase de los esfuerzos de LBA (LBA-ECO) y para los anfitriones brasileños sudamericanos de la NASA. Brasil exigió un componente de formación y educación para cada investigación de LBA, definido por los recursos disponibles y generalmente vinculado a programas académicos dentro de Brasil. El grupo más grande de estudiantes entrenados dentro del LBA fueron estudiantes universitarios brasileños que fueron pagados para participar en proyectos científicos. Aunque estos estudiantes realizaban principalmente trabajos técnicos, muchos se convirtieron en coautores de artículos, y algunos incluso fueron autores principales. Este programa ayudó a identificar a estudiantes comprometidos con la obtención de títulos de máster y doctorado. Alrededor de 500 estudiantes brasileños obtuvieron títulos de máster y doctorado relacionados con las investigaciones del LBA. Aunque una pequeña parte de los estudiantes financiados lo fueron por proyectos de investigación de la NASA (principalmente para estudiantes que obtuvieron sus títulos en EE.UU.), la mayoría de las becas se concedieron a través de mecanismos brasileños existentes de sus ministerios nacionales de educación y ciencia y a través de fundaciones de investigación a nivel estatal. Aunque la inversión total en dólares fue inferior al 5% de la inversión de la NASA en LBA-ECO y otras actividades de investigación en el extranjero, los beneficios inmediatos y a largo plazo fueron enormes. En Brasil, muchos graduados del LBA pasaron a realizar importantes trabajos en el campo del medio ambiente en universidades, en agencias gubernamentales municipales, estatales y nacionales, y en ONG, superando las expectativas brasileñas sobre el impacto de la formación y educación del LBA.

La mayor oportunidad de PANGEA para el desarrollo de capacidades y la formación se encuentra dentro del equipo científico. Siguiendo los modelos LBA y BioSCape, la NASA puede fomentar o exigir que las propuestas se desarrollen conjuntamente con investigadores locales. Estos requisitos garantizaron que cerca del 50% del equipo científico de BioSCape procediera de instituciones sudafricanas. Del mismo modo, los anuncios de financiación de PANGEA pueden requerir o fomentar enérgicamente la formación, la educación y el desarrollo de capacidades como parte de las actividades propuestas, de forma similar a lo que se consiguió durante LBA. PANGEA puede trabajar directamente con iniciativas existentes como el Instituto de Tecnología de la Amazonía (AmiT), el equipo de la Fase 3 de LBA, la Iniciativa Científica de la Cuenca del Congo (CBSI), la Red de Investigación Forestal de África Central (R2FAC) y el programa de Investigación Aplicada en Ecología y Ciencias Sociales (RESSAC) para lograr este objetivo.

El enfoque de PANGEA sobre la ciencia equitativa, el desarrollo de capacidades y la formación se enfrentará directamente a la cuestión de las campañas de sobrevuelo y la ciencia paracaidista. Basándonos en los éxitos de LBA, creemos que PANGEA puede publicar 100 artículos de científicos africanos como primeros autores, lo que contribuirá a cerrar la brecha del Índice Paracaidista en África Central (Culotta et al., 2024). Estos científicos africanos continuarán el legado de PANGEA, en colaboración con colegas internacionales de todos los trópicos, mucho después de que finalice el proyecto.

Otro objetivo importante de la estrategia de desarrollo de capacidades de PANGEA es fortalecer y ampliar la comunidad de usuarios de datos terrestres de la NASA en los trópicos, incluidos los pueblos indígenas y las comunidades locales. Las actividades aerotransportadas de PANGEA generarán un gran entusiasmo en torno al potencial de la teledetección para muchas aplicaciones, incluidas las centradas en la mitigación del cambio climático y la vigilancia del carbono, la conservación de la biodiversidad, la agricultura sostenible y la prevención y vigilancia de los riesgos de catástrofe. El variado grupo de usuarios se beneficiará enormemente de los avances metodológicos de PANGEA para utilizar los activos satelitales de la NASA. PANGEA aprovechará el impulso creado por las campañas aerotransportadas para catalizar y promover una aplicación más amplia de los conjuntos de datos espaciales de la NASA, en particular los que son adecuados para su examen junto con los productos de datos aerotransportados, por ejemplo, EMIT, PACE, ECOSTRESS, GEDI, y en el futuro NISAR y SBG. Trabajando con socios regionales, PANGEA colaborará con los países anfitriones en el desarrollo de bancos de datos nacionales para que los conocimientos emergentes de PANGEA puedan integrarse y aplicarse a las demandas regionales y nacionales de promoción socioeconómica y desarrollo de políticas. El enfoque de PANGEA para el desarrollo de capacidades pretende crear grupos de usuarios de la NASA de adopción temprana en los trópicos, en particular para NISAR y SBG, así como para misiones de la ESA como BIOMASS, CHIME y FLEX. PANGEA se basará en la estrategia Earth Science to Action de la NASA para "crear capacidad a través de un conjunto amplio y diverso de asociaciones, tanto tradicionales como nuevas" (St Germain, 2024 - [Plan Estratégico ES2A](#)). Los socios de PANGEA incluirán "agencias gubernamentales nacionales e internacionales, instituciones académicas, organizaciones no gubernamentales e internacionales, el sector privado y organizaciones filantrópicas", en consonancia con dicha estrategia. PANGEA se asociará con los programas existentes de la NASA y con los esfuerzos de formación dirigidos por socios, en línea con el objetivo de "aprovechar las iniciativas existentes que amplifican el valor" que "podrían ser nacionales o internacionales" para "lograr tanto profundidad como amplitud en nuestro impacto y apoyo a la humanidad, siendo al mismo tiempo rentables" (St Germain, 2024 - [Plan Estratégico ES2A](#)). En **el Cuadro 7** se incluyen ejemplos.

En última instancia, PANGEA es una oportunidad para mejorar la colaboración y la comprensión entre continentes, dejar un legado de conocimientos y conjuntos de datos, y apoyar ahora la acción directa para conservar los bosques tropicales y mitigar el cambio climático. Quizá el legado más probable y duradero sea el núcleo fundacional de expertos formados y apoyados que contribuirán a liderar la próxima generación en avances científicos y tecnológicos y acciones orientadas a soluciones para afrontar los retos más acuciantes de la Tierra.

8 Estrategia de participación comunitaria

PANGEA colaborará con diversas comunidades para abordar cuestiones científicas, identificar sinergias con las prioridades locales de investigación y poner en marcha PANGEA de forma que resulte beneficioso para los paisajes y países que participarán en esta investigación, y que establezca y refuerce asociaciones a largo plazo entre instituciones estadounidenses e internacionales. La estrategia se basa en los conocimientos, la pericia y las experiencias compartidas a lo largo del estudio de PANGEA, que contó con la participación de más de 800 personas y 300 organizaciones de 42 países de los cinco continentes a través de (a) talleres consultivos, (b) actos de divulgación, (c) debates en grupos de trabajo, (d) reuniones bilaterales y (e) encuestas web. En Estados Unidos, PANGEA ha colaborado con más de 110 agencias federales e instituciones estadounidenses de 30 estados y Washington DC. En el Apéndice C se ofrece una descripción más detallada de los métodos de participación utilizados durante el estudio de alcance. A continuación, presentamos una lista de las comunidades prioritarias para la implicación en PANGEA, los principios que sustentan los esfuerzos de implicación de PANGEA y la estrategia de PANGEA para implicar a las comunidades locales y cultivar un legado positivo a largo plazo durante y después del proyecto.

Tabla 7. Socios y proveedores potenciales que podrían colaborar con PANGEA en actividades de formación y capacitación.

| SOCIO | ACTIVIDAD | PÚBLICO DESTINATARIO |
|-------------------------------------|--|--|
| AI4ESP | Trabajar con AI4ESP (Inteligencia Artificial para la Predictibilidad del Sistema Terrestre) para integrar la IA con los modelos de ES con el fin de mejorar la capacidad de predicción, abordar los retos científicos y mejorar la integración de datos y las técnicas de observación. | Investigadores y estudiantes, responsables políticos |
| AIMS | Formación de posgrado, investigación y compromiso público en matemáticas, ciencia y aprendizaje automático. La red AIMS cuenta con 5 centros de excelencia que imparten Másteres Africanos en Inteligencia Artificial (AMMI), incluidos los de Camerún, Ghana y Ruanda. La red AIMS cuenta con más de 2.400 antiguos alumnos de 44 países africanos, de los cuales el 33% son mujeres. | Estudiantes africanos |
| ARSET | Serie de seminarios web de formación en varias partes, basados en el modelo de formación presencial ensayado durante BioSCape. | Responsables políticos, académicos, científicos |
| ATBC | Formación, talleres y creación de redes entre investigadores en colaboración con la Asociación de Biología Tropical y Conservación (ATBC), que promueve la investigación, la educación y la comunicación sobre biología tropical y conservación. La ATBC cuenta con unos 1.000 miembros de 70 países, apoya el desarrollo de capacidades y organiza reuniones internacionales. | Miembros de la ATBC de más de 70 países |
| DAACs | Cuadernos de formación y talleres inspirados en los ya presentados en conferencias (por ejemplo, AGU, ESA, ATBC) que facilitan el acceso al EOS de la NASA. | Investigadores en todas las etapas de su carrera |
| DESARROLLA | Asociarse con los responsables de la toma de decisiones que estén interesados en utilizar los datos de la NASA sobre la Tierra para apoyar su trabajo. Cada socio tendría un equipo de DESARROLLO de 4-5 personas que trabajarían con ellos durante 10 semanas (renovables) para desarrollar la capacidad de utilizar los datos terrestres de la NASA para hacer frente a sus necesidades. | Los responsables de la toma de decisiones y el personal en general |
| FLUXNET | Formación y herramientas para utilizar/analizar datos de torres de flujo de covarianza inducida, incluso en varios idiomas (actualmente en español e inglés). PANGEA trabajará con FLUXNET para ampliar la traducción al francés y al portugués y desarrollar nuevos materiales de formación que integren la teledetección y los datos de torres de flujo. | Investigadores y estudiantes |
| GLOBE | Actividades educativas adaptadas localmente para estudiantes de primaria y secundaria, profesores y ciudadanos, incluidos elementos de formación de formadores que permitan la multiplicación. Oportunidad de canalizar el entusiasmo por las campañas aerotransportadas y los datos de observación de la Tierra. | Estudiantes K-12, profesores y ciudadanos |
| INICIATIVA DE LOS PUEBLOS INDÍGENAS | Colaborar con las comunidades indígenas para mejorar el uso del EOS en la toma de decisiones informadas. PANGEA desarrolló asociaciones con organizaciones de alianzas indígenas en los trópicos, incluyendo el GATC y RRI, y coordinará con la Iniciativa de Pueblos Indígenas de la NASA para ampliar los esfuerzos para co-desarrollar capacitaciones, apoyar proyectos dirigidos por indígenas, fortalecer las relaciones y crear oportunidades para la inclusión indígena en la EDS de la NASA. | Comunidades indígenas |
| NSF RISE | Fomentar colaboraciones transdisciplinarias que involucren a la comunidad de geociencias en general para impulsar descubrimientos e innovaciones en el desarrollo de la mano de obra. | Investigadores y estudiantes |
| SELPER | Identificar oportunidades de asociación con SELPER, la Sociedad Latinoamericana de Teledetección y Sistemas de Información Espacial, para desarrollar actividades de formación e investigación en teledetección en todos los países latinoamericanos. SELPER promueve estas actividades en talleres, simposios y cursos cortos, a menudo en colaboración con la comunidad internacional en general. | Miembros de SELPER y participantes en reuniones científicas |

| SOCIO | ACTIVIDAD | PÚBLICO DESTINATARIO |
|--------|---|---|
| SERVIR | Coordinar con los centros SERVIR el desarrollo de servicios personalizados para las necesidades específicas de toma de decisiones de las organizaciones socias locales, basándose en el conjunto de herramientas de planificación de SERVIR para proporcionar instrucción específica a nivel regional sobre cómo evaluar y llevar a cabo intervenciones de impacto en la agricultura, la restauración forestal y otras. | Centros SERVIR, socios de ejecución (gobiernos locales y nacionales, ONG) |

8.1 Co-desarrollo y socios de PANGEA

La investigación de PANGEA sobre los bosques tropicales complementará y ampliará muchos de los esfuerzos existentes. Los datos adquiridos durante las campañas de campo de PANGEA se utilizarán para inicializar, evaluar y restringir las predicciones de múltiples modelos de ecosistemas terrestres basados en procesos y Modelos del Sistema Tierra en los bosques tropicales. Ejemplos de modelos incluyen FATES, un modelo cuyo desarrollo es apoyado por el DOE a través de NGEE-Tropics, así como múltiples modelos con apoyo actual y previo de la NASA, tales como BiomeE (NASA-GISS), ED2 (liderado por la Universidad de Harvard), ED3 (Universidad de Maryland), el componente terrestre de CliMA (Instituto Tecnológico de California y JPL), y CARDAMOM (JPL) (Sección 6.3). PANGEA mejorará los esfuerzos de SilvaCarbon mediante la incorporación de una gama más amplia de sitios de campo y datos de teledetección, ofreciendo una visión más profunda de la dinámica del carbono y los procesos forestales a escala regional y mundial, al tiempo que refuerza sus análisis de seguimiento, notificación y verificación (MRV). Una mejor comprensión y análisis de la dinámica del carbono y de las funciones de los ecosistemas serán elementos clave para informar al Programa Internacional del USDA USFS para desarrollar estrategias de gestión y conservación forestal con organizaciones internacionales. Algunos de estos esfuerzos se limitan a pequeñas áreas geográficas o representan redes de sitios individuales. Otros, como la iniciativa One Forest Vision (OFVi) y GEO-TREES, tienen ambiciones pantropicales como PANGEA. El abanico de oportunidades de asociación se ilustra con ejemplos en **la Tabla 5 y la Tabla B-1**. En el Apéndice B se describen con más detalle las comunidades con las que PANGEA se comprometerá, se enumeran los socios actuales de PANGEA según el tipo de comunidad y se analizan consideraciones de compromiso más específicas para cada una de ellas.

PANGEA interpreta la palabra *comunidad* en sentido amplio para abarcar una gran variedad de grupos formales e informales de personas que se perciben a sí mismas como miembros de un grupo, que pueden compartir intereses, experiencias, recursos, actividades, profesiones, medios de vida, cultura, geografía, orígenes, idioma o cualquier combinación de los anteriores. El estudio de alcance identificó diez tipos de comunidades con las que PANGEA priorizará el compromiso: (1) NASA; (2) otras agencias gubernamentales de EE. (4) la comunidad académica, las instituciones científicas y las sociedades científicas; (5) las iniciativas internacionales coordinadas de investigación; (6) la sociedad civil, incluidas las organizaciones conservacionistas; (7) los pueblos indígenas y las alianzas y organizaciones comunitarias locales; (8) la comunidad de donantes; (9) el sector privado, incluidas las industrias agrícola y maderera; y (10) las agencias intergubernamentales.

PANGEA se comprometerá a implicar a las comunidades de forma inclusiva y no jerárquica. Cada comunidad desempeñará un papel en la planificación, ejecución y legado a largo plazo de PANGEA. El compromiso respetuoso y equitativo con los pueblos indígenas y las organizaciones de la sociedad civil, por ejemplo, es esencial para conocer los ecosistemas y las necesidades locales, acceder a los lugares de investigación, potenciar la recopilación de datos sobre el terreno a largo plazo y conectar la investigación de PANGEA con la toma de decisiones sobre la gestión local de la tierra. PANGEA debe colaborar con instituciones científicas locales e internacionales para aprovechar su trabajo, identificar sinergias y aprovechar la cofinanciación y los recursos para lograr más en colaboración, e invertir en formación oficial y planes de estudio para que las

generaciones actuales y futuras de científicos puedan beneficiarse de PANGEA. El apoyo de las agencias gubernamentales será fundamental para los esfuerzos de recogida de datos aéreos y terrestres de PANGEA y para las estrategias de Acción por la Tierra. Las agencias gubernamentales nacionales y subnacionales también están bien posicionadas para aplicar los hallazgos clave de la investigación de PANGEA con el fin de mejorar el seguimiento y la información sobre el clima y la biodiversidad en todo el país, y para desarrollar estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad mejor informadas. La colaboración con organizaciones intergubernamentales y donantes preocupados por el clima puede permitir a PANGEA apoyar actividades que no serían posibles utilizando únicamente la financiación de la NASA, incluida la colaboración con instituciones locales de una manera más inclusiva y equitativa desde el punto de vista financiero. Muchas empresas privadas y asociaciones industriales están deseosas de aprender más sobre sus entornos cambiantes y de recopilar datos terrestres, aéreos y espaciales para comprender su impacto y garantizar la sostenibilidad de sus productos agrícolas y cadenas de suministro de otros productos. Aunque los intereses, objetivos y posibles puntos de compromiso y colaboración varían mucho, todas estas comunidades pueden contribuir al éxito y al legado positivo a largo plazo de PANGEA.

8.2 Estrategia de compromiso

Las actividades de PANGEA se coordinarán con los proyectos existentes y futuros de otras agencias y otros países. Basándose en las lecciones aprendidas del programa LBA liderado por Brasil, PANGEA promoverá un comité científico directivo internacional (CSC). El SSC reforzará y se coordinará con las organizaciones, alianzas y actividades existentes para garantizar que PANGEA apoye el desarrollo de una red de redes a largo plazo que mejore y mantenga la accesibilidad, usabilidad, transferibilidad y beneficios de los datos, métodos, modelos y conocimientos sobre los ecosistemas tropicales. El CDC de PANGEA codesarrollará estrategias para garantizar que los científicos, las instituciones locales y las comunidades trabajen juntos a lo largo del proyecto PANGEA para colaborar eficazmente en diversos contextos geográficos y culturales. Durante la LBA, el CDC se reunió dos veces al año y sirvió de centro de intercambio de información entre los proyectos nacionales. Este comité tenía una serie de atribuciones, entre ellas la recomendación de proyectos para su inclusión en el LBA basándose en criterios como la temática, la adecuación de los acuerdos de contrapartida y los planes de desarrollo de capacidades. El CDC asumió gran parte de la carga que, de otro modo, habría recaído en los gestores de las agencias nacionales. Las organizaciones existentes, como la Iniciativa Científica de la Cuenca del Congo y el LBA brasileño, están preparadas para actuar como socios en la coordinación de los estudios científicos de PANGEA. Del mismo modo, PANGEA estableció relaciones con el GATC durante el proceso de definición del alcance. El GATC, creado a lo largo de 10 años por comunidades indígenas tropicales, representa a 24 países y a más de 35 millones de personas que ocupan más de 958 millones de hectáreas de tierra. La asociación con el GATC apoyará la capacidad de PANGEA para involucrar a las comunidades indígenas de una manera significativa y mutuamente beneficiosa.

Durante ABoVE, la Oficina del Ciclo del Carbono y los Ecosistemas de la NASA inició consultas con las Primeras Naciones canadienses y los grupos indígenas de Alaska antes de reunir al equipo de definición científica. ABoVE se comprometió proactivamente con los miembros de las Primeras Naciones para finalizar el diseño experimental en la Fase 1, antes de que comenzaran las actividades de campo. El equipo de ABoVE mantuvo el contacto con los miembros de las Primeras Naciones para ponerles al corriente de las actividades, sobre todo en relación con las perturbaciones pertinentes (por ejemplo, incendios). Por ejemplo, ABoVE dio prioridad a volver a visitar las zonas quemadas y a proporcionar información para ayudar a las comunidades a comprender, adaptarse y superar las catástrofes. PANGEA se basará en las importantes lecciones aprendidas de ABoVE.

El proceso de coproducción comenzó durante la determinación del alcance de PANGEA y la redacción de este libro blanco, que se ha llevado a cabo en colaboración con líderes indígenas de la Alianza Global de Comunidades Territoriales (GATC). Si PANGEA es seleccionado, la coproducción con los pueblos indígenas y las comunidades locales comenzará inmediatamente y se mantendrá a lo largo de todo el proceso.

PANGEA también se asociará con muchas instituciones científicas situadas en los bosques tropicales o con experiencia en la investigación de los mismos. PANGEA establecerá una red pionera de expertos en investigación, científicos que inician su carrera e instituciones científicas. Un interés particular de esta asociación es facilitar el desarrollo conjunto de conocimientos y apoyar la transferencia de tecnología para generar capacidad en las instituciones locales y regionales. La red PANGEA se centrará especialmente en incluir, comprometer y formar a la próxima generación de científicos y técnicos. PANGEA implicará a las instituciones científicas asociadas de las siguientes maneras:

- Co-desarrollar la investigación, el análisis y las aplicaciones potenciales.
- Identificar los emplazamientos de campo, la infraestructura de investigación y las capacidades críticas para los objetivos de investigación de PANGEA.
- Coproducir, compartir y gestionar datos; apoyar el desarrollo de infraestructuras de datos, equipos y conocimientos de gestión en instituciones locales y regionales; apoyar la creación de bancos de datos regionales o nacionales para conservar datos de campo y de teledetección y resultados de modelos numéricos, de modo que los conocimientos emergentes puedan integrarse y aplicarse a las demandas regionales y nacionales de desarrollo socioeconómico y elaboración de políticas.
- Reforzar y ampliar la infraestructura y la instrumentación de investigación para que las instituciones científicas locales y regionales puedan desarrollar y llevar a cabo investigaciones a largo plazo.
- Diseñar y aplicar estrategias de apoyo a la capacitación del profesorado y de los investigadores noveles en universidades e institutos de investigación.

Las aplicaciones de PANGEA también tienen un fuerte potencial para involucrar al sector privado, incluyendo, pero no limitado a (a) agroindustrias y cooperativas que cultivan y/o cosechan productos agrícolas, madereros y forestales no madereros; (b) industrias extractivas; (c) empresas energéticas; (d) empresas de big data; (e) conglomerados e instituciones financieras que invierten en, compran y/o venden cualquiera de los tipos de empresas antes mencionados; y (f) empresas dedicadas al ecoturismo. El perfil de las empresas presentes en cada paisaje donde se implante PANGEA variará, desde corporaciones hasta pequeñas y medianas empresas, cooperativas y asociaciones.

9 Poner en práctica las ciencias de la Tierra

PANGEA hace hincapié en los biomas tropicales históricamente poco estudiados y capacita a una de las regiones más vulnerables del planeta para hacer frente a las consecuencias del cambio climático y del uso de la tierra, al tiempo que reconoce y documenta las contribuciones globales de la biodiversidad tropical a la resiliencia en el sistema interconectado de la Tierra. PANGEA dará prioridad a los esfuerzos estratégicos de la NASA de la Ciencia de la Tierra a la Acción (ES2A) que cierran la brecha entre el rápido avance de la tecnología y las necesidades de la sociedad para acceder a plataformas de toma de decisiones informadas por la ciencia.

La consecución de los objetivos científicos y de medición de PANGEA mejorará las capacidades de vigilancia en los biomas forestales tropicales de forma que se satisfagan las necesidades directas de los usuarios finales, donde las lagunas de datos y conocimientos limitan la utilidad de los nuevos y futuros

sensores satelitales. En esta sección se presentan las formas en que PANGEA facilitará el paso de las Ciencias de la Tierra a la Acción (ES2A) en campos críticos como el cambio climático y la vigilancia del carbono, la conservación de la biodiversidad y la agricultura y los medios de vida sostenibles. La asimilación de los productos de la investigación requiere un compromiso significativo por parte del usuario final, por lo que esta sección también detalla los procesos actuales y futuros que el proyecto emplea para garantizar la asimilación de los resultados de la investigación por parte de los usuarios. La participación temprana, intensiva y diversa de los socios de PANGEA durante la fase de definición del alcance para el codiseño es fundamental para garantizar la asimilación y el uso de los productos de datos. El compromiso de los usuarios finales potenciales en una amplia gama de foros como la COP 16 de Biodiversidad en Colombia ha demostrado el interés en los productos de PANGEA por parte de una amplia variedad de usuarios finales potenciales, incluyendo el sector privado, el gobierno, las ONG y los actores académicos. Basándose en la información obtenida en la fase de definición del alcance (véanse los Apéndices C y F), los productos de datos de PANGEA serán muy accesibles y fáciles de usar, e incluirán información sobre enfoques de ampliación, ofrecerán materiales educativos y continuarán un diálogo bidireccional que dé a conocer PANGEA y sus productos al tiempo que recoge información sobre las necesidades de los usuarios. PANGEA planea avanzar en las metodologías para entrelazar los conocimientos locales, tradicionales y ecológicos con los datos de teledetección, lo que ofrece tanto oportunidades para mejorar la comprensión científica como para desenterrar rutas novedosas para poner los productos de PANGEA en manos de los responsables de la toma de decisiones y de la acción.

9.1 Aplicaciones de los resultados de la investigación PANGEA

9.1.1 Estabilidad del secuestro de carbono y flujos de metano

Tabla 9. Aplicaciones de la investigación PANGEA para la estabilidad del secuestro de carbono y los flujos de metano.

GCF-TF: Grupo de Trabajo de Gobernadores sobre Clima y Bosques. OSFAC: Observatorio Satelital de los Bosques de África Central.

| PREGUNTAS CIENTÍFICAS | APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN | POSIBLES SOCIOS Y/O PUNTOS DE VENTA |
|---|---|---|
| Q1, Q2, Q3, Q8, Q15, Q16, Q18-Q20, Q25, Q27 | Cartografía y cuantificación de la estabilidad a largo plazo del secuestro de carbono (es decir, permanencia en los mercados de carbono) | U.S. GHG Center, GEO-TREES, CTrees, Land and Carbon Lab (WRI), OSFAC, GCF-TF, Woodwell, SilvaCarbon, IPCC |
| Q1, Q2, Q3, Q18, Q27 | Predicciones sobre el flujo de metano tropical y su cuantificación | U.S. GHG Center, SERVIR, WRI |

Cartografía y seguimiento de las reservas y flujos de carbono tropical: Estas actividades son fundamentales para cerrar el presupuesto mundial de carbono, limitar las proyecciones climáticas y mejorar la medición, notificación y validación (MRV) de los créditos de carbono. Para ello es necesario mejorar las proyecciones climáticas reduciendo la incertidumbre en torno a los flujos de carbono de los bosques tropicales, los cambios en el uso de la tierra tropical y las respuestas de los bosques tropicales a los cambios climáticos. Los resultados de PANGEA pueden mejorar nuestra comprensión del presupuesto de carbono, apoyar los mercados de carbono y mejorar la comprensión de las emisiones de CH₄. PANGEA se coordinará con la actividad del Centro de Gases de Efecto Invernadero de EE.UU. para determinar las áreas de alineación y

las oportunidades para que PANGEA contribuya con datos y comprensión que satisfagan las necesidades de las partes interesadas (National GHG MMIS Strategy, 2023).

Comprender la contribución de los bosques tropicales al balance de carbono: Según el informe de marzo de 2023 del Comité de Acción Rápida (FTAC) sobre Servicios Climáticos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (NSTC), es fundamental mejorar las proyecciones sobre el cambio climático, especialmente reduciendo la incertidumbre en torno a los flujos de carbono de los bosques tropicales, los cambios en el uso de la tierra en los trópicos y las respuestas de los bosques tropicales al cambio climático. El 6º Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC AR6) señaló la promesa de la teledetección para mejorar la precisión de las estimaciones del carbono forestal, pero enumeró la incertidumbre en las estimaciones de las observaciones de la Tierra como una deficiencia significativa ([IPCC AR6](#)). PANGEA ofrece la oportunidad de abordar directamente esta limitación, por ejemplo, proporcionando al Grupo de Trabajo III del IPCC las respuestas a las Preguntas Científicas 2, 3, 8, 13, 14 y 25-27 durante su desarrollo de los informes de evaluación séptimo y octavo, lo que podría disminuir la incertidumbre y mejorar las estimaciones de carbono.

Mejorar el mercado de financiación del carbono: Los enfoques de financiación del carbono han ganado popularidad en las comunidades tropicales y consisten en que las entidades contaminantes transfieran pagos a los gobiernos y comunidades locales por diversas medidas de reparación de las emisiones de carbono, como la protección de los bosques, la reforestación, la mejora de la gestión forestal y el establecimiento de plantaciones forestales (Anderegg et al., 2020; Morita & Matsumoto, 2023). Sin embargo, los mercados de carbono se ven limitados por la falta de confianza en los métodos, los elevados costes de seguimiento y las crecientes preocupaciones relacionadas con su viabilidad a largo plazo (Anderegg et al., 2020; Pan et al., 2024). Los avances de PANGEA en la comprensión basada en procesos, las reservas de carbono tropical y el mapeo de flujos, y las predicciones de modelos espacialmente explícitos y restringidos del futuro sumidero de tierras tropicales pueden apoyar directamente las herramientas para mapear y cuantificar la estabilidad a largo plazo del secuestro de carbono de los bosques tropicales, incluyendo

- Colaborar con el GATC para que las comunidades locales e indígenas puedan combinar los resultados de PANGEA sobre los flujos de carbono en sus territorios con el seguimiento comunitario de los cambios en la tierra para estimar el secuestro de carbono para la validación y comercialización de créditos;
- Colaboración con el Grupo de Trabajo de Gobernadores sobre Clima y Bosques (GCF-TF) para apoyar la aplicación de su Plan de la Nueva Economía Forestal proporcionando datos sobre reservas de carbono, flujos y biodiversidad interconectada que evalúen el impacto de las estrategias jurisdiccionales de descarbonización; y
- Trabajar con el Forest Stewardship Council (FSC) para aprovechar los hallazgos de PANGEA y los avances metodológicos sobre las reservas de carbono forestal y las respuestas de los flujos al cambio climático y las interacciones entre plantas y animales para desarrollar un sistema de apoyo a la toma de decisiones que ayude a los titulares de certificados a mitigar los impactos climáticos sobre la silvicultura en los trópicos y a gestionar los bosques de forma más eficaz para obtener resultados combinados de secuestro de carbono y conservación de la biodiversidad.

Cartografía y cuantificación de las predicciones del flujo de metano: La incertidumbre en la predicción de las futuras emisiones de metano de los trópicos podría dar lugar a predicciones climáticas globales inexactas, lo que dificultaría la evaluación del alcance total de los impactos del cambio climático. Si mejoramos nuestra comprensión de los flujos de metano tropical, podremos afinar los presupuestos globales de carbono, anticipar mejor los futuros cambios climáticos y fundamentar estrategias de mitigación más eficaces para frenar las emisiones de gases de efecto invernadero. PANGEA mejorará las

capacidades de vigilancia de los flujos naturales y antropogénicos de metano tropical mediante teledetección por satélite, en consonancia con las necesidades y actividades que surjan del Centro de Gases de Efecto Invernadero de Estados Unidos. Estos esfuerzos se llevarán a cabo en colaboración con socios como los centros regionales de SERVIR y el Laboratorio de Tierra y Carbono dirigido por el Instituto de Recursos Mundiales para avanzar en las capacidades desde la experiencia técnica local hasta la cartografía global y las aplicaciones de monitorización.

9.1.2 Conservación de la biodiversidad

Tabla 10. Aplicaciones de la investigación PANGEA para la conservación de la biodiversidad.

| PREGUNTAS CIENTÍFICAS | APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN | POSIBLES SOCIOS Y/O PUNTOS DE VENTA |
|---|--|---|
| Q5, Q6, Q7, Q10, Q11, Q12, Q13, Q17 | Cartografía de la biodiversidad para apoyar la conectividad del paisaje y la implantación de corredores y la restauración de los bosques tropicales (en consonancia con el Atlas de Ecosistemas). | Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Alianza Bioversity CIAT, OSFAC, Conservación Internacional, Agencia Espacial Europea, Oficinas Regionales de la UICN, AFR100 |
| Q5, Q6, Q10, Q11, Q12, Q13, Q17, Q23-24, Q26, Q28 | Capacitar y elevar a las comunidades indígenas, locales y tradicionales mediante la integración de IEK, LEK y TEK con la teledetección . | Iniciativa de los Pueblos Indígenas de la NASA, Alianza Mundial de Comunidades Territoriales, Iniciativa de Derechos y Recursos, Escuela de Conocimientos Indígenas y Locales del Instituto de la Cuenca del Congo, MapBiomas, Woodwell Climate Research Center |

El primer objetivo del Marco Global de Biodiversidad 2030 es "Planificar y gestionar todas las áreas para reducir la pérdida de biodiversidad" respetando los derechos de los pueblos indígenas y las comunidades locales (CDB, 2030). Para ello se necesita un proyecto de la envergadura de PANGEA. Los objetivos 2 y 3 consisten en restaurar el 30% de todos los ecosistemas degradados y conservar el 30% de toda la tierra, el agua y el mar. Sin embargo, la escasez de datos y los problemas de calidad han limitado la capacidad de evaluar siquiera los avances en relación con estos objetivos ([Evaluación de la Declaración Forestal](#), 2024). PANGEA apoyará la conservación de la biodiversidad de tres maneras:

Mejor comprensión de la biodiversidad: PANGEA mejorará el conocimiento de la biodiversidad a distintas escalas. **El Atlas Mundial de Ecosistemas del Grupo de Observaciones de la Tierra (GEO)**, apoyado por el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), trabaja para reunir mapas de ecosistemas mundiales, regionales y nacionales de alta calidad en un único recurso abierto en línea. El Atlas Global de Ecosistemas tiene como prioridad cartografiar "la estructura y función de los ecosistemas del mundo con un detalle sin precedentes".

PANGEA colmará importantes lagunas de datos de calibración y validación en el bioma más diverso de la Tierra y apoyará directamente este esfuerzo en colaboración con el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), la Agencia Espacial Europea (ESA), la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI) y otros. Asimismo, PANGEA catalizará la teledetección de la NASA de Variables Esenciales de Biodiversidad (VEB) como los efectos biológicos del fuego y las inundaciones irregulares para abordar las lagunas de datos de alta prioridad identificadas por la Red de Observación de la Biodiversidad del Grupo de Observaciones de la Tierra (GEO BON; Skidmore et al., 2021). PANGEA entiende que entretejer diversas fuentes de conocimiento mejora la comprensión general y priorizará específicamente el compromiso con las alianzas y organizaciones de los pueblos indígenas y las comunidades locales para empoderar y elevar a las comunidades indígenas, locales y tradicionales a través de la **integración del conocimiento indígena, local y tradicional (IEK, LEK, TEK) con la**

teledetección. PANGEA apoyará los esfuerzos iniciados y liderados por la Alianza Global de Comunidades Territoriales (GATC), cuyo movimiento de mujeres ya está llevando a cabo la formación para la recogida de datos con drones, y la Iniciativa para los Derechos y Recursos (RRI), que se ha asociado con Woodwell en el pasado para cuantificar y estimar el carbono almacenado en las tierras de las comunidades indígenas, afrodescendientes y locales ([Policy Brief](#), [Research Report](#)). Existe un gran interés por iniciativas similares que hagan hincapié en la biodiversidad.

Facilitar las acciones de conservación de la biodiversidad: La conservación de la biodiversidad puede avanzar considerablemente con observaciones a gran escala a través de gradientes de perturbación. Por ejemplo, PANGEA puede trabajar con el organismo regional de coordinación medioambiental de la cuenca del Congo, la Comisión de Bosques de África Central (COMIFAC), y su oficina regional de teledetección, OSFAC, para proporcionar mapas actualizados de las posibles respuestas de los bosques al cambio climático, lo que permitirá a los planificadores del uso de la tierra identificar posibles corredores de alto valor para la fauna silvestre con fines de conservación transfronteriza. Los usuarios sobre el terreno, como el Centro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Gabón (CENAREST), el Ministerio de Bosques y Fauna de Camerún (MINFOF) y el Instituto Congoleño para la Conservación de la Naturaleza (ICCN), pueden utilizar estas herramientas, datos y conocimientos para orientar y supervisar las actividades de conservación. Del mismo modo, los esfuerzos de restauración forestal requieren una mejor comprensión de las interacciones entre plantas y animales, incluyendo qué especies pueden apoyar eficazmente los esfuerzos de restauración y dónde. Al abordar las preguntas científicas 10-13, 18 y 27, PANGEA delineará los complejos procesos que sustentan los paisajes forestales tropicales en regeneración. Estos resultados podrán compartirse con las numerosas iniciativas de plantación de árboles en los trópicos para mejorar su eficacia y eficiencia. Este trabajo es fundamental para iniciativas como AFR100, la Iniciativa para la Restauración del Paisaje Forestal Africano, destinada a restaurar las tierras degradadas y deforestadas de África, y 30x30.

Seguimiento y mejora de los esfuerzos de conservación de la biodiversidad: Además, las asociaciones con colaboradores clave identificados en el estudio de alcance acelerarán el seguimiento de la biodiversidad y el desarrollo de plataformas de usuarios. Por ejemplo, la llegada de iniciativas innovadoras de gestión de la tierra, como Otras Medidas de Conservación Eficaces (OECM), prometen alcanzar objetivos internacionales como el 30x30, pero se desconoce el impacto de estos nuevos tipos de gestión sobre la biodiversidad. Organizaciones como la UICN y la Campaña por la Naturaleza pueden utilizar los datos y metodologías de PANGEA, que mejoran la evaluación e identificación de los cambios en el uso de la tierra, para evaluar la eficacia de las OECM como herramientas de conservación de la biodiversidad. Del mismo modo, PANGEA puede asociarse con iniciativas de financiación de la naturaleza como Fund for the Amazon y Tropical Forests Forever Fund para desarrollar enfoques integrales y de bajo coste que permitan controlar si su financiación está repercutiendo en la biodiversidad.

9.1.3 Agricultura y medios de subsistencia sostenibles

Tabla 11. Aplicaciones de la investigación PANGEA para la agricultura y los medios de vida sostenibles.

| PREGUNTAS CIENTÍFICAS | APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN | POSIBLES SOCIOS Y/O PUNTOS DE VENTA |
|----------------------------|--|--|
| Q6, Q9, Q14, Q17 | Intensificar la producción agrícola y mejorar los rendimientos | SERVIR, IITA, NASA Harvest, Land and Carbon Lab (WRI) |
| Q14, Q16, Q17, Q19 | Fomento de la producción agrícola sostenible, incluida la influencia del clima | SERVIR, IITA, Alianza Bioversity & CIAT |
| P3, P16, P19 | Mejorar la trazabilidad de los productos agrícolas en la cadena de suministro | Alianza Bioversity & CIAT, WRI, sector privado, organismos de certificación, reguladores |
| Q3, Q8, Q14, Q15, Q16, Q27 | Mejora de las alertas y la respuesta ante catástrofes (incendios, inundaciones, sequías, etc.) | SERVIR, IITA, Alianza Biodiversidad & CIAT, MapBiomas, Observatorio Nacional del Cambio Climático de Camerún |

Los ecosistemas tropicales albergan a 3.000 millones de personas y producen productos agrícolas que se exportan y consumen en todo el mundo. Identificar alternativas bioeconómicas a la producción agrícola y, al mismo tiempo, intensificar la agricultura en las regiones tropicales, hacerla más sostenible y resistente al cambio climático, y mejorar la capacidad de rastrear los productos agrícolas hasta su origen, son todos aspectos críticos para reducir la presión de la deforestación sobre los bosques tropicales y, al mismo tiempo, satisfacer la creciente demanda mundial. PANGEA apoyará estos esfuerzos de las siguientes maneras:

Mejora de la intensificación: El seguimiento por satélite de los cultivos ofrece la posibilidad de evaluar los niveles de producción casi en tiempo real, comparando zonas de intervención y de control a través de distancias significativas para proporcionar datos críticos sobre la eficacia de los esfuerzos de intensificación y apoyar la toma de decisiones de los agricultores. En la cuenca del Congo, donde la mayoría de las explotaciones son pequeñas, están intercaladas en un mosaico con bosques y son de difícil acceso, la teledetección puede ayudar a comprender la penetración de nuevos métodos y tecnologías a distancia. PANGEA impulsará la capacidad de utilizar la teledetección por satélite para la agricultura de precisión en los trópicos, incluyendo la mejora de la cartografía de los tipos de cultivos, la cartografía de la eficiencia en el uso de nutrientes y agua, y la estimación del rendimiento de los cultivos. Este trabajo se llevará a cabo en colaboración con socios clave que trabajan en este ámbito, incluida la colaboración con el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) para apoyar el Laboratorio de Tierra y Carbono.

Mayor sostenibilidad y capacidad de adaptación: La agricultura sometida al cambio climático exigirá que los agricultores cultiven más alimentos en circunstancias cada vez más impredecibles, como cambios en los régimenes de precipitaciones y períodos de calor intenso. Como uno de los principales factores que contribuyen al cambio climático, también existe un movimiento para hacer que la agricultura sea más sostenible, mediante la disminución del uso de fertilizantes y pesticidas, la reducción del consumo de agua y el aumento de los esfuerzos para controlar la erosión basados en la teledetección de las necesidades de los cultivos. Este tipo de "agricultura de precisión" ya es habitual en Estados Unidos, pero no en gran parte de los trópicos porque los datos y métodos subyacentes son incompletos. PANGEA trabajará con colegas del Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA), la Alianza Bioversity-CIAT y el Instituto Internacional de Gestión del Agua (IWMI) para desarrollar e implantar técnicas como el seguimiento espacialmente explícito de la salud de los cultivos a escala agrícola, que permitirá a estas organizaciones identificar rápidamente las amenazas a la seguridad alimentaria y responder con medidas paliativas.

Mejora de la trazabilidad: En todo el mundo aumenta la demanda de vincular los productos agrícolas con la explotación exacta en la que se cultivaron, impulsada tanto por la demanda de los consumidores como por la presión reguladora de nuevos regímenes políticos como el Reglamento de la Unión Europea sobre Productos Básicos Libres de Deforestación (EUDR) y un proyecto de ley similar que se está estudiando en EE.UU. PANGEA permitirá el uso de nuevos sensores como NISAR, BIOMASS y SBG para detectar múltiples formas de expansión agrícola en los bosques tropicales, lo que facilitará a las empresas de productos agrícolas evaluar el impacto del cambio de uso de la tierra en sus cadenas de valor. Empresas como Satelligence utilizarán los datos de PANGEA para demostrar el cumplimiento de la EUDR para algunas de las mayores empresas alimentarias del mundo. Las mejoras metodológicas derivadas de la adquisición de datos de PANGEA también pueden mejorar nuestra capacidad de utilizar herramientas de teledetección para distinguir entre la agrosilvicultura compleja y los bosques secundarios, actualmente una laguna importante que merma la capacidad de reconocer y cartografiar las explotaciones de café y cacao que utilizan métodos de sombreado más sostenibles. PANGEA trabajará con socios como Alliance Bioversity CIAT para aplicar estas mejoras con el fin de ayudar a los agricultores y a las cooperativas de agricultores a demostrar su cumplimiento y a comercializar productos de alto valor. Estas actividades también posicionan a PANGEA para influir en otros sectores de los medios de subsistencia, como los pagos por servicios ecosistémicos, las bioeconomías y los productos forestales no madereros.

Mejora de las alertas y la respuesta ante catástrofes: Las sequías, las inundaciones, las plagas y el calor extremo amenazan la producción agrícola en los trópicos. En los lugares donde la adaptación de la agricultura al cambio climático es insuficiente, son fundamentales políticas y prácticas como los sistemas de alerta temprana, las alertas de catástrofes y la mejora de los productos de seguros para los pequeños agricultores. Los esfuerzos de PANGEA por cartografiar las actividades y los cambios en el uso de la tierra, comprender los efectos del clima en la fenología y estimar las concentraciones de nutrientes vegetales a distancia servirán de apoyo a estas soluciones políticas. Por ejemplo, la mejora de la teledetección de los límites de las explotaciones, el tipo de cultivo y el rendimiento de las cosechas a escala de campo reducirá los costes de seguimiento de los productos de seguros basados en el clima para los pequeños agricultores.

Para obtener beneficios potenciales para la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia, PANGEA ha implicado a socios de investigación agrícola como NASA Harvest, SERVIR, el Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), incluido el IITA, y socios que trabajan en el nexo entre bosques y agricultura, como el CIAT, el Instituto de Recursos Mundiales y el Centro de Investigación Forestal Internacional y Agroforestal Mundial (CIFOR-ICRAF). La información compartida por estos socios durante el proceso de definición del alcance de PANGEA sirvió de base directa a las preguntas científicas de PANGEA para potenciar los resultados de Acción por la Tierra. Socios como el IITA y el CIAT están especializados en trasladar los resultados de la investigación a la práctica y cuentan con décadas de experiencia con socios gubernamentales y del sector privado.

9.2 Proceso para poner las Ciencias de la Tierra en acción

9.2.1 Compromiso de los usuarios

El interés sustutivo por sí solo no basta para garantizar que se utilicen los productos de la NASA. La aplicación eficaz de la investigación requiere que las comunidades de usuarios finales se identifiquen y participen desde el principio y que sean socios en el diseño de la investigación y el desarrollo de herramientas. Esto requiere una planificación avanzada, intención y recursos. Por ello, PANGEA ha invertido desde el inicio de la fase de definición del alcance en sentar las bases para la traslación de la investigación. En concreto, PANGEA aborda los siguientes principios rectores de la Estrategia ES2A de la NASA (2024-2034):

- **Amplificar el impacto mediante asociaciones:** La inversión de PANGEA en la participación de la comunidad ha atraído a una amplia gama de socios, incluidos los gobiernos internacionales, donantes y comunidades locales (véase *la Sección 8* para más detalles sobre la participación de la comunidad). Estos socios incluyen usuarios potenciales, contribuyentes de datos y posibles financiadores de aplicaciones, estos últimos ayudarán a que el trabajo de PANGEA sea rentable al complementar los recursos de Ciencias de la Tierra de la NASA con fondos para apoyar el desarrollo de capacidades, la participación de la comunidad y la traducción de la investigación (véase *la Sección 10.2, Oportunidades de cofinanciación*, para obtener información adicional). PANGEA también aporta amplias asociaciones internacionales, desde agencias espaciales nacionales que podrían proporcionar datos complementarios hasta comunidades tropicales que participarán en la recogida de datos y, potencialmente, en su uso y actuación. PANGEA involucró a estos socios al principio del proceso para aumentar su inversión y su aportación en el desarrollo conjunto de los posibles productos finales.
- **Involucrar a una fuerza de trabajo diversa y a una comunidad de Ciencias de la Tierra más amplia:** Los objetivos transdisciplinarios de PANGEA cuentan con el apoyo de un equipo diverso que va desde científicos de datos a economistas y que proceden de la NASA, el mundo académico, organizaciones sin ánimo de lucro, otras agencias federales y gobiernos de todo el mundo. El amplio compromiso internacional de PANGEA también ofrece oportunidades para trabajar y reclutar a las mejores mentes a nivel mundial para los esfuerzos de la NASA en Ciencias de la Tierra, mientras que los esfuerzos de capacitación y formación (véase *la Sección 7*) ayudan a preparar a la próxima generación de científicos.

Durante la fase de definición del alcance, PANGEA llevó a cabo una amplia labor de divulgación entre los usuarios potenciales (véase *el Apéndice B*) y se comprometió con ellos a determinar qué preguntas y datos son más valiosos para ellos. Como resultado, PANGEA ha trabajado desde su creación para salvar la difícil brecha entre las preguntas científicas que se plantean y lo que los usuarios finales necesitan para la toma de decisiones. La implicación de la comunidad es fundamental para la estrategia ES2A de PANGEA (véase *la Sección 8* para más detalles sobre cómo PANGEA implicará a la comunidad). Somos conscientes de que el compromiso de la comunidad conlleva el riesgo de crear expectativas que el proyecto no puede satisfacer, en gran parte porque los datos aéreos que se recogen tienen un alcance espacio-temporal limitado y serán más episódicos de lo necesario para satisfacer muchas aplicaciones de los usuarios y las necesidades de toma de decisiones. PANGEA hará todo lo posible por transmitir repetida y claramente las limitaciones de los datos del proyecto, que son necesariamente limitados espacial y temporalmente. PANGEA también se esforzará por aprovechar el impulso creado por un breve pero intenso periodo de proyecto para crear, hacer crecer y fortalecer una comunidad de usuarios nueva y más diversa para los datos de la NASA sobre la Tierra. La profundidad y el alcance del compromiso de PANGEA dependerán de la financiación y es una prioridad en las oportunidades de cofinanciación.

En concreto, PANGEA se asegurará de que todas las actividades de participación de la comunidad hagan hincapié en los vínculos entre los datos de campo y aerotransportados de PANGEA y los sensores de satélite del Observatorio de la Tierra de la NASA (tanto los actuales como los previstos). Dado que los usuarios se beneficiarán de los productos derivados de las observaciones espaciales, las prioridades de PANGEA ES2A se centran en el avance de las necesidades y capacidades específicas de vigilancia que utilizan los servicios en curso, es decir, las misiones por satélite (véase *el Apéndice D*). Los datos de las campañas aerotransportadas apoyarán la formación de los socios centrada en los datos operativos antes, durante y después de que los avances en el escalado de PANGEA puedan utilizarse para recuperar productos derivados de satélites. Los ejemplos incluyen la formación y preparación en SAR e hiperespectral en colaboración con SERVIR. De este modo, PANGEA creará comunidades de adopción temprana de NISAR y SBG en los trópicos.

PANGEA también ha dado prioridad a la búsqueda de una amplia gama de socios de financiación, reconociendo que la NASA es adecuada para apoyar la recopilación de datos, el análisis y el desarrollo de herramientas/plataformas, mientras que otros patrocinadores están mejor posicionados para apoyar proyectos de conservación que aplican datos y formas específicas de aplicación de la formación y el desarrollo de capacidades. La fase de definición del alcance también incluyó un ejercicio de visión, en el que diversos equipos colaboraron para trazar vías de traslación que incluían la adquisición de datos, posibles casos de uso, el desarrollo conjunto de productos y la identificación de socios.

9.2.2 Apoyo a la aplicación de la investigación PANGEA

PANGEA aprovechará su compromiso actual y previsto con los socios para integrar ES2A de forma holística en el proyecto. Esto incluye la realización de una evaluación de las necesidades de los usuarios como parte del Plan Experimental Conciso y la realización de una exploración del entorno para identificar las herramientas existentes que podrían integrar datos. Esto es especialmente importante porque la integración en herramientas existentes suele aumentar la probabilidad de adopción, uso y mantenimiento a largo plazo. **La figura 20** muestra el enfoque de PANGEA para el avance de los resultados a través de los niveles de preparación de aplicaciones (ARL) de la NASA, que dependerá de la combinación de una fuerte alineación temática con un compromiso reflexivo, temprano e inclusivo de los socios. Aunque el ejemplo se muestra como un proceso lineal utilizando el marco ARL de la NASA, PANGEA espera que nuestras actividades ES2A sean iterativas y, en ocasiones, no lineales, lo que es representativo de las complejidades que definen la política y la toma de decisiones en el mundo real.

La NASA, junto con otras agencias nacionales e internacionales, desempeña un papel cada vez más destacado en el desarrollo y la implantación de sistemas de apoyo a la toma de decisiones. Estos sistemas están diseñados para incorporar los resultados de las actividades de investigación dentro de un marco de modelización con el fin de proporcionar información a los gestores del territorio, gobiernos subnacionales y nacionales, entre otros, que requieran información en un contexto específico. El Portal de Información PANGEA (PIP) proporcionará una plataforma para llevar a cabo nuevas investigaciones sobre el uso de productos de información satelital para apoyar la toma de decisiones. Será una plataforma fundamental para que los investigadores de PANGEA interactúen a múltiples niveles con los científicos y gestores de los organismos encargados de evaluar los impactos del cambio climático en las regiones tropicales, así como con los medios de comunicación y el público en general. El Marco de Modelización Integrada de PANGEA proporcionará otro andamiaje para las actividades de ES2A mediante la creación de productos de información únicos basados en evaluaciones integradas.

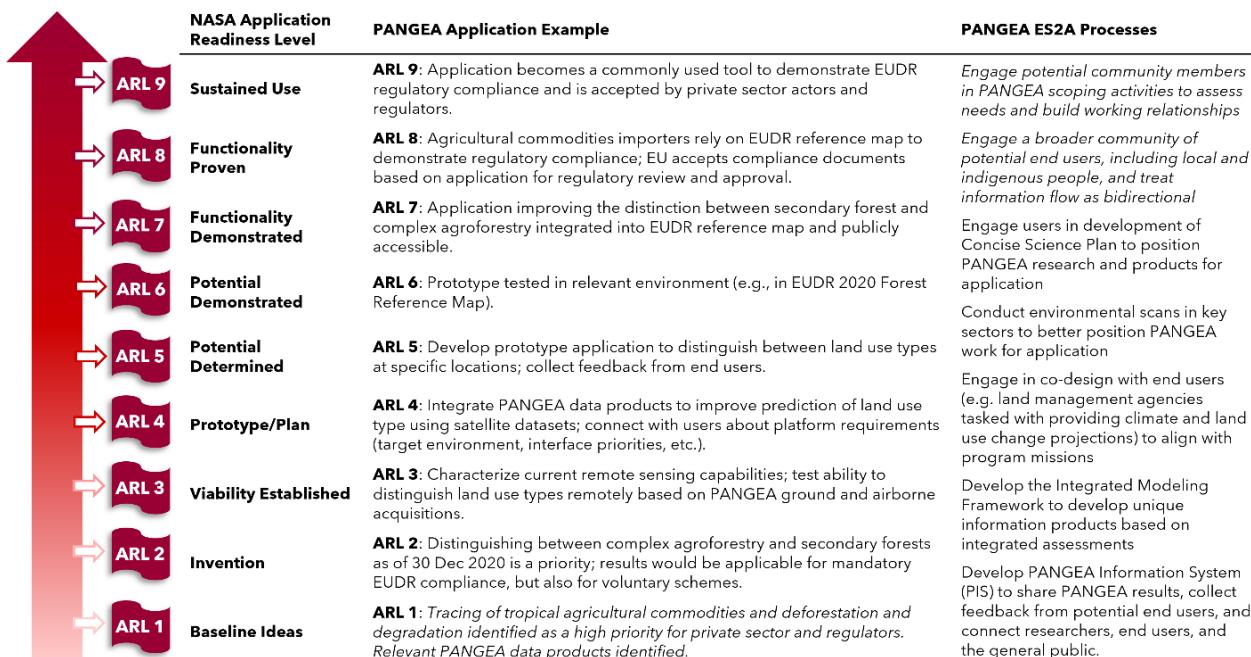


Figura 20. Ejemplo de estrategia de nivel de preparación para la aplicación de PANGEA centrada en el apoyo al Reglamento de la Unión Europea sobre deforestación (EUDR). En Estados Unidos se está estudiando una normativa similar.

La NASA y otras agencias estadounidenses e internacionales reconocen cada vez más la necesidad de codesarrollar sistemas de apoyo a la toma de decisiones para intercambiar información y análisis con gestores del territorio, gobiernos y otros responsables políticos y de la toma de decisiones. PANGEA codesarrollará productos con estos socios responsables del suministro de los datos necesarios para el seguimiento del cambio climático y de la cubierta terrestre. Los modelos basados en procesos en los que se centrará la investigación de PANGEA se ajustan bien a las misiones de estas oficinas. Los investigadores de estas oficinas participaron en el proceso de definición del alcance de PANGEA, y sus aportaciones han servido de base a las preguntas de investigación y han aportado ideas para la aplicación de los resultados de PANGEA a la investigación.

PANGEA también ofrece la oportunidad de participar en trabajos y aplicaciones transdisciplinarias, sobre todo dada la naturaleza interrelacionada del cambio climático, la conservación de la biodiversidad y la producción agrícola, que son algunas de las principales aplicaciones de los productos de PANGEA. **La Figura 21** muestra el solapamiento potencial de estos temas y destaca una pequeña selección de los socios que ya están trabajando en la intersección de las distintas materias.

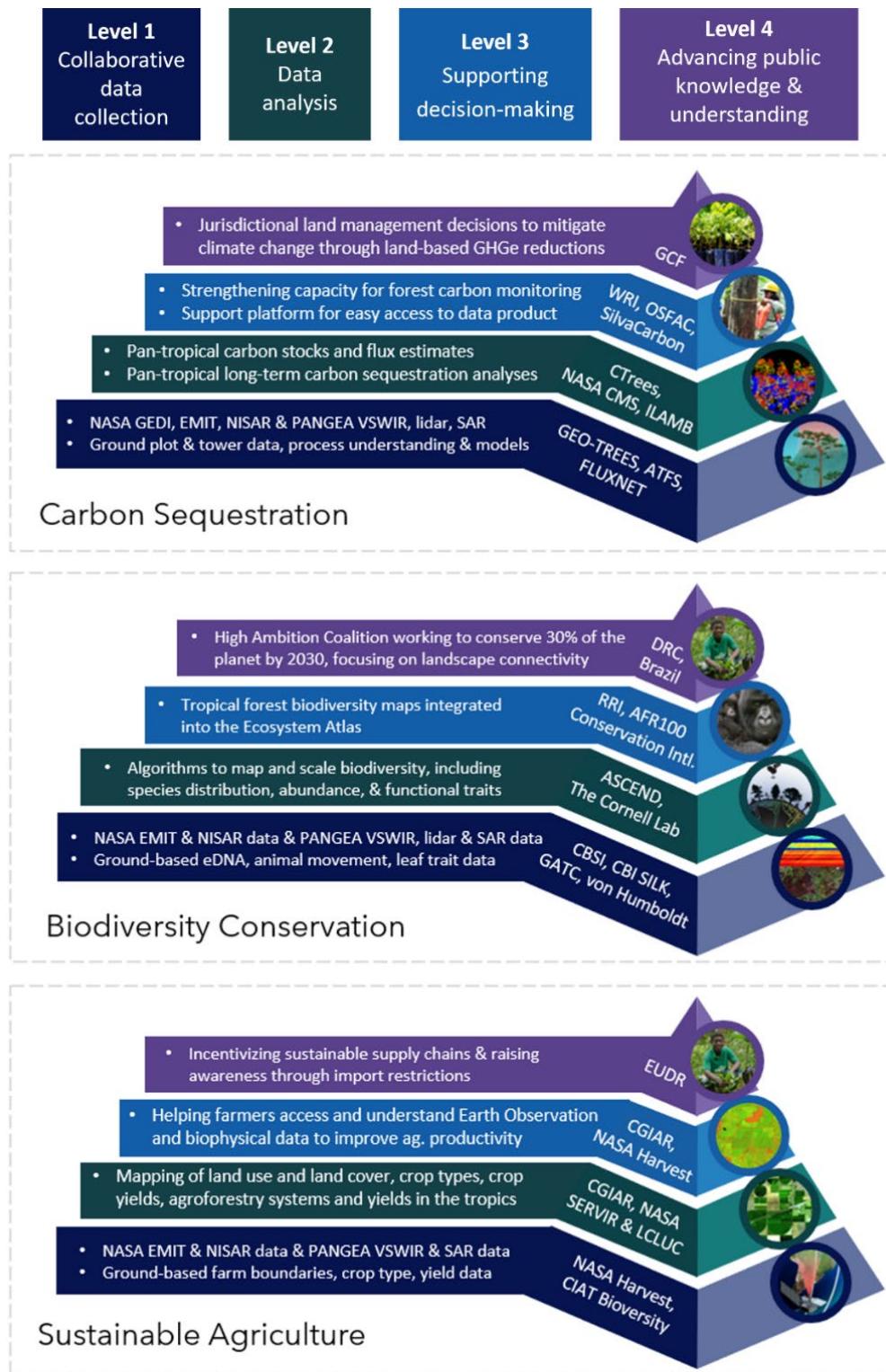


Figura 21. Ejemplo de aplicación de la estrategia PANGEA Earth Science to Action, centrada en el secuestro de carbono, la conservación de la biodiversidad y la agricultura sostenible, y ejemplos de socios que ya participan en actividades relacionadas.

10 Viabilidad técnica y logística

PANGEA aprovechará el historial de éxito de la NASA en campañas internacionales sobre el terreno y aerotransportadas, incluidas campañas recientes en América, África y Asia. Varias campañas Earth Venture Suborbital (EVS) y otras campañas aerotransportadas internacionales de la NASA también han demostrado la viabilidad del despliegue internacional de aeronaves de la NASA y de aeronaves contratadas por la NASA con instrumentos in situ y de teledetección en apoyo de campañas plurianuales a gran escala en los trópicos americanos. En 2023, el JPL de la NASA llevó a cabo una exitosa campaña con AVIRIS-NG recogiendo datos de teledetección con una aeronave contratada por la NASA sobre Chile, Colombia y Ecuador para la recuperación de fuentes puntuales de metano en coordinación con cada país. Esto se basó en campañas anteriores realizadas con éxito en la región, incluyendo, por ejemplo, vuelos UAVSAR en Colombia, Ecuador, Perú y la Guayana Francesa; vuelos AVIRIS en Colombia, Ecuador y Chile; y LVIS en la Guayana Francesa. La NASA también ha planificado vuelos AVIRIS en Panamá y Costa Rica para 2025. Además, la NASA ha realizado numerosas investigaciones en África, como SAFARI, AfriSAR-1, AfriSAR-2 y BioSCape. También hay inmensas inversiones en África en la actualidad que apoyarán importantes elementos de viabilidad de PANGEA, incluyendo la Iniciativa Científica de la Cuenca del Congo (CBSI), CongoFlux, One Forest Vision, el Panel Científico para el Congo, African Masters of Machine Intelligence (AMMI) a través del Instituto Africano de Ciencias Matemáticas (AIMS), la colaboración existente de la NASA con la Agencia Espacial Gabonesa (AGEOS) y el Observatorio por Satélite de los Bosques de África Central (OSFAC), y GEO-TREES. El equipo de PANGEA ha estado en contacto con la Oficina de Océanos y Asuntos Medioambientales y Científicos Internacionales del Departamento de Estado de Estados Unidos, que apoya con entusiasmo PANGEA y los beneficios que tendría para la diplomacia medioambiental y científica.

PANGEA requerirá despliegues internacionales que podrían tener lugar en varios países. Los retos previstos incluyen el despliegue y mantenimiento de la instrumentación in situ, la obtención de permisos de vuelo internacionales para la adquisición de datos aéreos, la obtención de visados y permisos de investigación para los investigadores estadounidenses e internacionales, el acceso a los sitios de campo, las interacciones/conflictos entre humanos y animales, los disturbios políticos o de otro tipo, y la salud y seguridad de los científicos y participantes (véase la Sección 10.5 para la *Evaluación de Riesgos*). Una de las primeras prioridades será establecer las relaciones necesarias para obtener autorizaciones de vuelo para los países seleccionados y los emplazamientos de campo que forman parte del ámbito de PANGEA (véase la Sección 6.2.4, *Observaciones de teledetección aerotransportada*). Para obtener las autorizaciones de vuelo, PANGEA trabajará con NASA OIIR para desarrollar los paquetes de autorizaciones diplomáticas necesarios para los despliegues aéreos internacionales. Antes de solicitar las autorizaciones de vuelo, PANGEA trabajará en estrecha colaboración con la NASA y el Departamento de Estado de EE.UU. para establecer relaciones con socios en el país, como agencias gubernamentales, ONG y líderes de territorios indígenas, con el fin de desarrollar acuerdos que garanticen las autorizaciones de vuelo y los permisos de campo adecuados.

En los casos en que las aeronaves de la NASA no puedan obtener permiso de sobrevuelo o adquirir datos utilizando su propia instrumentación, PANGEA desplegará activos comerciales o de otro tipo, como ALS comerciales, instrumentación comercial basada en UAV, o instrumentos y aeronaves locales para adquirir los conjuntos de datos aerotransportados necesarios. Esto es particularmente importante en Brasil, donde la NASA ha encontrado históricamente restricciones para las observaciones en tierra utilizando instrumentos y aeronaves no brasileños. PANGEA se basará en los precedentes empleados por la NASA y el gobierno de EE.UU. de utilizar proveedores de datos aerotransportados comerciales para recoger los conjuntos de datos necesarios (véase la Sección 6.2.4, *Observaciones de Teledetección Aerotransportada*).

10.1 Organización y gestión

La organización y coordinación de PANGEA será determinada por la Dirección del Programa de la NASA. Presentamos un concepto de organización y gestión que refleja un modelo de éxito utilizado en ABoVE y LBA-ECO (**Figura 22**). Esta estructura permitirá la organización y gestión de un proyecto a largo plazo con una inversión significativa de asociaciones y colaboraciones transdisciplinarias a escala nacional e internacional.

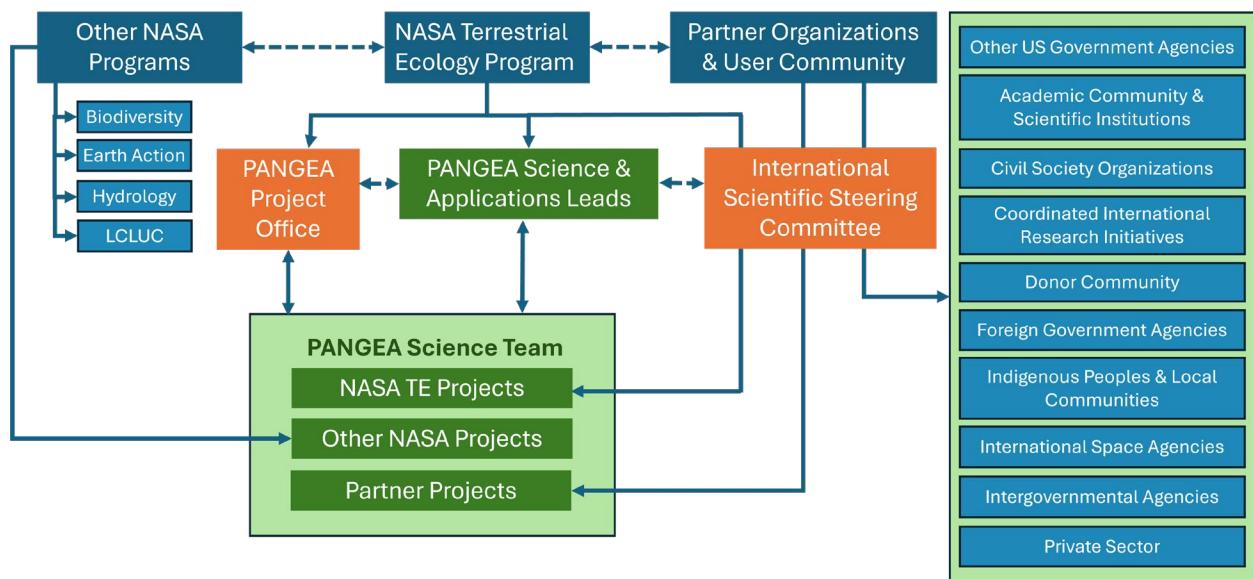


Figura 22. Propuesta de estructura organizativa de PANGEA.

10.1.1 Gestión de programas

La Dirección del Programa de Ecología Terrestre de la NASA organizará y supervisará PANGEA con el apoyo de la Oficina del Proyecto PANGEA. Trabajará dentro de la División de Ciencias de la Tierra de la NASA para seleccionar y financiar proyectos de investigación llevados a cabo por el Equipo Científico de PANGEA para su participación en PANGEA y para asignar recursos a la Oficina del Proyecto PANGEA, incluyendo al Científico del Proyecto PANGEA y al Científico Adjunto del Proyecto (conjuntamente el Líderazgo Científico [SLJ]), que también son seleccionados por la Dirección del Programa. La Dirección del Programa será responsable de representar las actividades de PANGEA dentro de la NASA, incluyendo otros Programas de la NASA que puedan apoyar las actividades de PANGEA. La dirección del programa coordinará las actividades de PANGEA con otros socios de investigación de agencias nacionales y extranjeras.

10.1.2 Oficina de proyectos

La ejecución de PANGEA contará con el apoyo de una Oficina del Proyecto dirigida por el Director del Proyecto nombrado por la Dirección del Programa y apoyada por un miembro del personal del proyecto. El Científico del Proyecto PANGEA y el Científico Adjunto del Proyecto serán miembros *ex-officio* de la Oficina del Proyecto. La Oficina del Proyecto (a) supervisará y gestionará las actividades de investigación de campo y aerotransportadas de PANGEA y los proyectos patrocinados por el Programa de Ecología Terrestre de la NASA y otras oficinas de programas de la NASA; (b) coordinará y proporcionará apoyo logístico para la

investigación de campo patrocinada por la NASA y las campañas de teledetección aerotransportada, incluida la supervisión de la seguridad y la gestión de riesgos; (c) proporcionará apoyo logístico a los grupos de trabajo y coordinación de PANGEA, incluido el apoyo a reuniones y talleres; y (d) desarrollará y mantendrá el Sistema de Información PANGEA. La Oficina del Proyecto tendrá importantes interacciones con las partes interesadas locales y regionales y compartirá la responsabilidad de dichas interacciones con la Dirección Científica. La Oficina del Proyecto ayudará a los miembros del Equipo Científico con las solicitudes de permisos a las autoridades competentes. En función de las necesidades del Equipo Científico, la Oficina del Proyecto también podrá encargarse de la recogida de datos variables básicos y de la instalación de infraestructuras en los emplazamientos de campo. La Oficina del Proyecto será responsable de la gestión de las campañas científicas aerotransportadas. Los miembros del Equipo Científico trabajarán en estrecha colaboración con la Oficina del Proyecto y contarán con la orientación de su personal para las actividades de campo, las comunicaciones con las partes interesadas y las autoridades locales y nacionales, y el uso de la ciberinfraestructura PANGEA.

PANGEA dará prioridad a una estrecha coordinación entre el Equipo Científico de PANGEA y las actividades de Earth Science to Action. El Director del Proyecto designará un punto de contacto (POC) en la Oficina del Proyecto para las aplicaciones científicas de PANGEA. Este POC controlará las expectativas que los socios de las aplicaciones tienen del Equipo Científico de PANGEA. La comunicación regular y transparente con los potenciales socios de aplicación continuará en todas las etapas de PANGEA, y las actualizaciones sobre las decisiones de perseguir o no las aplicaciones potenciales se comunicarán con prontitud. La reputación internacional de la NASA depende de una cuidadosa adecuación entre las necesidades de los usuarios y las inversiones y capacidades de la NASA, así como de la gestión de las expectativas de todos los socios.

10.1.3 Definición de ciencia

Antes del inicio de las investigaciones científicas PANGEA, un grupo de científicos y líderes científicos seleccionados por la Oficina del Programa trabajarán con la Oficina del Proyecto para diseñar el *Plan de Experimentos Conciso*. Este plan presentará un refinamiento de las ideas presentadas en este documento de alcance. El objetivo del plan perfeccionado es ajustar el alcance científico a los recursos disponibles. En el plan conciso se definirán las recomendaciones específicas relativas a los lugares de investigación, las necesidades de infraestructura científica de campo (incluida la instrumentación) y los requisitos para la teledetección aerotransportada. El plan conciso de experimentos servirá a la dirección del programa para solicitar investigaciones científicas y servirá al equipo científico seleccionado como guía para sus investigaciones integradas con el fin de responder a las preguntas científicas del PANGEA.

10.1.4 Ejecución del proyecto

El proyecto PANGEA será implementado por el Equipo Científico PANGEA seleccionado, apoyado por la Oficina del Proyecto, durante un periodo nominal de seis a nueve años, tal y como se solicita en el anuncio A.4 de 2022 de la NASA. Se elaborará un *Plan de Implementación* del Proyecto basado en el Plan Conciso del Experimento. La Oficina del Proyecto será responsable del Plan de Ejecución, incluidas las actualizaciones periódicas, cuya frecuencia se determinará en consulta con el Equipo Científico y la Dirección del Programa. El plan de ejecución detallará las actividades de investigación que se llevarán a cabo y especificará las funciones y responsabilidades de los investigadores implicados en dichas actividades durante la ejecución de PANGEA. En la Sección 10.4 (**Tabla 14**) se presenta un calendario teórico para la ejecución del proyecto. Al inicio del proyecto, se dedicará aproximadamente un año a preparar las actividades de recogida de datos sobre el terreno y aéreos. El periodo principal de recogida de datos se extenderá de tres a seis años, dependiendo de la duración y el alcance globales del proyecto.

El análisis de los datos recogidos será continuo a lo largo de todo el proyecto. Esperamos que la recogida de datos finalice gradualmente entre uno y tres años antes de la conclusión del proyecto para dar tiempo al análisis, la integración y la síntesis de los datos. PANGEA dejará un legado de datos y ciencia abierta que servirá de apoyo a futuras investigaciones científicas que responderán a las preguntas científicas de PANGEA y a nuevos temas científicos.

10.1.5 Equipo científico y liderazgo científico

El *Equipo Científico*, dirigido por un Científico del Proyecto y un Científico Adjunto del Proyecto, estará compuesto por Investigadores Principales (IPs) y Co-Investigadores (Co-Is) de las investigaciones seleccionadas, así como por científicos contratados por dichos IPs y Co-Is, incluyendo científicos postdoctorales y estudiantes. En estrecha coordinación con el Equipo Científico de PANGEA, la Oficina del Proyecto y la Dirección del Programa, el Científico del Proyecto y el Adjunto convocarán y organizarán los órdenes del día de las reuniones periódicas del Equipo Científico de PANGEA. El Equipo Científico se reunirá regularmente, nominalmente con una reunión presencial anual. En el caso de las reuniones virtuales, PANGEA procurará organizarlas teniendo en cuenta las zonas horarias de las personas representadas. Estas reuniones harán avanzar la planificación del Equipo Científico, el intercambio de los primeros resultados y facilitarán enormemente las interacciones entre los participantes en el proyecto. Las reuniones son una oportunidad especialmente importante para que los estudiantes y científicos postdoctorales se reúnan con los científicos senior de otros proyectos. Los lugares de reunión se seleccionarán para facilitar los viajes y minimizar las complicaciones relacionadas con la obtención de visados. El Científico del Proyecto y el Adjunto se reunirán con la Dirección del Programa y la dirección de la Oficina del Proyecto, como mínimo, trimestralmente, para revisar los progresos, resolver problemas y discutir los próximos pasos de la implementación.

La experiencia con proyectos anteriores nos informa de que la comunicación oportuna es importante para gestionar las expectativas del Equipo Científico de PANGEA y de los investigadores de los proyectos y organizaciones asociados. El Liderazgo Científico (SL) de PANGEA comunicará los objetivos de investigación y los resultados del Equipo Científico financiado por la NASA a diversas audiencias. El SL trabajará con los socios locales para establecer las expectativas de PANGEA. El SL comunicará con precisión y prontitud las actualizaciones del proyecto a los socios de investigación locales. Las presentaciones, los seminarios web y los ayuntamientos emplearán servicios de interpretación y los materiales del proyecto estarán disponibles en los idiomas de los países participantes. Una vez recopilados los datos de PANGEA y a medida que los productos de datos científicos estén disponibles, el SL será responsable de garantizar que los socios locales sigan recibiendo actualizaciones periódicas. El SL marcará la pauta de PANGEA y se encargará de dar ejemplo al resto del equipo científico sobre la colaboración inclusiva y respetuosa y el valor de la coproducción de la investigación. El LS y todos los miembros del Equipo Científico de PANGEA se adherirán a las Directrices de la Comunidad PANGEA.¹

Las investigaciones científicas de PANGEA serán gestionadas por la dirección científica y llevadas a cabo por el equipo científico. Como se ha señalado, el equipo científico estará compuesto por investigadores seleccionados por la NASA y por investigadores contratados por los IP y Co-I del equipo científico. Las investigaciones de PANGEA afectarán a varios países de los trópicos. Basándonos en la experiencia de la NASA en el LBA, recomendamos que *todas las* investigaciones cuenten con investigadores homólogos en países con bosques tropicales húmedos y que se esfuerzen por formar a científicos y técnicos en los

¹ Las Directrices de la Comunidad PANGEA son un documento vivo que se encuentra en <https://tropicalforestscoping.com/community-guidelines/>. Las directrices derivadas de las guías institucionales existentes pueden ser examinadas por la NASA y modificadas en función de las necesidades de la gestión del programa.

primeros años de su carrera procedentes de países en los que la investigación PANGEA esté activa y de otros países de los trópicos húmedos. Esto debería aplicarse incluso a las investigaciones que no tienen un componente de campo. Durante el LBA, la NASA aprendió que este enfoque tenía muchos beneficios. En la práctica, ofrecía un incentivo para que los países anfitriones apoyaran el trabajo de la NASA en el país, debido a la capacidad que estaban creando los investigadores. Los investigadores descubrieron que, a menudo, los países anfitriones proporcionaban un apalancamiento significativo para sus proyectos de investigación mediante contribuciones en especie y financiadas, especialmente becas para estudiantes. Décadas después de que concluyera la presencia de la NASA en Sudamérica para LBA, la NASA sigue contando con una amplia red de colaboradores amistosos en la comunidad científica sudamericana. El impacto de esos investigadores en la ciencia de sus países de origen ha sido enorme. Para más información, véase la Sección 7, *Desarrollo de capacidades, formación y educación*.

PANGEA hará hincapié y dará prioridad a la diversidad, la equidad y la inclusión en todos los aspectos del proyecto, incluida una representación diversa en su dirección.

El equipo científico de PANGEA dará prioridad a una representación diversa en términos de conocimientos científicos, especialidades técnicas, origen nacional, raza, sexo, lengua materna, etapas profesionales, etc. Los investigadores noveles han participado activamente en el desarrollo de esta propuesta de alcance y participarán en todas las fases del proyecto, al igual que los representantes de los países participantes en los que se llevará a cabo la investigación de campo. Los miembros del equipo deben comprometerse a mantener interacciones respetuosas con los colaboradores locales y la diversidad cultural, así como a tener especial cuidado en mantener la reputación de la NASA a nivel internacional.

El liderazgo y el compromiso durante el proceso de definición del alcance de PANGEA demostraron un apoyo excepcional al proyecto y la diversidad de participantes con capacidad e interés para contribuir a PANGEA.

Durante el proceso de definición del alcance, entre los codirectores de los grupos de trabajo temáticos de PANGEA había 22 personas del Norte y del Sur del mundo. Los siguientes datos demográficos ilustran varios ejes de diversidad representados por el equipo directivo de PANGEA y los colíderes de los grupos de trabajo:

- 42% mujeres (n = 14 de 33)
- 60% no blancos (n = 20 de 33)
- 30% del Sur global (n = 10 de 33)
- 27% al principio de la carrera (n = 9 de 33)

Es importante señalar que el equipo de evaluación de PANGEA trabajó para lograr una mayor representación del Sur global en nuestra dirección. Debido a los limitados recursos que se pueden asignar para apoyar directamente a los participantes del Sur global, nos vimos restringidos. Muchas personas altamente cualificadas del Sur global se vieron desbordadas y no pudieron ayudar a dirigir la labor de delimitación del alcance sin compensación. Sin embargo, más del 50% de las personas que participaron en los talleres, reuniones, ayuntamientos y simposios procedían de países del Sur. Las lecciones aprendidas durante el proceso sirvieron de base para buscar cofinanciación para el proyecto PANGEA. La labor de delimitación del alcance también ejemplificó la capacidad de PANGEA para aplicar la diplomacia científica a escala internacional.

10.1.6 Competencias disciplinarias requeridas

PANGEA se concibe como un proyecto transdisciplinario. Los científicos que participan en la investigación de PANGEA pueden identificarse con una disciplina o con varias. Esperamos la participación de científicos relacionados con las ciencias físicas, biológicas y sociales. Las habilidades y conocimientos asociados a un conjunto de disciplinas estarán representados en el Equipo Científico de PANGEA. Como parte del Programa de Ecología Terrestre esperamos que la ecología a varios niveles de organización (ecosistema, comunidad, población) esté fuertemente representada. La biogeoquímica y la química atmosférica han estado asociadas durante mucho tiempo a las campañas de TE de la NASA, al igual que la fisiología vegetal y la ecofisiología. El equipo científico incluirá las competencias y conocimientos de otras disciplinas relacionadas, como los sistemas terrestres, la meteorología, la hidrología y las ciencias sociales. Los especialistas en teledetección estarán bien representados en el equipo científico.

10.2 Oportunidades de cofinanciación

Los niveles de medición Baseline, Threshold y Descope definidos en la sección 6.2.1 representan proyectos autónomos de la NASA sin dependencias. Sin embargo, dada la urgencia y la importancia del tema, existe un gran potencial para aumentar o incluso superar las contribuciones de la NASA. Durante el esfuerzo de delimitación del alcance, el equipo de dirección de PANGEA ha dado pasos significativos hacia la obtención de diversas fuentes de financiación para aprovechar una inversión de la NASA. Múltiples agencias gubernamentales estadounidenses, fundaciones privadas, gobiernos internacionales y organizaciones filantrópicas han expresado su interés en apoyar las actividades relacionadas con PANGEA, tanto dentro como fuera del ámbito de la NASA, incluido el apoyo directo a los socios internacionales y la aplicación de Earth Science to Action. Entre las oportunidades para obtener apoyo adicional de socios interesados en asociarse con la NASA se incluyen los ejemplos de socios que figuran en la **Tabla 12**. Para más detalles, véase el *Apéndice A, Cartas de apoyo*.

Al igual que en otros proyectos de campo de TE como BOREAS, LBA y ABoVE, el equipo de PANGEA trabajará con patrocinadores ajenos a la NASA para incorporar sus contribuciones al Plan Experimental Conciso de PANGEA. Este proceso incluirá (1) la definición de actividades y financiadores para garantizar que el apoyo sea complementario y no se duplique; (2) la racionalización de la gestión, la comunicación y la supervisión entre los patrocinadores; y (3) el tratamiento de los problemas de seguridad de los datos. PANGEA se basará en la experiencia anterior de TE que combinó con éxito recursos de la NASA y de fuera de la NASA para abordar lagunas críticas en el conocimiento de las ciencias de la Tierra y servirá como prototipo para que la NASA avance en este tipo de asociaciones en el futuro.

Tabla 12. Posibles oportunidades de cofinanciación y apoyo en especie de PANGEA.

USFS-IP: Programas internacionales del Servicio Forestal de EE.UU. ONACC: Observatorio Nacional del Cambio Climático (Camerún).

| ÁREA DEL PROYECTO | PROGRAMAS DE LA NASA | OTROS GOBIERNOS DE EE.UU. | GOBIERNO INTERNACIONAL | OTROS |
|----------------------|----------------------------|-----------------------------|---|--|
| TELEDETECCIÓN | TE, Programas relacionados | NOAA, NSF, USDA, USFS, USGS | AGEOS, ESA, INPE | Laboratorio de la Tierra y el Carbono, MapBiomas |
| ALOJAMIENTO DE DATOS | TE | DAACs, AmeriFlux (DOE) | ESA, ICOS | Global Forest Watch, Google, MoveBank, Planeta |
| INVESTIGACIÓN | TE, Programas relacionados | DOE, NOAA, NSF | UK NERC, UE, Fundación de Investigación de São Paulo (FAPESP), CNPq, Foro Belmont | Schmidt Sciences, Fundación Moore |

| ÁREA DEL PROYECTO | PROGRAMAS DE LA NASA | OTROS GOBIERNOS DE EE.UU. | GOBIERNO INTERNACIONAL | OTROS |
|-----------------------|--|---------------------------|--|--|
| FORMACIÓN Y EDUCACIÓN | ARSET, DEVELOP, SERVIR, GLOBE, Iniciativa de los Pueblos Indígenas | USAID, USFS-IP | FCDO (Reino Unido), Iniciativa One Forest Vision | AmiT, CBSI, R2FAC, Filantropías, Donantes |
| APLICACIONES | Acción por la Tierra, SERVIR, Cosecha | USAID, USFS-IP, USGS | UE, GCF-TF, ONACC, OSFAC | Bezos Earth Fund, NICFI, Fundación Moore, Sector privado |

10.3 Ciencia abierta - Gestión y puesta en común de datos

PANGEA facilitará la ciencia de código abierto, promoverá la colaboración y maximizará el valor de los datos de PANGEA ampliamente y a largo plazo, en alineación con la Estrategia para la Ciencia Abierta de la NASA (Strategy for Data Management and Computing for Groundbreaking Science 2019-2024). Esta estrategia se adherirá a los principios y prácticas de la comunidad y tendrá en cuenta las directrices éticas y la sensibilidad cultural. PANGEA también se coordinará estrechamente con los socios indígenas para garantizar la soberanía de los datos, incluyendo específicamente la Soberanía de Datos Indígenas (IDS). PANGEA se basará en el éxito de anteriores proyectos de campo y aprovechará los nuevos avances en ciencia abierta y en conceptos y tecnologías de gestión de datos.

PANGEA integrará flujos de datos procedentes de múltiples sistemas de adquisición de datos, socios, países y paradigmas (por ejemplo, paradigma científico occidental, conocimiento ecológico indígena, conocimiento ecológico tradicional) (véase **la Tabla 13**). La gestión de datos de PANGEA se adherirá a los principios rectores de Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable (FAIR) para mejorar el descubrimiento y la accesibilidad de los datos, promover la interoperabilidad y la integración de los datos, y mejorar la reutilización y reproducibilidad de los datos (Wilkinson et al., 2016). La recopilación, gestión y uso de datos de PANGEA también se alinearán con los principios CARE, que hacen hincapié en la importancia de tener en cuenta los derechos e intereses de los pueblos indígenas y las comunidades locales en la gestión de datos relacionados con sus comunidades, tierras y recursos. Los principios CARE para la gobernanza de datos indígenas complementan los principios FAIR centrándose en las dimensiones éticas, culturales y sociales de la gestión de datos, y reflejando el papel crucial de los datos en el avance de la innovación y la autodeterminación indígenas (Carroll et al., 2020).

La recopilación, gestión y uso de datos de PANGEA también reconoce la importancia de la soberanía de los datos, que requiere asociaciones activas con los pueblos indígenas y las comunidades locales. La soberanía de los datos es la gestión de la información de forma coherente con las leyes, prácticas y costumbres del Estado-nación en el que se encuentra. La soberanía de los datos indígenas es el "derecho de los pueblos y naciones indígenas a gobernar la recopilación, propiedad y aplicación de sus propios datos, derivado del derecho inherente de las naciones indígenas a gobernar sus pueblos, tierras y recursos", y se sitúa como un derecho colectivo dentro de los marcos internacionales de derechos indígenas (Cannon et al., 2024). Los poseedores de conocimientos indígenas conservan información y datos culturalmente sensibles. Para garantizar que los esfuerzos de recopilación y gestión de datos de PANGEA sean éticos y respeten los derechos de los Pueblos Indígenas y las Comunidades Locales, PANGEA trabajará con socios y Pueblos Indígenas y Comunidades Locales siguiendo los principios CARE descritos en **la Tabla 8**.

La participación en el Equipo Científico de PANGEA requerirá el compromiso de proporcionar acceso libre, abierto y transparente a todos los datos que se adquieran como parte de PANGEA de acuerdo con los principios FAIR y CARE. En colaboración con la Gestión de Programas de la NASA, el Equipo Científico de

PANGEA, dirigido por un Grupo Coordinador de Ciencia Abierta de PANGEA, trabajará con agencias gubernamentales, socios gubernamentales extranjeros y socios indígenas para establecer acuerdos y flujos de trabajo de recopilación, intercambio y manejo de datos e información a nivel nacional, de agencia internacional y territorial para delinear la propiedad de los datos, los derechos de uso y los planes de almacenamiento que cumplan con los principios de Ciencia Abierta, FAIR y CARE. PANGEA dará prioridad a las primeras publicaciones de investigadores de los trópicos que se encuentren en la fase inicial y media de su carrera y a la promoción de la investigación dirigida por indígenas.

Tabla 13. Ejemplos de actividades coordinadas de gestión e intercambio de datos con socios.

| SOCIO(S) | ACTIVIDAD DE GESTIÓN Y PUESTA EN COMÚN DE DATOS |
|--|---|
| LBA | LBA y PANGEA trabajarán juntos para armonizar los protocolos para múltiples tipos de datos, incluyendo el inventario forestal, los flujos basados en torres y las adquisiciones de vehículos aéreos no tripulados. La política de datos revisada de LBA recientemente adoptada (junio de 2024) se basa en los principios y directrices de la Ciencia Abierta, el uso justo y el trato justo, de conformidad con los principios de datos FAIR. Los datos del LBA adoptarán la licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-4.0; https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Ampliar el acceso de la comunidad científica a los datos del programa y su colaboración con ellos. Estas nuevas políticas de datos LBA deberían hacer que los datos LBA y PANGEA de la NASA y las políticas de ciencia abierta sean altamente compatibles. |
| ALIANZA PARA LA CIENCIA DE LOS BOSQUES TROPICALES (ATFS) | Coordinarse con los socios de la red de parcelas forestales tropicales del ATFS para garantizar que la recopilación y gestión de datos terrestres y de drones siguen las normas y protocolos existentes. |
| SOCIOS DE LAS COMUNIDADES INDÍGENAS Y LOCALES (POR EJEMPLO, GATC, RRI) | Comprometerse con los socios del IPLC durante el desarrollo del Plan conciso del experimento, mucho antes de que se recojan los datos. Determinar quién es el responsable de conceder el permiso a las partes externas para acceder a los datos y/o territorios indígenas para la investigación. Crear pasos o políticas para los investigadores y/o los pueblos indígenas y las comunidades locales para compartir los datos y/o solicitar permiso para acceder a los datos o a los territorios de los pueblos indígenas y las comunidades locales. Establecer un plan para la recopilación de datos y/o el seguimiento. Crear capacidad y trabajar con socios, incluidos los pueblos indígenas y las comunidades locales, para garantizar la financiación del almacenamiento y la gestión de los datos indígenas por parte de los pueblos indígenas y las comunidades locales. Proporcionar formación para crear herramientas para los pueblos indígenas y las comunidades locales que apoyen la recopilación, gestión y difusión de datos. |
| EQUIPOS CIENTÍFICOS DE NEON, SBG Y NISAR | Armonizar protocolos entre comunidades de investigación para apoyar la ampliación. Entre los ejemplos de iniciativas existentes en las que PANGEA participará se incluyen el equipo del algoritmo de vegetación terrestre VSWIR del SBG y la red NISAR cal/val. PANGEA contribuirá al desarrollo de protocolos de recopilación de datos, estrategias de extracción y procesamiento de datos aéreos y estructuras de bases de datos que permitirán que la recopilación conjunta de datos aéreos y de campo generada por la comunidad se integre más fácilmente en los conjuntos de datos de entrenamiento de modelos necesarios para mejorar los algoritmos para los ecosistemas infrarrepresentados. |

PANGEA seguirá las directrices de la NASA Earth Science Data Preservation Content Specification² para preparar y preservar los datos, así como la información asociada, más allá de la vida de un proyecto. Esto permitirá a los futuros usuarios comprender cómo se utilizaron los datos para obtener información, conocimientos y recomendaciones políticas, así como garantizar la reproducibilidad para determinar la validez y las posibles limitaciones de las conclusiones alcanzadas en el pasado, y proporcionar confianza en las tendencias a largo plazo que dependían de los datos de múltiples proyectos. El documento Preservation Content Implementation Guidance³ proporciona directrices y listas de comprobación para abordar las

² <https://www.earthdata.nasa.gov/esdis/esco/standards-and-practices/preservation-content-spec>

³ <https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2022-07/ESDS-RFC-042VERSION1.pdf>

necesidades del PCS en distintos tipos de proyectos de investigación en ciencias de la Tierra, incluidas las investigaciones aerotransportadas y de campo.

En colaboración con los socios, la Oficina del Proyecto PANGEA desarrollará un **Portal de Información PANGEA (PIP)** de acceso público. Este Portal de Información esbozará la estrategia de gestión e intercambio de datos de PANGEA, proporcionará enlaces directos a datos, modelos e información sobre las actividades planificadas y en curso de los investigadores y colaboradores de PANGEA, incluyendo inventarios de la ubicación, el calendario y los tipos de datos recogidos. El equipo científico de PANGEA y la oficina del proyecto colaborarán estrechamente con los propietarios de los datos a la hora de cotejarlos y vincularlos a las fuentes de datos existentes para garantizar que el intercambio de datos sea colaborativo y ético, y respete los derechos y la propiedad de los datos ya recopilados de acuerdo con los principios FAIR y CARE. El PIP facilitará el descubrimiento y el acceso a los datos recogidos por PANGEA y también a los datos existentes útiles para la investigación de PANGEA.

La visualización y el apoyo de los SIG serán fundamentales para maximizar el valor de los datos de PANGEA para un público más amplio. PANGEA trabajará con socios orientados a la acción como Global Forest Watch y la Iniciativa de Derechos y Recursos para desarrollar aplicaciones que garanticen que los datos sean accesibles a los no científicos. Los mecanismos adicionales de comunicación de datos y resultados serán una parte importante de PANGEA para garantizar la accesibilidad a los socios de las comunidades indígenas y locales. Los modos específicos de comunicación se determinarán en colaboración con los socios de las comunidades indígenas y locales y serán específicos para cada paisaje.

La procedencia y reproducibilidad de los datos son aspectos importantes de la ciencia de código abierto. Los protocolos de muestreo, metadatos, limpieza de datos, códigos, algoritmos y flujos de trabajo asociados a la creación, procesamiento y validación de datos para PANGEA se pondrán a disposición del público. PANGEA establecerá formatos y prácticas coherentes para los datos y metadatos y la optimización para el acceso y análisis basados en la nube, especialmente para los tipos de datos emergentes, como los conjuntos de datos basados en drones. Estas actividades colaborarán con los esfuerzos existentes en materia de datos y disciplinas específicas, en lugar de intentar reproducirlos. Las redes y programas existentes como FLUXNET, NEON, ICOS, OzFlux, TERN y SAEON han invertido en la definición de estándares en el procesamiento y distribución de datos y están avanzando hacia la implementación de FAIR. Las redes regionales también desarrollan actividades en zonas tropicales; por ejemplo, ICOS coordina el proyecto KADI (Knowledge and climate services from an African observation and Data research Infrastructure, <https://kadi-project.eu/>) que tiene como objetivo diseñar y avanzar hacia un sistema panafricano de observación del clima.

Ya han comenzado las conversaciones para garantizar la alineación con estos esfuerzos. La coordinación se profundizará tras la selección para garantizar que los datos terrestres, los datos de torres de flujo, los datos de drones, los datos de cámaras trampa, los datos bioacústicos, los conocimientos ecológicos indígenas y tradicionales, etc., se recopilan, almacenan y comparten adecuadamente y de acuerdo con las mejores prácticas disponibles. PANGEA aprovechará e integrará en la medida de lo posible las capacidades y sistemas existentes y emergentes ofrecidos por los Sistemas de Datos de Ciencias de la Tierra de la NASA. Estos incluyen los Centros de Archivo Activo Distribuido (DAAC) para datos aerotransportados, las herramientas y servicios DAAC para facilitar el uso de datos aerotransportados y orbitales para la investigación de la ecología terrestre, la plataforma de Visualización, Exploración y Análisis de Datos (VEDA) de la NASA (<https://www.earthdata.nasa.gov/esds/veda>), y los esfuerzos en curso para coordinar la estandarización de datos y protocolos.

PANGEA también adoptará un enfoque de código abierto para los modelos. Se espera que los modelos que participen en actividades y proyectos relacionados con PANGEA tengan el código fuente disponible de forma abierta a través de plataformas colaborativas (por ejemplo, GitHub), y que se publiquen con licencias

permisivas coherentes con la Guía Científica de Código Abierto de la Dirección de Misiones Científicas (SMD). PANGEA promoverá la gobernanza del modelo para el compromiso de la comunidad, incluyendo un código de conducta, notas técnicas y guías de usuario, un foro activo para debatir cuestiones relacionadas con el código, y vías para las contribuciones con el desarrollo del modelo por parte de la amplia comunidad científica. Para cumplir con los principios de ciencia abierta de PANGEA, los proyectos que formen parte de PANGEA depositarán la versión exacta de los modelos publicados en repositorios a largo plazo con un DOI junto con la información de parámetros y datos necesaria para reproducir los resultados.

PANGEA desarrollará una **plataforma** abierta de **análisis de datos basada en la nube** para que los investigadores de PANGEA apoyen la investigación abierta y colaborativa. La plataforma de análisis de datos de PANGEA se basará en las exitosas nubes científicas implementadas por ABoVE, SHIFT, BioSCape y la Plataforma de Análisis y Algoritmos Multimisión de la NASA (MAAP, <https://www.earthdata.nasa.gov/esds/maap>). Estos esfuerzos demuestran el éxito de la colaboración internacional de datos, incluso entre la NASA y la ESA (MAAP), y aprovechando el Programa de Responsabilidad Social de Amazon Web Services (BioSCape). La plataforma informática en la nube de PANGEA reducirá las barreras de entrada, especialmente para los socios internacionales que probablemente estén limitados en cuanto a ancho de banda, capacidad de almacenamiento de datos y potencia informática. La plataforma de computación en nube también permitirá a los miembros del equipo científico de PANGEA compartir fácilmente las primeras versiones de los productos de datos (antes de que estén listos para su archivo) y solucionar problemas de análisis de datos de forma conjunta. Además, los materiales de capacitación, especialmente los cuadernos de codificación, pueden desarrollarse específicamente para el entorno de computación en nube, lo que permite a cualquier persona en cualquier parte del mundo ejecutarlos y aplicar enfoques similares. La importancia de un entorno de computación en nube quedó demostrada durante BioSCape, cuyos miembros del equipo científico sudafricano habrían visto de otro modo gravemente limitada su capacidad para acceder a los datos de la campaña, analizarlos y aplicarlos.

PANGEA proporcionará ciencia de código abierto y capacitación en gestión de datos a lo largo de todo el proyecto, incluso a través de formaciones y talleres sobre gestión de datos en colaboración con los DAAC, FLUXNET, LBA, organizaciones indígenas y comunitarias locales asociadas como la Alianza Global de Comunidades Territoriales, ATFS, etc. Muchos de estos socios cuentan con programas de formación que se aprovecharán. PANGEA dará prioridad a la formación y los talleres con los socios para apoyar los esfuerzos independientes y coordinados de gestión de datos, lo que (1) mejora la capacidad de los pueblos indígenas, las comunidades locales y las instituciones tropicales; y (2) garantiza la alineación internacional que servirá de base para que los conjuntos de datos y la colaboración continúen más allá del proyecto PANGEA. Se está buscando cofinanciación para apoyar la inversión en infraestructura necesaria para garantizar que la ciencia de código abierto pueda llevarse a cabo equitativamente en todos los paisajes de PANGEA, incluida la financiación para apoyar la electricidad local y la infraestructura de Internet.

10.4 Horario

El equipo de PANGEA ha utilizado reuniones virtuales e híbridas para lograr la participación temprana de un equipo científico diverso. Contamos con enfoques de ahorro de tiempo que pueden reducir en gran medida el plazo necesario para desarrollar el Plan Experimental Conciso y pasar a la fase de Implementación. **La Tabla 14** esboza el calendario propuesto, suponiendo que las próximas actividades de PANGEA comiencen en el año fiscal 2025.

Tabla 14. Calendario PANGEA propuesto.

SDT: Equipo de Definición Científica. TE: Ecología Terrestre. CEP: Plan experimental conciso. PAC: Campaña Aerotransportada PANGEA. SATSM: Reunión del Equipo Científico y de Aplicaciones y de las Partes Interesadas.

| AÑO DE ESTUDIO | CEP | | FASE I | | | FASE II | | | FASE III | |
|---|---------------|------|--------|---|---|---------|---|---|----------|---|
| | AÑO FISCAL 25 | AF26 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| ACTIVIDADES DE LA OFICINA DE PROYECTOS | | | | | | | | | | |
| Selección de PANGEA. Comienza la planificación detallada: Selección del equipo de definición científica. Redacción del PEC, abierto a la revisión de la comunidad y finalizado. | | | | | | | | | | |
| La NASA publica el anuncio de oportunidad (NRA) de PANGEA. La Oficina del Proyecto inicia los preparativos basados en el CEP. Adjudicación de las propuestas de la Fase 1 de PANGEA. 1er SATSM. | | | | | | | | | | |
| 2º SATSM y Taller de Planificación de Campañas Aerotransportadas. Campaña Aerotransportada PANGEA I (PACI) | | | | | | | | | | |
| 3º PANGEA SATSM y Planificación Aerotransportada. II Campaña Aerotransportada PANGEA (PACII). NASA NRA PANGEA Fase 2 propuestas y selección. | | | | | | | | | | |
| 4º PANGEA SATSM y Planificación Aerotransportada. III Campaña Aerotransportada PANGEA (PACIII). | | | | | | | | | | |
| 5º PANGEA SATSM. IV Campaña Aerotransportada PANGEA (PANIV). | | | | | | | | | | |
| 6º PANGEA SATSM. Campaña Aérea de Respaldo PANGEA V (PANV). NASA NRA PANGEA Fase 3 Propuestas y selección. | | | | | | | | | | |
| 7º PANGEA SATSM. | | | | | | | | | | |
| 8º PANGEA SATSM. | | | | | | | | | | |

10.5 Evaluación de riesgos

PANGEA utilizará una gestión de riesgos proactiva para mitigar todos los riesgos de todas las actividades del proyecto, incluyendo aspectos como los viajes, el trabajo de campo, el uso de equipos y las operaciones aéreas y de campo en toda la amplia gama de estudios tropicales necesarios para ofrecer una ciencia de alto impacto. La Oficina del Proyecto recopilará una lista exhaustiva de los riesgos del proyecto, los evaluará con una Matriz de Evaluación de Riesgos estándar, proporcionará estas evaluaciones de riesgos a los participantes y supervisará su cumplimiento. El proyecto también se coordinará con los requisitos de salud y seguridad de cada institución asociada. Para los casos de alto y medio riesgo, el proyecto desarrollará e implementará un plan de mitigación, que será revisado con la Oficina del Programa de la NASA. PANGEA espera que la mayoría de los riesgos se clasifiquen en tres categorías: (1) salud y seguridad; (2) cumplimiento de los objetivos científicos; y (3) cumplimiento de los objetivos de participación de la comunidad y aplicaciones.

Salud y seguridad: El proyecto seguirá las directrices sobre salud y seguridad en los viajes publicadas por la Oficina de Asuntos Consulares del Departamento de Estado de EE.UU. y las personas seguirán las evaluaciones de riesgos específicas del proyecto elaboradas por la oficina de proyectos de PANGEA. PANGEA también se pondrá en contacto con las embajadas y consulados locales de EE.UU. y sus oficinas regionales de seguridad para obtener orientación. Dada la lejanía de muchos de los lugares de estudio, el proyecto elaborará planes para el transporte seguro a los lugares de estudio sobre el terreno, ya sea en vehículos todoterreno, embarcaciones u otros métodos. El proyecto también desarrollará planes para la seguridad de la tripulación aerotransportada y los operadores de instrumentos durante las campañas, siguiendo las directrices de la NASA para las operaciones aéreas y en tierra. Algunas posibles regiones de estudio presentan riesgos de malaria, fiebre amarilla y otras enfermedades; el proyecto se asegurará de que los participantes reciban asesoramiento sobre las vacunas pertinentes y otras medidas profilácticas antes de las visitas sobre el terreno.

Cumplimiento de los objetivos científicos: La Oficina del Proyecto trabajará de forma proactiva para involucrar a socios institucionales y desarrollar MOU formales, con la ayuda de la oficina OIIR de la NASA, ESPO y el Departamento de Estado de EE.UU.. Las campañas aéreas internacionales se han visto plagadas en repetidas ocasiones por la lentitud de las autorizaciones de aterrizaje y la burocracia asociada, y gran parte de esto puede evitarse iniciando pronto el proceso formal de MOU. Aunque el uso de aeronaves de la NASA para las observaciones aerotransportadas tiene sus ventajas, su utilización requiere autorizaciones diplomáticas tanto en los países de la zona de estudio como durante el tránsito. A veces, la autorización diplomática sólo puede obtenerse cerca de la fecha límite de necesidad, por lo que partes de las campañas o campañas enteras pueden cancelarse con poca antelación. Además, dado que los aviones de la NASA son operados por funcionarios estadounidenses, existe un riesgo demostrado de que un cierre del gobierno estadounidense retrase o cancele los vuelos científicos, especialmente en el periodo octubre-diciembre. La Oficina del Proyecto PANGEA tendrá en cuenta estos y otros riesgos y podría considerar el uso de aviones comerciales para mitigarlos.

El clima también es un factor importante para el éxito de las adquisiciones de datos sobre el terreno y aéreos para PANGEA, especialmente para las observaciones ópticas que requieren condiciones sin nubes. Durante la fase de definición científica, PANGEA realizará un análisis climático para determinar la mejor época del año para las observaciones aéreas. Durante las campañas aerotransportadas, PANGEA trabajará con meteorólogos locales que conozcan el clima local para facilitar el éxito de las recuperaciones aerotransportadas y las mediciones de campo.

El trabajo de campo presenta múltiples riesgos. A quienes no trabajan en bosques tropicales les vienen a la mente riesgos como las serpientes venenosas y las arañas venenosas. Aunque estos riesgos biológicos son reales, PANGEA puede gestionarlos estableciendo y aplicando directrices de seguridad y educando a los participantes. El mayor riesgo para los participantes en los proyectos suele producirse durante el transporte de ida y vuelta a los lugares de trabajo. Los viajes en camión y en barco fueron el mayor riesgo durante la LBA. PANGEA puede mitigar este riesgo garantizando la formación de los conductores y el mantenimiento adecuado de los vehículos. Otros riesgos sobre el terreno son las enfermedades y la pérdida de equipos por robo y violencia. La profilaxis médica puede mitigar las enfermedades endémicas, como la malaria, y la violencia puede evitarse mediante buenas relaciones comunitarias, conocimiento de la situación y comunicaciones. PANGEA mitigará todos estos riesgos impartiendo formación específica sobre el terreno en materia de seguridad y concienciación cultural, y estableciendo buenas relaciones con las comunidades locales.

Cumplir los objetivos de participación comunitaria y aplicaciones: Comprometerse con las comunidades locales y desarrollar resultados científicos y aplicaciones que sean útiles para una amplia variedad de personas requiere coordinación y un esfuerzo genuino. Un riesgo para PANGEA es que los esfuerzos de compromiso no tengan éxito y/o que las aplicaciones no sean útiles. PANGEA tomará varias medidas para mitigar estos riesgos. PANGEA co-producirá planes de compromiso para cada paisaje durante el desarrollo del Plan de Experimento Conciso que incluya hitos, objetivos y métricas para evaluar el éxito regularmente a lo largo del proyecto. PANGEA adoptará la inclusividad y trabajará activamente para desarrollar y promover prácticas inclusivas y de codesarrollo en todo el proyecto. El desarrollo conjunto de proyectos y el trabajo equitativo con todos los socios, incluidos los pueblos indígenas y las comunidades locales, puede llevar mucho tiempo. PANGEA seguirá esforzándose por construir relaciones duraderas. Sin embargo, dada la duración limitada del trabajo de campo de PANGEA en cada lugar, existe el riesgo de que el proyecto no alcance estos objetivos. PANGEA trabajará con los socios para desarrollar planes de apoyo continuado más allá de la duración del proyecto. PANGEA se esforzará por mantener las relaciones con los socios comunitarios a lo largo de todo el proyecto y trabajará con los socios internacionales e industriales para conseguir financiación adicional para apoyar estos esfuerzos con el fin de aumentar la profundidad y el significado de estas relaciones.

11 Créditos

Figura 1. Publicado en Liu et al. (2017).

Figura 2. El panel (a) es una adaptación de Schimel et al. (2015). El panel (b) fue creado por Alison Hoyt, Clarice Perryman y Fa Li.

Figura 3. Creado por Félicien Meunier. El panel (a) se adaptó de Friedlingstein et al. (2014) (actualización de CMIP5 a CMIP6). El panel (b) se ha redibujado a partir del AR6 del IPCC con datos recientes.

Figura 4. La figura principal es obra de Jamy Silver. El esquema de escala a la derecha de la figura fue creado por Lizbeth de la Torre.

Figura 5. Creado por Yanlei Feng, Robinson Negron-Juarez y Hannah Stouter.

Figura 6. Creado por Hannah Stouter.

Figura 7. Creado por Elsa Ordway.

Figura 8. Creado por Sofia Shen.

Figura 9. Creado por Yanlei Feng, Hannah Stouter y Marcos Longo.

Figura 10. Creado por Elsa Ordway.

Figura 11. Creado por Ovidiu Csillik.

Figura 12. Publicado en Cavender-Bares et al. (2022).

Figura 13. Adaptado de Ordway et al. (2022).

Figura 14. Adaptado de Chadwick y Asner (2016a).

Figura 15. Creado por Hannah Stouter, Marius von Essen, Ane Alencar y Maria Santos.

Figura 16. Creado por Yanlei Feng y Hannah Stouter.

Figura 17. Creado por Marcos Longo.

Figura 18. Creado por Félicien Meunier y Elsa Ordway.

Figura 19. Figura original de Fisher y Koven (2020), nuevos procesos incluidos por Marcos Longo y Renato Braghieri.

Figura 20. Creado por Virginia Zaunbrecher.

Figura 21. Creado por Adia Bey.

Figura 22. Creado por Michael Keller y Elsa Ordway

12 Glosario

Bioeconomía: Un sistema económico impulsado por la investigación y la innovación en las ciencias de la vida y la biotecnología, que abarca aplicaciones transformadoras de base biológica y biohabilitadas en ámbitos como la energía, los productos químicos, los materiales avanzados, la remediación medioambiental, la agricultura, la electrónica y la salud. Es posible gracias a los avances tecnológicos en ingeniería, informática y ciencias de la información ([Schmidt Futures, 2022](#)).

Biodiversidad: La variedad de vida en la Tierra, incluida su variación a nivel de genes, especies, rasgos funcionales y ecosistemas. En los bosques tropicales, la biodiversidad es excepcionalmente alta dentro y a través de los bosques, apoyando interacciones complejas y la función del ecosistema, y causando heterogeneidad en las respuestas climáticas y la resiliencia.

Ciclos biogeoquímicos: Los ciclos biogeoquímicos abarcan el movimiento y la transformación de elementos esenciales (por ejemplo, carbono, nitrógeno y fósforo) a través de la biosfera, la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera de la Tierra. En los bosques tropicales, estos ciclos son muy dinámicos, con una rápida renovación de nutrientes y biomasa; no obstante, los bosques tropicales desempeñan un papel importante en el almacenamiento mundial de carbono.

Reservas y flujos de carbono: Las reservas de carbono se refieren a la cantidad total de carbono almacenada en un sistema (por ejemplo, en la vegetación, los suelos o los océanos), mientras que los flujos de carbono representan el movimiento de entrada y salida de carbono de estas reservas a través de procesos como la fotosíntesis, la respiración y la descomposición, e incluyen flujos de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y flujos laterales de carbono.

Interacciones y retroalimentaciones climáticas: Interacciones bidireccionales entre los sistemas climáticos y los ecosistemas. Los bosques tropicales regulan directamente los ciclos del carbono, el agua y la energía. Los cambios climáticos (como los cambios en la temperatura y las precipitaciones) y los cambios en el uso y la cubierta del suelo (como los incendios y la degradación forestal) pueden alterar la dinámica de los ecosistemas forestales, creando circuitos de retroalimentación que afectan a la estabilidad del clima mundial.

Co-beneficios: Contribuciones positivas conjuntas de la biodiversidad y la diversidad cultural para los seres humanos y otras especies. Estas contribuciones están asociadas a los conceptos de contribuciones de la naturaleza a las personas y contribuciones de las personas a la naturaleza (Levis et al, 2024).

Comunidad: Grupos formales e informales de personas que se perciben a sí mismas como miembros que pueden compartir intereses, experiencias, recursos, actividades, profesiones, medios de vida, cultura, geografía, orígenes, lengua o cualquier combinación de los anteriores.

Dinámica de las perturbaciones: La dinámica de las perturbaciones varía según el tipo, la intensidad y la frecuencia, e incluye fenómenos naturales o inducidos por el hombre, como incendios, tormentas, sequías y talas, que alteran los ecosistemas y afectan a su estructura y función. En los bosques tropicales, estas perturbaciones pueden provocar cambios en el ciclo biogeoquímico, la biodiversidad y la retroalimentación del clima y los sistemas socioecológicos.

Ecosistema: PANGEA utiliza la definición de trabajo de ecosistema del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), que incluye a las personas como organismos clave, incluyendo así los agroecosistemas y, más ampliamente, los sistemas socioecológicos. Unidad funcional formada por organismos vivos, su entorno no vivo y las interacciones dentro de ellos y entre ellos. Los componentes incluidos en un ecosistema dado y sus límites espaciales dependen del propósito para el que se defina el

ecosistema: en algunos casos son relativamente nítidos, mientras que en otros son difusos. Los límites de los ecosistemas pueden cambiar con el tiempo. Los ecosistemas están anidados dentro de otros ecosistemas, y su escala puede variar desde muy pequeña hasta la biosfera entera. En la era actual, la mayoría de los ecosistemas contienen personas como organismos clave o están influidos por los efectos de las actividades humanas en su entorno. (IPCC AR6 WGI, WGII, WGIII)

Servicios de los ecosistemas: Los servicios ecosistémicos son los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas naturales, incluidos los servicios de aprovisionamiento (por ejemplo, alimentos, agua), regulación (por ejemplo, regulación del clima, control de inundaciones), apoyo (por ejemplo, ciclo de nutrientes, formación del suelo) y culturales (por ejemplo, recreación, valor espiritual).

Degradación forestal: Un bosque está degradado cuando la tasa de perturbación exógena supera la tasa media a largo plazo de perturbación exógena para el ecosistema y los efectos de dicha perturbación pueden distinguirse de la estructura y/o composición del bosque antiguo. La tala, el fuego, la minería y la fragmentación son causas comunes de degradación forestal.

Actividades respetuosas con los bosques: Actividades económicas que utilizan los recursos forestales de forma que se preserve la integridad ecológica del bosque y se apoyen los medios de vida sostenibles de las comunidades locales UICN (2021).

Función de los bosques: La función forestal se refiere a los papeles ecológicos de los bosques, como la regulación del clima, el apoyo a la biodiversidad, el ciclo de nutrientes y la provisión de hábitat, que contribuyen a la salud y estabilidad general de los ecosistemas. Las funciones forestales incluyen la productividad primaria bruta (PPB), la productividad leñosa, la respiración de los ecosistemas y la evapotranspiración.

Estructura forestal: Biomasa, altura del dosel, densidad de tallos, heterogeneidad de la altura vertical y distribuciones verticales de la densidad de la superficie vegetal.

Actividades humanas: Prácticas y comportamientos económicos, de subsistencia, culturales y de desarrollo formales, informales, legales, ilegales y tradicionales de los seres humanos que conducen a la explotación, alteración y degradación de los ecosistemas forestales, como la tala, el desarrollo de infraestructuras, la agricultura, la ganadería, los incendios, la minería, la caza y la explotación de la fauna silvestre y la producción de carbón vegetal.

Cambio en el uso de la tierra: El uso de la tierra y el cambio de la cubierta terrestre se refieren a la alteración de la superficie de la Tierra, incluidos los cambios en cómo se utiliza la tierra (por ejemplo, agricultura, urbanización) y los cambios en su cubierta física (por ejemplo, deforestación, reforestación, expansión urbana).

Resiliencia: La capacidad de los sistemas sociales, económicos y ecológicos interconectados para hacer frente a un evento peligroso, tendencia o perturbación, respondiendo o reorganizándose de manera que mantengan su función, identidad y estructura esenciales. La resiliencia es un atributo positivo cuando mantiene la capacidad de adaptación, aprendizaje y/o transformación (Consejo Ártico, 2016). (IPCC AR6 WGI, WGII, WGIII)

Sistemas socioecológicos: Sistemas interconectados de seres humanos y naturaleza, en los que los componentes ecológicos y sociales interactúan y se influyen mutuamente. En los bosques tropicales, estos sistemas están conformados por los medios de vida, las prácticas culturales y el uso de los recursos de las comunidades locales y globales, mientras que los cambios ecológicos afectan al bienestar social, creando complejas retroalimentaciones entre las actividades humanas y la estabilidad de los ecosistemas.

Comunidades vulnerables: Las comunidades que tienen más probabilidades de sufrir los efectos adversos del cambio climático y la degradación del medio ambiente, incluidos los pueblos indígenas, las comunidades de bajos ingresos y las que dependen de los recursos naturales para su subsistencia. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) (2020).

Vulnerabilidad: La propensión de los sistemas sociales y ecológicos y sus prácticas a verse afectados negativamente por los cambios, abarcando su sensibilidad a dichos cambios y su capacidad de adaptación. Adaptado de (FAO 2013).

13 Acrónimos y abreviaturas

| | |
|----------------------|--|
| AboVE | Experimento sobre la vulnerabilidad del Ártico Boreal |
| ABSOLUG | Simulador basado en agentes de la gobernanza del uso del suelo |
| AGEOS | Agencia de Estudios y Observaciones Espaciales (Gabón) |
| AGU | Unión Geofísica Americana |
| IA | Inteligencia artificial |
| AI/ML | Inteligencia artificial y aprendizaje automático |
| AI4ESP | Artificial Intelligence for Earth System Predictability (Inteligencia Artificial para la Predictibilidad del Sistema Terrestre) |
| AmeriFlux | Red americana de torres de flujo por covarianza de Foucault |
| AmIT | Instituto Tecnológico de Amazonas |
| AMMA-CATCH | Ánalisis multidisciplinar de los monzones africanos Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique |
| AMMI | Maestros Africanos de Inteligencia Artificial |
| AMSR-E | Radiómetro avanzado de barrido de microondas para la misión EOS |
| AndesFlux | Torres Flux operadas por la PUCP |
| ARES | Centro Aerotransportado de Investigación del Sistema Terrestre |
| ARLA | Nivel de preparación de la aplicación |
| ASTER | Radiómetro espacial avanzado de emisión térmica y reflexión |
| ATBC | Asociación de Biología Tropical y Conservación |
| ATFS | Alianza para la Ciencia de los Bosques Tropicales |
| ATTO | Observatorio de Torres Altas del Amazonas (Presidente Figueiredo, Brasil) |
| BiomeE | A Modelo demográfico de vegetación NASA-GISS |
| BioSCape | Estudio sobre la biodiversidad del Cabo |
| BOREAS | Estudio sobre el ecosistema boreal y la atmósfera |
| CARAF | ¿Experimento de flujo aerotransportado de carbono ? |
| CarbonTracker | Sistema de asimilación de datos para el seguimiento del CO ₂ |
| CARDAMOM | Marco de Modelización de Datos sobre el Carbono |

| | |
|-----------------------|---|
| CARE | Beneficio colectivo, autoridad de control, responsabilidad y ética |
| CBFP | Asociación Forestal de la Cuenca del Congo |
| CBI | Instituto de la Cuenca del Congo |
| CBSI | Iniciativa Científica de la Cuenca del Congo |
| CCE | Ciclo del carbono y ecosistemas (oficina de la NASA) |
| CENAREST | Centro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (Gabón) |
| CEOS | Comité de Satélites de Observación de la Tierra |
| CEP | Plan Experimental Conciso |
| CFIS | Espectrómetro de Fluorescencia de la Clorofila |
| GCIAI | Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional |
| CH₄ | Metano |
| CHIME | Misión Copernicus de imágenes hiperespectrales para el medio ambiente |
| CIAT | Centro Internacional de Agricultura Tropical |
| CIFOR-ICRAF | Centro de Investigación Forestal Internacional y Agroforestería Mundial |
| CliMA | Alianza para la Modelización del Clima |
| MVC | Modelo Comunitario de Tierras |
| CMIP | Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados |
| CMIP5 | CMIP-Fase 5 |
| CMIP6 | CMIP-Fase 6 |
| CMS-Flux | Sistema de monitorización del carbono Sistema de inversión de flujos |
| CNES | Agencia Espacial Nacional Francesa |
| CO₂ | Dióxido de carbono |
| COCCON | Red de colaboración para la observación de la columna de carbono |
| Co-I | Co-investigador |
| COMIFAC | COMIFAC |
| CongoFlux | Torre de flujo de covarianza de Foucault en la cuenca del Congo |
| COS | Sulfuro de carbonilo |
| CSDA | Adquisición de datos de pequeños satélites comerciales |

| | |
|------------------|---|
| CUE | Eficiencia en el uso del carbono |
| DEI | Diversidad, equidad e inclusión |
| DGVM | Modelo Dinámico de Vegetación Global |
| DLR | Centro Aeroespacial Alemán |
| DOE | Departamento de Energía |
| RDC | República Democrática del Congo |
| E3SM | Modelo energético a exaescala del sistema terrestre |
| EBV | Variable esencial de la biodiversidad |
| ECOSTRESS | Experimento de Radiómetro Térmico Espacial de Ecosistemas en la Estación Espacial |
| ED | Demografía de los ecosistemas |
| ED2 | Modelo Demográfico del Ecosistema versión 2 |
| ED3 | Modelo Demográfico del Ecosistema versión 3 |
| EDGE | Explorador Geodésico de Dinámica Terrestre |
| ADNe | Ácido desoxirribonucleico ambiental |
| ELM | Modelo de suelo E3SM |
| EMIT | Earth Investigación de fuentes de polvo mineral en superficie |
| ENSO | El Niño Oscilación del Sur |
| Ent TBM | Modelo de Biosfera Terrestre Ent |
| EOS | Sistema de Observación de la Tierra |
| ES2A | Estrategia "Ciencia de la Tierra para la Acción" de la NASA |
| ESA | Sociedad Ecológica de América |
| ESA | Agencia Espacial Europea |
| ESM | Modelo del Sistema Tierra |
| ESRI | Instituto de Investigación de Sistemas Medioambientales, Inc. |
| ET | Evapotranspiración |
| EUDR | Reglamento de la Unión Europea sobre materias primas libres de deforestación |
| FAIR | Findable , accesible, interoperable y reutilizable |
| FAO | Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación |

| | |
|---------------------|---|
| FAPESP | Fundación para la Investigación de São Paulo |
| FATES | Simulador de ecosistemas terrestres funcionalmente ensamblados |
| FIFE | Primer experimento de campo ISLSCP |
| FLEX | Misión Fluorescence Explorer |
| FLUXNET | Red mundial de torres de flujo de covarianza inducida |
| ForestGEO | Observatorio Forestal Mundial de la Tierra |
| ForestPlots | Red para medir, controlar y comprender los bosques del mundo |
| FORMIND | Modelo forestal Modelo individual |
| FTAC | Comité de Acción Acelerada (sobre Servicios Climáticos) |
| GAO | Observatorio Aerotransportado Mundial |
| GATC | Alianza Global de Comunidades Territoriales |
| GCF-TF | Grupo de Trabajo de Gobernadores sobre Clima y Bosques |
| GEDI | Global Ecosystem Dynamics Investigation (Investigación sobre la dinámica de los ecosistemas mundiales) |
| GEM | Red Mundial de Vigilancia de Ecosistemas |
| GEO BONGroup | on Earth Observations Red de Observación de la Biodiversidad |
| GEO | Grupo de Observación de la Tierra |
| GEO-TREES | Grupo de Observación de la Tierra - Árboles |
| GEI | Gases de efecto invernadero |
| SIG | Sistema de Información Geográfica |
| GISS | Instituto Goddard de Estudios Espaciales (NASA) |
| GLOBEG | Aprendizaje y observación globales en beneficio del medio ambiente |
| GNSS | Sistema Mundial de Navegación por Satélite |
| GOES | Satélites geoestacionarios operativos medioambientales |
| GOSAT | Satélite de observación de los gases de efecto invernadero |
| GPM | Medición global de la precipitación |
| GPP | Productividad primaria bruta |
| GPS | Sistema de posicionamiento global |

| | |
|-----------------------|--|
| GPUG | Unidad de procesamiento gráfico |
| GRACE | Experimento climático y de recuperación de la gravedad |
| GRACE-FO | Misión de seguimiento del Experimento de Recuperación de Gravedad y Clima (GRACE-FO) |
| GSFC | Centro Goddard de Vuelos Espaciales |
| Guyaflux | Torre de flujo de covarianza de Eddy en la estación de campo de Paracou (Sinnamary, Guayana Francesa) |
| Guyafor | Red de 54 parcelas a largo plazo en 17 lugares de la Guayana Francesa |
| H₂O | Water |
| HBCU | Universidades históricamente negras |
| HiLDEN | Red de Ecología de Drones de Gran Latitud |
| SEDE CENTRAL | Sede central |
| HYSPPLIT | Modelo de dispersión y transporte atmosférico de la NOAA |
| HyTES | Espectrómetro hiperespectral de emisión térmica |
| AI | Acuerdo de aplicación |
| ICCN | Instituto Congoleño para la Conservación de la Naturaleza |
| ICOS | Sistema Integrado de Observación del Carbono |
| IEK | Conocimiento ecológico indígena |
| IITA | Instituto Internacional de Agricultura Tropical |
| ILAMB | Proyecto Internacional de Evaluación Comparativa de Modelos Terrestres |
| INPA | Instituto Nacional de Investigaciones de la Amazonia (Brasil) |
| INPE | Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (Brasil) |
| IPBES | Plataforma intergubernamental científico-nORMATIVA sobre diversidad biológica y servicios de los ecosistemas |
| IPCC | Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático |
| IPLCs | Pueblos indígenas y comunidades locales |
| IRD | Instituto de Investigación para el Desarrollo (Francia) |
| ISLSCP | Proyecto Internacional de Climatología de la Superficie Terrestre por Satélite |
| ISRO | Organización de Investigación Espacial de la India |

| | |
|------------------|---|
| ITCZ | Zona de convergencia intertropical |
| UICN | Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza |
| JAXA | Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón |
| JSBACH | Esquema de Jena para el acoplamiento biosfera-atmósfera en el modelo de Hamburgo |
| JULES | Simulación Conjunta del Entorno Terrestre del Reino Unido |
| K34 | Torre de covarianza de Foucault del kilómetro 34 (Manaos, Brasil) |
| K67 | Torre de covarianza de Foucault del kilómetro 67 (Belterra, Brasil) |
| LAI | Índice de superficie foliar |
| LBA | Experimento a gran escala sobre la biosfera y la atmósfera en la Amazonia |
| LBA-ECO | Contribución del Programa de Ecología Terrestre de la NASA a la primera fase de LBA |
| LBNL | Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley |
| LCLUC | Cambios en la ocupación y el uso del suelo (NASA) |
| LEK | Conocimiento ecológico local |
| LPJ | Modelo dinámico global de vegetación de Lund-Potsdam-Jena |
| LPJ-GUESS | Simulador general de ecosistemas LPJ |
| TSM | Temperatura de la superficie terrestre |
| LUH2 | Proyecto de armonización del uso del suelo, versión 2 |
| LVIS | Sensor de tierra, vegetación y hielo |
| MAAP | Plataforma de análisis y algoritmos multimisión |
| MapBiomas | Iniciativa Biome Mapper |
| MASTER | Radiómetro espacial de emisión térmica y reflexión MODIS/ASTER |
| MetaFlux | Marco de metaaprendizaje para las ciencias climáticas |
| MINFOF | Ministerio de Bosques y Fauna, Camerún |
| ML | Aprendizaje automático |
| ModEX | Experimentación con modelos |
| MODIS | Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada |
| MOU | Memorándum de acuerdo |

| | |
|----------------------|---|
| MRV | Seguimiento, notificación y verificación |
| ICM | Institución al servicio de las minorías |
| N₂ | Óxido nitroso |
| NASA | Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio |
| NASA-CASA | Modelo de ecosistema Carnegie-Ames-Stanford de la NASA |
| NBE | Intercambio neto de la biosfera |
| NDVI | Índice de vegetación de diferencia normalizada |
| NEON | Red Nacional de Observatorios Ecológicos |
| NGEE-Tropics | Experimentos de la próxima generación sobre ecosistemas - Trópicos |
| ONG | Organización no gubernamental |
| NISAR | Misión SAR NASA-ISRO |
| NOAA | Administración Nacional Oceánica y Atmosférica |
| NOANET | Red de Acceso Abierto del Noroeste |
| NPP | Productividad primaria neta |
| NSB | Consejo Nacional de Ciencia |
| NSC | Hidratos de carbono no estructurales |
| NSF | Fundación Nacional de la Ciencia |
| NST | Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología |
| OCO-2/3 | Observatorio Orbital del Carbono-2 o -3 |
| OECMOtras | medidas de conservación eficaces |
| OFVi | Iniciativa "Una Visión Forestal |
| OIIR | Oficina de Relaciones Internacionales e Interinstitucionales de la NASA |
| ONACC | Observatorio Nacional del Cambio Climático (Camerún) |
| ORCHIDEE | Organización del carbono y la hidrología en ecosistemas dinámicos |
| ORNL | Laboratorio Nacional de Oak Ridge |
| OSFAC | Observatorio Satelital de los Bosques de África Central |
| OSSE | Experimento de simulación del sistema de observación |
| PAC | Campaña Aerotransportada Pangea |

| | |
|-----------------------|---|
| PACEPlankton | , Aerosol, Nube, Ecosistema oceánico Misión |
| PANGEA | PAN investigación tropical de bioGeoquímica y Adaptación Ecológica |
| PecAn | Analizador predictivo de ecosistemas |
| PFT | Tipo funcional de planta |
| PhenoCam | Cámara fenológica |
| IP | Investigador principal |
| PIP | Portal de información PANGEA |
| PUCP | Pontificia Universidad Católica del Perú |
| GC/CC | Evaluación y control de la calidad |
| R2FAC | Red de Investigación Forestal de África Central |
| RAINFOR | Red de Inventarios Forestales de la Amazonia |
| RepastSymphony | Conjunto de herramientas de simulación de agentes porosos recursivos con interfaz Symphony Java |
| RESSAC | Programa de Investigación Aplicada en Ecología y Ciencias Sociales |
| RGB | Rojo verde azul |
| RRI | Iniciativa para los Derechos y Recursos |
| RUBISCO | Reducción de las incertidumbres en las interacciones biogeoquímicas mediante la síntesis y el cálculo |
| SATSM | Reunión del equipo científico y de aplicaciones y de las partes interesadas |
| SBG | Misión de Biología y Geología de Superficie |
| SDT | Equipo de definición Science |
| SERVIR | SERVIR es una asociación de la NASA y USAID que apoya los esfuerzos liderados a nivel local para fortalecer la resiliencia climática, la seguridad alimentaria e hídrica, la gestión forestal y del carbono, y la calidad del aire. |
| SES | Sistemas socioecológicos |
| SHIFT | SBG Series temporales de alta frecuencia |
| SIF | Fluorescencia inducida por el sol (clorofila) |
| SEDA | Escuela de Conocimientos Autóctonos y Locales |
| SimPachamama | Modelo híbrido de simulación de equilibrios socioambientales |
| SL | Liderazgo científico |

| | |
|----------------|--|
| UCLA | Universidad de California, Los Ángeles |
| CMNUCC | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático |
| UN-SDSN | Red de Soluciones de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible |
| | USAIDAgencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional |
| USDA | Departamento de Agricultura de EE.UU. |
| USFS | Servicio Forestal de EE.UU. |
| USGS | Servicio Geológico de EE.UU. |
| VEDA | Visualización, exploración y análisis de datos |
| VIIRS | Conjunto de Radiómetros de Imágenes Infrarrojas Visibles |
| COV | Compuesto orgánico volátil |
| VOD | Profundidad óptica de la vegetación |
| VPD | Déficit de presión de vapor |
| VPRM | Modelo de fotosíntesis y respiración de la vegetación |
| VSWIR | Visible a infrarrojo de onda corta |
| WRI | Instituto de Recursos Mundiales |
| WUE | Eficiencia en el uso del agua |

14 Apéndices

- A. Cartas de apoyo
- B. Socios de PANGEA y actividades de participación
- C. Participación durante el estudio exploratorio
- D. Actividades de investigación y seguimiento previstas y en curso
- E. Tabla detallada de medidas PANGEA
- F. Respuestas a los comentarios
- G. Temas fuera del ámbito de PANGEA

Mesas modelo

Tabla X. Leyenda de la tabla PANGEA.

Nota de la tabla PANGEA.

| CUADRO RÚBRICA C PANGEA | CUADRO RÚBRICA C PANGEA | TABLA RÚBRICA C PANGEA REDUCIDO MANUALMENTE A 8 PT |
|---|---|--|
| Relleno de encabezado de columna estándar: 198/224/220 | Subrúbrica gris alternativa Relleno: 210/210/210 | Relleno alternativo del encabezamiento azul del mismo tono que el verde: 194/225/241 |
| CUADRO RÚBRICA L PANGEA Relleno estándar de encabezamiento de fila: 227/240/249 | Tabla Texto PANGEA Relleno gris alternativo: 239/239/239 | Tabla Texto PANGEA reducido manualmente a 8 pt-as probablemente tendrá que hacerse en algunos lugares. |
| CUADRO RÚBRICA L PANGEA | Tabla Texto PANGEA | Tabla Texto PANGEA |
| CUADRO RÚBRICA L PANGEA | • Mesa Bullet PANGEA | Tabla Texto PANGEA |
| CUADRO RÚBRICA L PANGEA | Tabla Texto PANGEA | Tabla Texto PANGEA |
| CUADRO RÚBRICA L PANGEA | Tabla Texto PANGEA | Tabla Texto PANGEA |
| CUADRO RÚBRICA L PANGEA | Tabla Texto PANGEA | Tabla Texto PANGEA |
| CUADRO RÚBRICA L PANGEA | Tabla Texto PANGEA | Tabla Texto PANGEA |

Nota de la tabla PANGEA.

Casilla X. Encabezamiento de casilla PANGEA

Texto en recuadro PANGEA. Relleno azul: 228/232/251.

Texto en recuadro PANGEA. Relleno del recuadro verde: 217/234/211.

Tabla ficticia unicelular para contener figura y leyenda (sin marcos):

Figura de estilo PANGEA Word.

Figura X. Pie de figura en estilo PANGEA Word (con el nº de figura en negrita manualmente).

A. Cartas de apoyo

Instituto Alexander von Humboldt (Instituto Humboldt);
<https://www.humboldt.org.co/>

Alianza Bioversity & Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT);
<https://alliancebioversityciat.org/>

Red de torres de flujo por covarianza inducida de AmeriFlux-Americas;
<https://ameriflux.lbl.gov/>

Instituto Tecnológico de Amazonas (AmIT); <https://amit.institute/>

Observatorio de Torres Altas del Amazonas (ATTO); <https://www.attoproject.org/>

Torres AndesFlux-flux operadas por la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)

Centro Aerotransportado de Investigación del Sistema Terrestre (ARES);
<https://www.uzhfoundation.ch/en/projects/sustainability/ares-airborne-research-facility-for-the-earth-system-1>

Red de Observatorios Ecológicos Nacionales de Batelle (NEON);
<https://www.neonscience.org/>

Biodiversity Survey of the Cape (BioSCape); <https://www.bioscape.io/>

Modelo demográfico de vegetación BiomeE-NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS); <https://ntrs.nasa.gov/citations/20220017198>

Centro de Investigación Forestal Internacional y Agroforestal Mundial (CIFOR-ICRAF);
<https://www.cifor-icraf.org/>

Centro de Estudios para una Amazonia Sostenible (CEAS); <https://ceas.usp.br/>

Alianza para la Modelización del Clima (CLiMA); <https://clima.caltech.edu/> Iniciativa Científica de la Cuenca del Congo (CBSI); <https://congobasinscience.net/>

CongoFlux- torre de flujo de covarianza de Foucault en la cuenca del Congo - Equipo de la Universidad de Gante; <https://www.congo-biogeochem.com/congoflux>

Programa de investigación de medición y muestreo de las turberas del Congo;
<https://congopeat.net/>

Ecosystem Demography modeling community (ED2);
<https://github.com/EDmodel/ED2>

Embrapa (Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria) Acre;
<https://www.embrapa.br/en/international>

Embrapa Florestas; <https://www.embrapa.br/en/international>

Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI); <https://www.esri.com/en-us/home>

FLUXNET CH4-iniciativa para compilar una base de datos mundial de mediciones del flujo de metano por covarianza de Foucault; <https://fluxnet.org/data/fluxnet-ch4-community-product/>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO);
<https://www.fao.org/fao-office-climate-change-biodiversity-environment/en>

ForestGEO; <https://forestgeo.si.edu/>

ForestPlots-red para la medición, seguimiento y comprensión de los bosques del mundo; <https://forestplots.net/>

Agencia Gabonesa de Estudios y Observaciones Espaciales (AGEOS);
<http://spaceinafrica.com/2019/02/26/all-about-ageos-gabon-space-program/>

Grupo de Observación de la Tierra-Árboles (GEO-TREES); <https://geo-trees.org/>

Global Land Analysis & Discovery (GLAD); <https://glad.umd.edu/>

Grupo de Trabajo de Gobernadores sobre Clima y Bosques (GCF-TF);
<https://www.gcftf.org/>

Torre de covarianza Guyaflux-eddy en la estación de campo de Paracou (Sinnamary, Guayana Francesa); <https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyaflux-tower>

Guyafor-red de 54 parcelas a largo plazo en 17 lugares de la Guayana Francesa;
<https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyafor-network>

Sistema Integrado de Observación del Carbono (ICOS); <https://www.icos-cp.eu/>

Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA); <https://www.iita.org/>

Mancomunidad Regional Amazónica (MRA)

Iniciativa MapBiomass-Biome Mapper; <https://brasil.mapbiomas.org/en/>

NASA Harvest; <https://www.nasaharvest.org/>

Centro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Gabón (CENAREST);
<https://www.cenarest-gabon.org/>

Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales, Brasil (INPE);
<https://www.inpe.br/crc/>

Observatorio Nacional del Cambio Climático, Camerún (ONACC); <https://onacc.cm/>

Next Generation Ecosystem Experiments (NGEE)-Tropics; <https://ngee-tropics.lbl.gov/>

Iniciativa "Una visión forestal" (OFVi); <https://www.oneforestvision.org/>

Universidad Estatal de Pensilvania, Departamento de Meteorología y Ciencias Atmosféricas; <https://www.met.psu.edu/>

Planet; <https://www.planet.com/>

Analizador predictivo de ecosistemas (PecAn); <https://pecanproject.github.io/>

Fundación Rainforest Noruega; <https://www.regnskog.no/en/>

Reducción de las incertidumbres en las interacciones biogeoquímicas mediante la síntesis y el cálculo (RUBISCO);
<https://climatemodeling.science.energy.gov/projects/reducing-uncertainty-biogeochemical-interactions-through-synthesis-and-computation-rubisco>

Instituto de Investigación para el Desarrollo, Francia (IRD); <https://en.ird.fr/>

Observatorio Satelital de los Bosques de África Central (OSFAC);
<https://www.osfac.net/>

Sociedad para la Protección de Redes Subterráneas (SPUN); <https://www.spun.earth/>

Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (UN-SDSN);
<https://www.unsdsn.org/>

UK Centre for Ecology and Hydrology; <https://www.ceh.ac.uk/>

Universidad Nacional del Altiplano (UNAP) Perú; <https://www.portal.unap.edu.pe/>
Carta en español, seguida de su traducción al inglés

Universidad Nacional de Piura Perú (UNP)-Departamento de Agronomía;
<https://www.gob.pe/unp>

Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú (UNTRM)
(<https://www.untrm.edu.pe/portal/en/>)

Universidad Católica de Lovaina, Bélgica-Instituto Tierra y Vida;
<https://uclouvain.be/en/research-institutes/eli>

Vicerrectorado de Investigación y Actividades Creativas de la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA); <https://www.research.ucla.edu/>

Universidad de Energía y Recursos Naturales (UENR) Ghana, Oficina del Vicerrector;
<https://uenr.edu.gh/>

US Forest Service International Program (USFS-IP); <https://www.fs.usda.gov/about-agency/international-programs>

Red Flux de África Occidental

Wildlife Conservation Society (WCS); <https://www.wcs.org/>

Woodwell Climate and Research Center; <https://www.woodwellclimate.org/>

Instituto de Recursos Mundiales (WRI); <https://www.wri.org/>



December 4th 2024

NASA Earth Science Division

NASA Headquarters
300 E Street SW
Washington, D.C. 20546

Dear Members of the NASA Earth Science Division,

On behalf of the Alexander von Humboldt Institute, I am writing to express our strong support for the PAN-Tropical Investigation of BioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) initiative. We are eager to collaborate in advancing PANGEA's scientific objectives in Colombia, and to contribute to the broader goal of understanding tropical forest resilience to climate change and land-use dynamics.

The Humboldt Institute's mission is to conduct basic and applied research on Colombia's biodiversity, including the creation of a national inventory of the country's biotic, hydrobiological, and genetic resources. This mission aligns perfectly with PANGEA's goal to investigate tropical forests and their responses to environmental change. We have a significant expertise in conducting biodiversity monitoring using a variety of tools, including forest inventory plots, plant trait measurements, bioacoustic monitoring, camera traps, and eDNA collection. We also specialize in integrating field-based data with advanced remote sensing, such as hyperspectral and lidar technologies, making us a strong partner for PANGEA's goal of scaling biodiversity measurements across tropical landscapes. Our ongoing research in the Colombian Amazon, Andean regions, and other tropical ecosystems positions us well to support PANGEA's efforts, particularly in enhancing our understanding of the impacts of climate change and land-use on biodiversity and ecosystem function.

A key objective of PANGEA is to prepare the next generation of scientists from tropical countries, particularly from regions like the Amazon and Congo Basins, who will carry the work forward. The Humboldt Institute is deeply committed to fostering capacity building for effective biodiversity conservation and its sustainable use, particularly among local and Indigenous communities. We have a strong record of engaging postdocs, and undergraduates in field research, as well as facilitating exchanges with global researchers. We therefore look forward to contributing to PANGEA's training efforts by offering research opportunities and mentoring to students and early-career scientists from Colombia and the broader tropical regions. By collaborating on workshops and field-based training, the Humboldt Institute can help ensure that PANGEA's activities are aligned with local research priorities and the knowledge needs of tropical nations.

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

Somos el Instituto Nacional de la Biodiversidad



Ultimately, our primary goal is to ensure that biodiversity knowledge is transformed into actionable solutions for conservation and sustainable development. To reach this objective, we work hand-in-hand with local communities, decision-makers, and the private sector to implement science-based solutions for biodiversity conservation, land-use planning, and climate adaptation. These efforts directly support PANGEA's objective of using science to inform decision-making and guide actions for climate change mitigation, biodiversity conservation, and sustainable land use.

In sum, the Humboldt Institute is well-positioned to support PANGEA's goal of developing tools for monitoring environmental changes, such as fire risks, biodiversity trends, and carbon sequestration. Our expertise in biodiversity monitoring, our commitment to capacity building, and our experience translating scientific research into actionable knowledge make us a valuable partner for PANGEA. Together, we can contribute to more resilient, sustainable, and informed management of tropical forests and the biodiversity they support.

Sincerely,

Jose Manuel Ochoa
Centro de Estudios Socioecológicos y Cambio Global
Alexander von Humboldt Institute
Bogotá, Colombia

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt

Somos el Instituto Nacional de la Biodiversidad



RM-CJ-209-2024
August 21, 2024

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

Thank you for the invitation to collaborate on the PAN Tropical Investigation of BioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. The International Center for Tropical Agriculture (CIAT) is happy to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

CIAT is a non-profit, non-governmental research organization established in 1967, with headquarters in Palmira-Colombia and various regional offices worldwide. Our goal is to deliver research-based solutions that harness agricultural biodiversity and sustainably transform food systems to improve people's lives in a climate crisis. To achieve our objectives, we currently conduct research on crop improvement, agrobiodiversity conservation, and climate-smart agriculture in regions including Latin America, Africa, and Asia.

PANGEA aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, CIAT can provide cost-shared funding in the form of in-kind support. This includes staff time, as well as evidence-based data and information derived from our collaborations with national and regional governments, other CGIAR Centers and private sector actors. These partners play a critical role in advancing agricultural and ecological research in their respective regions and are essential in achieving sustainable land management practices. Engaging with these partners is beneficial for PANGEA as they bring local knowledge, research expertise, and strong connections with farming communities that



The Alliance of Bioversity International and the International Center for Tropical Agriculture (CIAT) is part of CGIAR, a global research partnership for a food-secure future.

Bioversity International is the operational name of the International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI).

The Americas Hub
Km 17, Recta Cali-Palmira CP 763537
Apartado Aéreo 6713
Cali, Colombia
Tel. (+57) 602 4450000

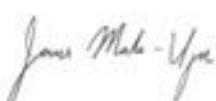
alliancebioversityciat.org/
www.cgiar.org

are directly affected by climate change. Our expertise spans sustainable and zero-deforestation business and investment models, bioeconomy, biodiversity monitoring, and climate services, integrating comprehensive crop and soil data.

We conduct various initiatives and projects in the Amazon Basin within the tropical rainforest ecosystem because it is a critical region for global biodiversity and carbon storage. This site is of strategic importance to PANGEA due to its high biodiversity and the significant impact of deforestation and land-use change on global climate patterns. CIAT has been working in this location for over 40 years and can facilitate PANGEA's implementation by helping with local stakeholder engagement, data collection, and capacity-building activities.

While our organization excels at harnessing agricultural biodiversity to drive sustainable food systems and improve livelihoods, particularly through our expertise in community engagement, the integration of crop and soil data, and biodiversity monitoring, we seek to engage with PANGEA to enhance our work in Central Africa and Southeast Asia along the Amazon rainforest. Specifically, PANGEA can support us by providing advanced Earth observation tools and methodologies that will complement our on-the-ground research. This collaboration will help us improve our understanding of ecosystem dynamics, monitor deforestation impacts, and strengthen our ability to develop climate-smart strategies. By integrating PANGEA's insights with our existing data, we can enhance our efforts in biodiversity conservation and sustainable land management in this critical region.

PANGEA offers a unique opportunity to explore novel research hypotheses that are crucial for understanding tropical forest systems in the face of rapid environmental changes. We are excited to collaborate on this groundbreaking research and contribute to advancing our collective knowledge of these vital ecosystems. We look forward to engaging in new research endeavors under the PANGEA initiative and leveraging its insights to enhance our efforts in Central Africa and Southeast Asia along the Amazon rainforest.



Javier Mateo-Vega

Global Director Partnerships & Communications



,
Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary
Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Jena, December 5, 2024

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

This letter attests my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance data and methods gaps related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are very aligned with activities conducted by the Amazon Tall Tower Observatory.

The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO; www.attoproject.org) is a Brazilian-German collaborative project funded primarily by the Brazilian Ministry for Science Technology and Innovation (MCTI), the German Ministry for Education and Research (BMBF), and the Max Planck Society. ATTO, the Amazon Tall Tower Observatory, is a unique scientific platform in the central Amazon, 150 km northeast of Manaus. The overall goal of ATTO is to provide a site for long-term research on the changing role of Amazon forests in the Earth system. Research at ATTO seeks to improve fundamental understanding of the complex physical, chemical and biological interactions between the world's largest expanse of tropical forest and the atmosphere. It includes multidisciplinary studies with over 200 collaborating researchers using the single site to study the balance of energy, water and trace gases, the importance of forests in atmospheric chemistry and aerosol formation, clouds and convection, and the processes underlying seasonal and interannual variations in atmosphere-forest exchange for the diverse ecosystems found in the footprints of ATTO's 80-m and 325-m tall towers.



It is clear that the goals of ATTO and PANGEA are inherently synergistic. For example, both PANGEA and ATTO will seek to link remotely sensed (aircraft and satellite) characteristics with ground observations. Likewise, ATTO is integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests, which complements PANGEA's overall objectives.

Should PANGEA be selected, the ATTO project will be open to opportunities for collaboration. ATTO already involves ~200 collaborating researchers from a range of institutions and disciplines. We have a process for integrating new projects that involves a proposal by potential new investigators, a search for synergies with ongoing research, an assessment of resources needed to support implementation, and an ultimate decision about the integration of the proposed research through our Science Steering Committee. We imagine there are many ways that ATTO can find synergies with PANGEA, and also that PANGEA help can put ATTO measurements into the broader context of other tropical forests.

PANGEA is an exciting project that will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. As the co-coordinator of ATTO from the German side of the project, I confirm our interest in and support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between ATTO and PANGEA.

Sincerely,

Prof. Susan Trumbore, PhD

Dept. Biogeochemical Processes



Lawrence Berkeley National Laboratory



Dr. Margaret S. Torn

Senior Scientist & Senior Program Advisor

Climate & Ecosystem Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory

mstorn@lbl.gov

Oct 20, 2024

Dear Dr. Elsa Ordway and PANGEA Team,

I am writing on behalf of the AmeriFlux Management Project to express our support for the NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA), and to signify our intent to collaborate with PANGEA to produce actionable science on tropical forests around the world.

I lead the AmeriFlux Management Project (AMP), which serves the AmeriFlux Network of 674 field sites and teams measuring land-atmosphere fluxes of carbon, water, and energy using the eddy covariance technique. The U.S. DOE established AMP at Berkeley Lab in 2012 to support the AmeriFlux community and AmeriFlux sites, through activities like data quality assurance and control (QA/QC), technical support, and outreach. AmeriFlux site teams across the Americas, from Chile to Alaska, share their data with the network and we make data openly available at ameriflux.lbl.gov. The network also encompasses the global community of scientists and stakeholders who use the data for myriad applications. AmeriFlux datasets, and the understanding derived from them, provide crucial linkages between terrestrial ecosystem processes and climate-relevant responses at landscape, regional, and continental scales.

AmeriFlux has a long history of working with NASA and providing validation data for NASA missions. In fact, we have just convened a Theme Year of Remote Sensing, which emphasized the value of combining remotely sensed and ground-based observations, and increased collaborations with NASA partners. If PANGEA is selected for funding, we will coordinate with the project to advance these capabilities further.

Tropical forests are important ecosystems of interest for the AmeriFlux community. If PANGEA is selected for funding, we will work with the project and make AmeriFlux resources available in a number of ways.

- The AmeriFlux data archive, with over 3500 site-years of downloadable data, will be available to PANGEA researchers. It would be highly beneficial to expand the set of observations in tropical forests, specifically.
- AMP maintains a set of eddy-flux instrument packages which we loan for up to three years (rapid response systems); PANGEA-affiliated scientists would be able to apply to deploy these systems in tropical forests.
- We will coordinate with PANGEA on joint events, such as workshops and training opportunities.
- We will invite PANGEA researchers to participate in our active research community and events. AmeriFlux regularly comes together in community events, and forms working groups to address new challenges and harness opportunities. The PANGEA project would be invited to host sessions at the AmeriFlux Annual Meeting, give updates at the AmeriFlux AGU Town Hall, and other participation.
- Should new eddy covariance sites for measuring carbon fluxes be established for PANGEA, we will assist in registering them in AmeriFlux, offer technical advice, and provide data QA/QC, processing, and publication.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink that reads "Margaret Torn".

Margaret Torn



November 7th, 2024.

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

**Subject: Letter of Support for
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express our strong support for NASA's Terrestrial Ecology Field Campaign proposal: PAN-tropical Investigation of Biogeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, this campaign will address gaps in data, methods, and applications related to measuring, understanding, and scaling carbon, water, and energy fluxes in tropical forests, as well as their interactions with biodiversity, climate change, and human activities. PANGEA has the potential to support and enhance the Sustainable Development and Local Resource Exploration; Education and Scientific Training; and International Research and Innovation Networks activities led and conducted by AmiT in the Pan-Amazon region.

The Amazonian Institute of Technology (AmiT) is a non-profit initiative established in 2022 in Brazil (<https://amit.institute/>). Our mission is to contribute to the socioeconomic development and improved quality of life of the Amazonian population, in synergy with the conservation and valorization of forests and rivers, by transforming scientific and traditional knowledge into technological innovation serving the Amazon and the world. To achieve our objectives, we plan to operate in the countries of the Amazon basin. Currently, we are in contact with Peru and Colombia to develop activities involving: Advanced Technologies for the Amazon; Human Development for the Amazon; Sustainability for the Amazon Biome; Amazonian Environmental Services; and Applied Biological Sciences for the Development of the Amazon.

We recognize alignment between the efforts and objectives of AmiT and PANGEA, particularly in Sustainable Development and Local Resource Exploration; Education and Scientific Training; and Formation of International Research and Innovation Networks. We are eager to support PANGEA's efforts to leverage Earth observation with multidisciplinary methods to conduct research. AmiT is enthusiastic about the prospect of engaging diverse communities in the tropics to promote scientific understanding, strengthen research and monitoring capacity, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We seek initiatives with local communities and institutions in partner with Amazonian countries. We are undertaking this initiative in the Amazon due to our strategic geographic position and the region's importance to PANGEA, considering the risks the Amazon faces. AmiT proposes the socioeconomic



development of Amazonian populations through the use of Science and Technology to address the region's major challenges in strategic areas such as conservation, bioeconomy, health, infrastructure, and technological innovation. AmiT has a 25-year agenda for its work in the Amazon.

If PANGEA is funded, our team will also consider developing joint research proposals to seek funding that supports participation in studies related to PANGEA and AmiT. We believe this is an important project with high-impact potential that can significantly contribute to knowledge about the Amazon. On behalf of AmiT, I express my full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support for PANGEA will allow us to pursue this common interest.

Sincerely,

Adalberto Luis Val
Amazonian Institute of Technology
Manaus, AM, Brazil

INTE 050-2024

Dr. Elsa Ordway

Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Lima, 22 October, 2024

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PANtropical Investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, this campaign will fill critical gaps in our understanding of biogeochemical cycles in tropical forests and their feedbacks with climate, biodiversity, and human activities. PANGEA will also complement and reinforce national and international activities led by NASA and DOE, aligning with ongoing collaborations with AndesFlux, a network led by the Pontifical Catholic University of Peru.

The synergies between AndesFlux and PANGEA are evident, particularly in the measurement and analysis of biogeochemical gases (CO_2 , H_2O , CH_4), using eddy flux towers, and forest dynamics, using inventory plots. For years, AndesFlux has been at the forefront of monitoring these processes across five sites spanning the climatic gradient of the western Amazon. Our goal is to elucidate the drivers of biogeochemical gas fluxes and forest dynamics in one of the most understudied regions of the Amazon basin.

We are enthusiastic about PANGEA's vision to leverage Earth observation data and multidisciplinary approaches to advance tropical ecology. The campaign's commitment to engaging diverse communities across the tropics resonates with our own objectives of advancing scientific understanding, building capacity for research and monitoring, and applying results to inform climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

The western Amazon holds strategic importance for achieving PANGEA's objectives. The data we are collecting here are critical for developing a comprehensive understanding of Amazonian ecosystems. Should PANGEA be funded, AndesFlux can offer logistical support across our five sites to validate and improve satellite-derived measurements. We also envision using our existing data to collaborate on PANGEA-related studies, which would benefit from dedicated research funding.



As a longstanding leader in measuring biogeochemical gases and forest dynamics in the Western Amazon, the Pontifical Catholic University of Peru is equally committed to capacity building. Through PANGEA, we aim to expand opportunities for Peruvian scientists by supporting their participation in Master's and Ph.D. programs that utilize AndesFlux data. This will ensure a pipeline of skilled researchers equipped to tackle critical ecological questions.

PANGEA represents an unparalleled opportunity to enhance our collective understanding of Earth systems. As professors and principal investigators of AndesFlux, we express our unwavering support for this campaign and are optimistic that NASA's backing will enable us to pursue these shared research goals.

Founded in 1917, the Pontifical Catholic University of Peru is a leading private research institution based in Lima. Our mission is to advance knowledge and innovation through rigorous research, academic excellence, and community engagement. To achieve these objectives, we operate projects in diverse ecosystems, including tropical forests, coastal zones, and Andean environments, where we focus on ecological monitoring, capacity building, and sustainable development initiatives.

We look forward to the potential of contributing to PANGEA and are confident that this partnership will yield transformative scientific and societal impacts.

Eric G. Cosio, Ph.D.
Director, INTE-PUCP
Professor
Science Department

Norma Salinas, Ph.D.
Senior Research Scientist, INTE-PUCP
Associate Professor
Science Department



UZH, President's Services, Rämistrasse 71, 8001 Zurich

Prof. Dr. Elsa M. Ordway
University of California, Los Angeles
USA

Prof. Dr. Michael Schaepman
Professor of Remote Sensing
University of Zurich
Switzerland

09 November 2024

Letter of Support for PANGEA

Dear Dr. Ordway

This letter of support refers to your white paper of PANGEA («The PAN tropical of bioGeochemistry and Ecological Adaptation») discussing the scoping of a NASA-sponsored field campaign.

The above white paper provides in depth information on the scientific rationale, a study design concept for a field campaign, addressing the key science questions of PANGEA, and its rationale and implementation. We have read with great interest the white paper and we are pleased to fully support its goals within the possibilities of the University of Zurich.

More specifically, the University of Zurich acts as Principal Investigator for an airborne observatory named ARES (Airborne Research Facility for the Earth System) with the imaging spectrometer AVIRIS-4 serving as core instrument. AVIRIS-4 is an instrument jointly developed between NASA JPL and the University of Zurich and in operation since 2024.

The ARES team and infrastructure is glad to support PANGEA with airborne acquisitions. The scientific content of PANGEA is of utmost importance and relevance; therefore, the University of Zurich expresses its willingness to provide some in-kind financing for the deployment of ARES for PANGEA.

We are looking forward to a continued excellent collaboration!

Kind regards,

Prof. Dr. Michael Schaepman
President, Professor of Remote Sensing

[Click or type here to enter the enclosures.]



November 20, 2024

Dr. Elsa Ordway
Forest Ecosystems & Global Change Lab
Department of Ecology and Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
elsaordway@ucla.edu

Dear Dr. Ordway,

On behalf of Battelle and the NEON program, I am writing regarding your research proposal entitled, “PANGEA (PAN tropical investigation of and Ecological Adaptation) - A Scoping Study for the NASA Tropical Terrestrial Ecology Campaign” being submitted to NASA’s Terrestrial Ecology Program.

If PANGEA is funded, Battelle will work together with you on the proposed effort as we would for any appropriately related NASA-funded project, subject to availability of resources and alignment of the proposed activities with NEON’s mission.

PANGEA is a proposed, decade-long campaign that employs satellite and airborne remote sensing paired with ground and flux tower measurements to characterize how heterogeneous tropical forests within and among continents vary in response to anthropogenic pressures to understand and predict their vulnerability or resiliency to future change. If selected, PANGEA will establish a network of centrally coordinated field and airborne campaigns that are distributed across targeted tropical forest ecosystems to fill data gaps and enable scaling between field and remotely sensed datasets, as well as regional and pan-tropical scale modeling.

The National Ecological Observatory Network (NEON), funded by the U.S. National Science Foundation and operated by Battelle, offers open, high-quality, continental-scale ecological data and samples. These resources are freely accessible, enabling researchers to understand and predict ecological responses to environmental changes. NEON operates 47 terrestrial and 34 aquatic sites across the U.S., including Alaska, Hawaii, and Puerto Rico. In coordination with in-situ observational and instrumented systems (e.g., eddy covariance flux towers), NEON conducts airborne remote sensing surveys, with the Airborne Observation Platform (AOP), to gather regional-scale landscape data during peak greenness, providing insights into land cover, ecological changes, and the impact of invasive species. All NEON data and resources are freely accessible for download, sharing, and analysis via the NEON Data Portal or the NEON Data API.

We are closely integrated with the environmental and ecological research community through collaboration, standardized practices, data usage, and research support services. NEON also provides educational and training resources to foster the next generation of students and scientists and aims to broaden and diversify the community for effective utilization of NEON data, samples, and technology.

Battelle promotes a safe and inclusive working environment on the NEON Program that complies with the NSF requirement for Safe and Inclusive Working Environments for Off-Campus or Off-Site Research. It is expected that any individuals working with NEON staff will adhere to the NEON Code of Conduct to create a safe and positive community experience for all.

We are actively collaborating with the NASA EMIT team to develop scaling workflows between NEON and satellite data in preparation for NASA's upcoming Surface Biology and Geology (SBG) mission, and PANGEA could strengthen collaboration and engage a broader research community. There will be strong synergies between NEON and PANGEA in methods optimization and advancement, data collection and processing standards, algorithm development, scaling approaches, training, validation of satellite analyses and large-scale synthesis studies using NEON-like data across global ecological gradients. The NEON Program would benefit from collaboration with PANGEA, given NEON's sites in Hawaii and Puerto Rico fall within PANGEA's extended pan-tropical domain.

PANGEA will be crucial for assessing the resilience and vulnerability of tropical forests to climate change, and provide guiding data in biodiversity conservation, climate change adaptation, and mitigation.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink that reads "Paula Mabee". The signature is fluid and cursive, with "Paula" on the top line and "Mabee" on the bottom line.

Paula Mabee, Ph.D.

Chief Scientist and Observatory Director
National Ecological Observatory Network (NEON)
Battelle
Boulder, CO USA
mabee@battelleecology.org

Dear Review Panel,

It is our pleasure to recommend the PANGEA project and to offer the experience and expertise of BioSCape as a resource for its success. BioSCape is a biodiversity-focused airborne and field campaign funded by NASA's Biodiversity and Ecological Conservation Program. The project aims to enhance our understanding of terrestrial and aquatic ecosystems in South Africa through advanced imaging spectroscopy, thermal, and lidar data collection. The ultimate goal of BioSCape has been to advance our capability to measure biodiversity from space, shedding light on ecosystem structure, function, and composition.

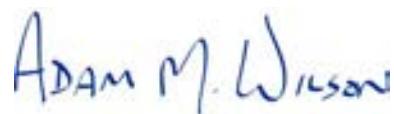
The BioSCape campaign presented an exceptionally complex Concept of Operations. The science team included 19 PI-led research teams with unique objectives and distinct geographic regions of interest. The campaign required near-simultaneous data collection of target areas by four NASA instruments aboard two separate aircraft—an orchestration made even more challenging by varying environmental conditions and science requirements. Moreover, the BioSCape team was intentionally international, with over 150 members, nearly half of whom were affiliated with institutions outside the U.S. While this diversity brought tremendous value, it also presented challenges in equitable funding due to restrictions on direct U.S. federal funding for non-U.S. affiliates. Additionally, the science team was diverse in scientific discipline, proximity to end-users, field experience, local knowledge, technical capacity, and culture. Consequently, BioSCape was vulnerable to parachute science. Being aware of this risk, BioSCape made a concerted effort to prevent parachute science through co-developing research with end-users in mind and demonstrating a commitment to Open Science, capacity building, and outreach.

BioSCape was a huge success, and we hope to share the lessons we learned with PANGEA and support them in executing high-quality, inclusive international NASA science. Specifically, the BioSCape leadership team will support PANGEA by offering advice on:

- Executing a complex airborne and field campaign in a middle-income country with a diverse set of science team objectives.
- Making progress in best practices for preventing parachute science through co-developing research with end-users in mind and demonstrating a commitment to Open Science, capacity building, and outreach.
- Running an inclusive international campaign and cultivating an ethical and high-trust team dynamic.
- Garnering support and participation from multiple local, regional, and national agencies and institutions on the ground in Africa.

The BioSCape team strongly supports the goals of PANGEA and is committed to contributing to its success. We look forward to the possibility of collaborating with the PANGEA team and seeing their accomplishments in advancing NASA's research objectives.

Sincerely,



Adam Wilson (PI) on behalf of the BioSCape leadership team: Erin Hestir (Co-PI), Jasper Slingsby (South African PI), and Anabelle Cardoso (Science Team Manager)



Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095, USA

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

This letter is to confirm our support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If the field campaign as proposed is selected, PANGEA will fill a fundamental gap on the data needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with climate change and human activities, contributing towards an improved understanding of how tropical forests are responding to the rapid global changes. PANGEA's overarching goals are closely aligned to the endeavor of modeling global vegetation dynamics and land surface fluxes at NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) in its earth system model, ModelE.

Demographic vegetation modeling (BiomeE) is a model development project within GISS ModelE that has been supported by the NASA Modeling, Analysis, and Prediction (MAP) program since 2020 (<https://map.nasa.gov/research/ROSES20/>). This project's main objective is to model global vegetation dynamics and its feedback to climate systems. Tropical forest ecosystems are a major component in this modeling effort.

We foresee the synergistic activities and opportunities for collaboration between the land modeling group at GISS and PANGEA. Both projects aim at improving the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings will improve the predictive skills of terrestrial biosphere models and quantify the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. We have submitted a proposal to NASA MAP 2024 on integrating observations across multiple scales with NASA GISS's demographic vegetation model (BiomeE) based on data assimilation and machine learning approaches to gain process-understanding of the main drivers of forest-savanna ecosystem state shifts in the tropical regions of South America and Africa. This topic is also an important objective for PANGEA.

We will look for possible ways for direct involvement with PANGEA should the field campaign be selected for improving the modeling of tropical forest ecosystem in GISS ModelE. We will

look for calls for proposals and funding opportunities from PANGEA and other programs (e.g., MAP, Carbon Science, and Biological Diversity & Ecological Conservation), and seek contributions that are related to the goals of PANGEA.

PANGEA is a critically important project that would significantly advance our scientific knowledge of the ecosystems that are still poorly represented in Earth system models. As the developer of the terrestrial ecosystem module in GISS ModelE, we would like to offer our enthusiastic support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration with PANGEA.

Sincerely yours,



Ensheng Weng
Associate Research Scientist
Center for Climate Systems Research, Columbia University
NASA Goddard Institute for Space Studies
2880 Broadway, New York, NY 10025, USA
Email: ew2560@columbia.edu, ensheng.weng@nasa.gov
Office: 212-678-5585
<http://www.giss.nasa.gov/staff/eweng.html>



Benjamin Cook
Research Physical Scientist
NASA Goddard Institute for Space Studies
2880 Broadway, New York, NY 10025, USA
Email: benjamin.i.cook@nasa.gov
Office: 212-678-5669
<https://www.giss.nasa.gov/staff/bcook.html>



Prof. Paulo Artaxo

Centro de Estudos Amazônia Sustentável
Universidade de São Paulo



Phone: +[55] (11) 3091 7016

+55-11-991158970

e-mail: artaxo@if.usp.br

São Paulo, November 9, 2024

To whom it may concern
PANGEA letter of support

The Center for Sustainable Amazonia Studies (CEAS) from the University of São Paulo (USP) is pleased to support the PANGEA proposal fully. This innovative approach will help us better understand the critical role that tropical forests play in the global climate. The Brazilian scientific community is eager to join PANGEA's efforts. We are running LBA, ATTO, FACE, and many large-scale experiments that are closely related to the PANGEA scientific agenda.

The University of São Paulo has recently set up a Center for Sustainable Amazonia Studies, which has more than 200 USP researchers from several areas. Our multidisciplinary approach is online with PANGEA, and we will be happy to help and support PANGEA activities.

The FAPESP Global Change Program, of which I am one of the coordinators, will also be happy to join forces. CEAS is already running several FAPESP Thematic projects, and integrating these different initiatives will benefit all of us.

We fully support PANGEA and are ready to help with the implementation plan, integrating our activities with this critical scientific agenda.

Sincerely,

Prof. Paulo Artaxo

Director, CEAS – Center for Sustainable Amazonia Studies



Elsa Ordway, PhD
Forest Ecosystems & Global Change Lab
Department of Ecology and Evolutionary Biology
Congo Basin Institute | Center for Tropical Research
UCLA

05 December 2024.

Support Letter for PANGEA (PAN Tropical Investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation)

We are writing to convey our enthusiastic support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, the PANGEA program will greatly enhance research activities in forest monitoring, climate change, and capacity building under the leadership of the Centre for International Forestry Research and the World Agroforestry Centre (CIFOR-ICRAF).

CIFOR-ICRAF is an international research organization focused on global issues, namely climate change, biodiversity, food, value chains, and equity. It is dedicated to producing research information to support decision-makers worldwide in improving well-being. Our scientists bring the latest research findings and analysis on forests, trees, and agroforestry to major global forums. CIFOR-ICRAF has offices in 26 countries and works on all six continents.

PANGEA's goals align closely with our ongoing efforts, addressing global challenges like deforestation and biodiversity loss, the climate crisis, inequity, unsustainable supply and value chains, and dysfunctional food systems. We are applicants for supporting PANGEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches in researching tropical forests, peatlands, and coastal ecosystems.

If PANGEA is selected, CIFOR-ICRAF can offer in-kind support through its extensive network and logistical structure in the three tropical basins. There is also the possibility to initiate resource mobilization from other sources to support joint activities with PANGEA, as it represents a project with significant potential impact.

As Chief Executive Officer at CIFOR-ICRAF, I fully support the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement will facilitate this valuable partnership, advancing our shared goals in climate mitigation, adaptation, and conservation, with a particular emphasis on forest ecosystems.

Sincerely,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Eliane Ubalijoro'.

Dr. Eliane Ubalijoro

CEO of CIFOR-ICRAF



Linde Center for Global Environmental Science
Division of Geological and Planetary Sciences

Mail Code 131-24
Pasadena, CA 91125
(626) 395-6143
tapio@caltech.edu
www.clima.caltech.edu

10 September 2024

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
Los Angeles, CA, 90095

Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway:

I am writing to express the Climate Modeling Alliance's (CliMA) strong interest in the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. We are excited by the potential of PANGEA to advance our understanding of tropical forest ecosystems and their response to climate and anthropogenic changes. The alignment between PANGEA's research objectives and CliMA's mission makes this an excellent opportunity for future collaboration and mutual benefit.

At CliMA, our core mission is to deliver actionable climate predictions to empower effective climate adaptation and mitigation planning. We are developing a next-generation Earth system model that leverages machine learning, data assimilation, and extensive ground and space-based observations. Our goal is to predict changes in critical climate phenomena such as droughts, heat waves, and extreme rainfall events, with a focus on providing accurate, localized information.

PANGEA's focus on assessing the impact of global changes on tropical biogeochemical cycles and forest structure aligns with our research interests. We see tremendous potential in integrating high-resolution simulations from our Earth system model with on-the-ground and satellite data collected by PANGEA. This synergy can enable us to quantify uncertainties, offer novel insights into ecosystem responses, and contribute to addressing PANGEA's Science Question 1 regarding the similarities and differences in tropical forest biogeochemistry and structure.

Furthermore, the Earth observations gathered by PANGEA would be invaluable for refining CliMA's models and improving our predictions of ecosystems under future climate scenarios. The opportunity to access data from underexplored tropical forest regions would be particularly beneficial in enhancing our understanding of and capabilities to model these critical ecosystems.

We are also enthusiastic about PANGEA's commitment to open science and capacity building in the Global South. CliMA shares these values and is dedicated to making our scalable, open-source modeling platform accessible to a wide range of stakeholders through cloud resources. We believe that fostering collaboration and providing user-friendly tools for real-world decision-making are essential for addressing the complex challenges posed by climate change.

We eagerly anticipate the outcomes of the PANGEA Scoping Campaign and are optimistic about the potential for future collaboration. Should the PANGEA program secure NASA funding, we would be keen to explore opportunities to leverage CliMA's modeling capabilities in support of PANGEA's research objectives.

Thank you for considering our perspective. We look forward to staying engaged with the PANGEA initiative and contributing to its success in the future.

Sincerely,



Tapio Schneider
Theodore Y. Wu Professor of Environmental Science and Engineering
Principal Investigator, CliMA



Dr. Renato K. Braghieri
Research Scientist
Land Modeling Lead, CliMA

Congo Basin Science Initiative

c/o Congo Basin Water Resources Research Center
Department of Natural Resources Management
University of Kinshasa
Bâtiment FOGRN BC
Kinshasa
Democratic Republic of Congo

Email: info@congobasinscience.net



Congo Basin Science Initiative

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

26 November 2024

Dear Dr. Ordway,

RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

This letter attests our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities, via new data, methods, and techniques. The field campaigns will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. We co-chair the Congo Basin Science Initiative, which is closely aligned to PANGEA's main goals.

The Congo Basin Science Initiative (CBSI) is a large network of scientists, led by those from the region, to understand the Congo Basin as a changing regional entity, train a new generation of scientists from the region, and deliver this new data and knowledge to policy makers and civil society. Our main source of funds is from the UK government, to implement the CBSI Science and Capacity Plan, which includes distributed data collection across the region including climate, hydrology, vegetation and biogeochemistry, biodiversity, land cover and land use change, and socio-ecological data, to understand the full climate-water-forest-society system.

CBSI and PANGEA are inherently synergistic. For example, both PANGEA and CBSI are working at the large-scale, but with complementary methods, PANGEA focused more on airborne and spaceborne sensors and CBSI more ground-based and process-oriented data collection. Likewise, the ultimate aim of both endeavours is integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests.

Should PANGEA be selected, CBSI will seek opportunities for close collaboration with PANGEA. For instance, we will look for funding opportunities that are related to joint PANGEA and CBSI goals.

We will also look to maximize the exposure of our cohort of PhD and MSc students from the region to NASA and wider US science.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. As co-chairs of CBSI, we confirm our full support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between CBSI and PANGEA in the hopefully near future.

Sincerely,



Prof. Raphael Tshimanga
Co-chair, Congo Basin Science Initiative
Professor
University of Kinshasa, DRC



Professor Simon L Lewis FRS
Co-chair, Congo Basin Science Initiative
Chair of Global Change Science
University of Leeds, UK

Rik Van de Walle
Rector

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095

E rector@ugent.be
T +32 9 264 30 01

Campus Ufo, Rectorate
Sint-Pietersnieuwstraat 25
BE-9000 Ghent
Belgium

www.ugent.be

| DATE | PAGE | OUR REFERENCE |
|------------------|------|-------------------|
| 06 November 2024 | 1/3 | 2024/RVDW/ddb/068 |

Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express strong support of Ghent University for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data and fundamental research gaps related to the understanding and scaling of CO₂ (and other greenhouse gasses) and water fluxes in tropical forests, especially in Central Africa. PANGEA will support and reinforce the data collection, modelling and more generally many of the research activities led and carried out at Ghent University by multiple colleagues, including Prof. P. Boeckx, Prof. M. Bauters, Prof. H. Verbeeck, Prof. W. Hubau and Dr. F. Meunier.

Furthermore, Ghent University is interested to become a member of the science planning team of PANGEA. Ghent University is an internationally renowned public higher education institution of around 50,000 students and 16,000 employees. Our 11 faculties offer over 200 programs and conduct in-depth research in a wide range of scientific fields. Our credo is "Dare to Think", which encourages everyone to question conventional views and dare to take a nuanced position. We are a pluralistic university open to all, whatever their ideological, political, cultural or social background. Ghent University is also the first European university to start a campus on Incheon Global Campus in Korea. We are a Dutch-speaking university, but English is widely spoken by students and staff, and international students can choose from a wide variety of courses and programs in English.

| DATE | PAGE | OUR REFERENCE |
|------------------|------|-------------------|
| 06 November 2024 | 2/3 | 2024/RVDW/ddb/068 |

We see several aligned efforts and complementarities between Ghent University's activities in Central Africa and PANGEA, especially in relation to our unique activities in Yangambi, DR Congo, since 2010. In Yangambi we operate since 2020 the first eddy covariance flux tower (CongoFlux) for the Congo basin. CongoFlux follows ICOS protocols and is an associated tower to the ICOS network. We also coordinate a ground-based network of permanent 1 ha inventory plots as well as ForestGeo (1), GEM (4) and regrowth plots (5 chronosequences), ecosystem monitoring, terrestrial and airborne laser scanning, in Yangambi and in multiple other locations in DR Congo and other rainforest countries in Central Africa. We also have specific experience with dynamic vegetation models applied to the tropics, in particular to Central Africa. In addition, we have added tropospheric ozone and black carbon analyzers, FTIR for total column measurements of CO₂, CH₄ and CO as well as solar induced fluorescence (SIF) sensors.

We and some organizations to which our colleagues are related (e.g., CongoFlux, the Congo Biogeochemical Observatory, the Congo Basin center of Excellence, and the center of excellence for the African Great Lakes' Natural Capital) look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observations and multidisciplinary data collection and methods to conduct research. We are particularly excited to strengthen via PANGEA the remote sensing component (e.g., LIDAR and hyperspectral data) at the CongoFlux site to allow scaling our observations. Hence, we look forward to the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen local capacity (both technicians and researchers) for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We have already pursued various sensitizing and capacity building initiatives with local communities, the National Institute for Agronomic Study and Research (INERA) in Yangambi, the Universities of Kisangani, Lubumbashi and Bukavu and Mountains of the Moon, as well as various national parks (Kahuzi-Biéga, Salonga, Rwenzori). Ghent University has been working in Yangambi for 15 years and can facilitate PANGEA's implementation by helping with e.g., logistics for new data collection, the synthesis of ancillary data and the modeling of the ecosystems. We have a team of ca. 25 PhDs, 4 local professors and 5 technical staff in the Kisangani-Yangambi landscape.

Should PANGEA be funded, Ghent University can provide in-kind support in the form of data, local networks, logistics, and many other types of support that can be useful. Our team will also consider developing research proposals to seek funding to support participation in PANGEA-related studies.

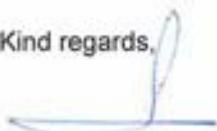
In conclusion, our institution is one of the few international organizations actively collecting ground-based data in central Africa. We excel at collecting and analyzing different types of ground-based data, including eddy covariance data, plot inventories, wood and leaf trait data, at

| DATE | PAGE | OUR REFERENCE |
|------------------|------|-------------------|
| 06 November 2024 | 3/3 | 2024/RVDW/ddb/068 |

strengthening capacity of local universities and government officials, and at engaging with local population via various sensitizing activities. We seek to further strengthen our capacities to link vegetation models, ground based, eddy covariance and remote sensing data to improve our understanding of pantropical carbon accounting and ecosystem functioning.

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As Rector of Ghent University, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue these common interest and efforts.

Kind regards,



Rik Van de Walle
Rector



Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

7 November 2024

Dear Dr. Ordway,

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

I am writing to express strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of and Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will fill critical data, methodological, and training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon cycle dynamics in tropical peatlands and their interactions more broadly with biogeochemical cycles, biodiversity, climate change and disturbance dynamics, human activities. PANGEA will also support and reinforce future mapping activities particularly combining ground and Earth Observation data analysis led and carried out by CongoPeat.

CongoPeat is a collaboration between five UK Universities, Marien Ngouabi University in Republic of the Congo and the universities of Kisangani and Kinshasa in the Democratic Republic of the Congo, first established in 2012. Our goal is to understand the past, present and future function of the central Congo peatlands, and supply new knowledge to policy makers and civil society to enhance their long-term protection. To achieve our objectives, we have previously conducted diverse fieldwork across the 16.7 million hectare peatland region, published landmark studies (Dargie et al. 2017, Nature; Garcin et al. 2023 Nature; Hawthorne et al. Quaternary Science Reviews, Young et al. 2024 Global Change Biology), and assisted the establishment of a new law in Republic of the Congo protecting the peatlands from industrial use.

We currently have long-term activities in Ekolongouma (Republic of the Congo), Ossendo and Ossango (Republic of the Congo) and Lokolama (DRC) where we are installing a flux tower and other instrumentation with partners at University of Kisangani, University of Ghent, and University of Kinshasa. We are training a new generation of students in diverse aspects of peatland and wetland science, including 12 current students from Republic of Congo and DRC.

We see several aligned efforts and general aims between CongoPeat and PANGEA, in particular in combining ground data and Earth Observation data to produce better maps of the peatlands; understanding the carbon balance of the peatlands; understanding methane fluxes from the peatlands, and modelling how these might change in the future.

We look forward to working together with PANGEA and its efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly

excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics on peatland and wetland research to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Should PANGEA be funded, CongoPeat will try to align our research activities and assist PANGEA to understand how we can gain additional scientific insights from this. There will be no in-kind benefits from the Republic of Congo and DRC Universities or staff, as we do not have spare capacity or resources. The UK universities may provide in kind support depending on the details of the research programs to be determined, or we will consider developing research proposals where the Republic of Congo and DRC partners co-lead collaborations for win-win research in the Global South and Global North.

We believe that PANGEA is a very important project with the potential for high impact. As founder and Co-lead of CongoPeat, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort to understand the world's largest tropical peatland complex, and protect its 29 billion tonnes of stored carbon and world's highest densities of lowlands gorillas and forests elephants for the long-term.

Yours sincerely

S. L.

Professor Simon L. Lewis FRS
Chair in Global Change Science
School of Geography
University of Leeds
Leeds. LS2 9JT. UK.
Tel: +44 (0)113 343 3337
Email: s.l.lewis@leeds.ac.uk



November 29, 2024

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Subject: Letter of Support for the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing in support of the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If selected, PANGEA will address important knowledge gaps regarding the role of structurally and functionally diverse tropical moist forests on carbon, energy, water, and nutrient cycles. The proposed field campaigns will advance our knowledge on the risks of different tropical forest regions undergoing critical, potentially irreversible, transitions due to intensification of climate extremes and expansion of deforestation and forest degradation.

PANGEA's main objectives and vision are closely aligned to the modeling and model-data integration activities conducted by the Ecosystem Demography Model (ED2) team. The ED2 model is a process-based land-surface model that accounts for the dynamic, heterogeneous nature of forest structure and composition, and the resulting impacts of this heterogeneity on ecosystem function. ED2 has been used in multiple studies to answer scientific questions relating to the role of diverse forests in the Earth System, at scales ranging from a single site to entire continents. ED2 can provide mechanistic understanding and quantification of the role of tropical forest functional diversity on increasing the resilience of tropical forests to global change, which is one of the key PANGEA's overarching questions. Importantly, with respect to PANGEA's goals, ED2 has been extensively applied to: (i) study the dynamics of terrestrial carbon, water and energy cycles in tropical regions; (ii) determine and quantify the impacts of using new forms of terrestrial remote sensing observations – including, lidar and radar measurements of forest structure, imaging spectrometry-based measurements of forest composition, and microwave measurements of canopy and soil moisture – to constrain predictions of long-term, large-scale terrestrial ecosystem dynamics; and (iii) bench-marking predictions of terrestrial ecosystem dynamics, including several assessments in tropical regions.

The development and application of the ED2 modelling framework has been supported by multiple United States funding agencies over the past two decades. While NASA has been the primary supporting agency, the National Science Foundation and the Department of Energy have also provided support. Should PANGEA be selected for funding, the ED2 modeling group will seek out opportunities to directly engage with PANGEA activities, including submitting

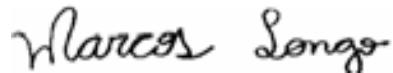
proposals to funding opportunities from the above US agencies that are related to PANGEA's overarching goals. We will also seek opportunities for contributing to capacity building and training of students on land-surface terrestrial ecosystem modeling, both within the US and in the tropics.

PANGEA is a timely and critically important project that will advance our current understanding of the resilience of tropical forests to on-going global environmental change. We enthusiastically support the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and look forward to exploring opportunities for collaboration between ED2 and PANGEA.

Sincerely,
The ED2 model development team



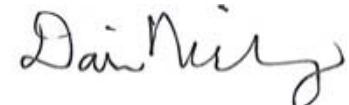
Paul R. Moorcroft
Harvard University
Professor of Organismic and Evolutionary Biology
Faculty Affiliate, Environmental Science and Engineering Program, Harvard University
Cambridge, MA 02138



Marcos Longo
Research Scientist
Lawrence Berkeley National Laboratory
Climate and Ecosystem Sciences Division
Berkeley, CA 94720



Ryan Knox
Ecosystem Modeler
Lawrence Berkeley National Laboratory
Climate and Ecosystem Sciences Division
Berkeley, CA 94720



David Medvigy
Associate Professor
University of Notre Dame

Department of Biological Sciences
Notre Dame, IN 46556



Michael C. Dietze
Professor
Boston University
Department of Earth & Environment
Boston, MA 02215



Naomi M. Levine
Professor
University of Southern California
College of Letters, Arts and Sciences
Los Angeles, CA 90089



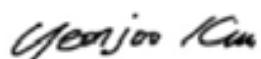
Abigail Swann
Professor
University of Washington
Department of Atmospheric and Climate Science
Seattle, WA 98195



Xiangtao Xu
Assistant Professor
Cornell University
Dept. of Ecology and Evolutionary Biology
Ithaca, NY 14853



Hans Verbeeck
Associate Professor
Ghent University
Department of Environment
B-9000 Gent, Belgium



Yeonjoo Kim
Professor
Department of Civil and Environmental Engineering
Yonsei University
Seoul, Korea.



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Ministério da Agricultura e Pecuária
Embrapa Acre
Rodovia BR-364, km 14, Caixa Postal 321
CEP 69900-97 - Rio Branco-AC
Telefone: (68) 3212-3200
www.embrapa.br

Carta nº 109/2024-CPAF-AC/CHGE

Rio Branco, 04 de dezembro de 2024.

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Assunto: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

This letter attests our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance with data, methods, applications, training gaps/needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon fluxes in tropical forests and/or their interactions with climate change and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are very aligned with similar activities conducted by Embrapa Acre/C-arouNd in Western Brazilian Amazon.

Refining Soil Conservation and Regenerative Practices to Enhance Carbon Sequestration and Reduce Greenhouse Gas Emissions - C-arouNd is a EJP that has been supported by Embrapa and international institutions since 2023 (<https://ejpsoil.eu/soil-research/second-external-call-international-call/c-around>). C-arouNd's goals include to investigate how short and long-term agricultural management practices affect SOM persistence in the soil profile and contribute to inclusion of the effects in national inventories to inform policy to reduce net greenhouse gas emissions and mitigate global change. We are currently investigating this persistence in tropical soil of Acre, Western of Brazilian Amazon at Rio Branco and Mâncio Lima, a regional scale.

Refining Soil Conservation and Regenerative Practices to Enhance Carbon Sequestration and Reduce Greenhouse Gas Emissions and PANGEA are inherently synergistic. For example, both PANGEA and C-arouNd are interesting in tropical areas. Likewise, C-arouNd is producing field data that can be used to integrate observations across multiple scales with models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests and also agroecosystems, which complements PANGEA's overall objectives.

Should PANGEA be selected, the C-arouNd group will seek opportunities for close collaboration with PANGEA. For instance, We will look for funding opportunities that are related to PANGEA's goals.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. We confirm our intention to support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between Refining Soil Conservation and Regenerative Practices to Enhance Carbon Sequestration and Reduce Greenhouse Gas Emissions and PANGEA.

Sincerely,

Dr. BRUNO PENA CARVALHO
Chefe-Geral da Embrapa Acre



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Pena Carvalho, Chefe-Geral**, em 04/12/2024, às 15:57, conforme art. 6º, parágrafo 1º do Decreto 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.sede.embrapa.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **11489040** e o código CRC **AB5C82E6**.

Colombo, December 2nd, 2024.

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

**Subject: Letter of Support for
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance on data, training gaps/needs related to the greenhouse gases measurement in tropical forests, climate change and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are very aligned with to samples collection and greenhouse gases (CH₄ and CO₂) analysis, using chromatographs activities conducted by Embrapa Florestas.

I am interested in exchanging experience and learning about modeling with your team, also I can see future connections with my projects with alternative biomasses for energy, that can mitigate deforestation. Also, in a Project to produce gold bioextractor produced with leaves from an Amazon native tree that can be used also for mining forest recuperation areas. These projects are related with PANGEA, once it can provide regional changes that that can have global impacts on carbon cycle dynamics and biodiversity loss.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. I confirm my utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for.

Sincerely,

 Documento assinado digitalmente
MARINA MOURA MORAES
Data: 04/12/2024 13:51:40-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Marina Moura Morales
Embrapa Florestas
Researcher Sustainable systems
marina.morales@embrapa.br
+55 41 3675 5705 / +55 41 992087182

MARCELO FRANCIA
ARCO
VERDE:70842817972
Assinado de forma digital
por MARCELO FRANCIA
ARCO VERDE:70842817972
Dados: 2024.12.03 16:07:52
-0300

Marcelo Francia Arco-Verde
Embrapa Florestas
Main head
cnpf.chgeral@embrapa.br
+55 41 3675 5610



Subject: Esri Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly advance the application of existing and emerging geospatial technologies developed by Esri towards both social and environmental outcomes. PANGEA's focus on advancing carbon, biodiversity, and agricultural remote-sensing capabilities in the tropics perfectly aligns with Esri's demonstrated commitment to sustainable development initiatives and the conservation of biodiversity.

The Environmental Systems Research Institute, Esri Inc. is a global leader in Geographic Information Systems committed to advancing the understanding of our world through geographic technologies. Esri serves over 650K organizations worldwide who leverage our technology across a wide variety of industries. Our mission is to develop best of class technology, serve the communities using these tools and advance greater efficiencies, understanding and positive impacts for society and the environment.

Esri's primary technology framework, ArcGIS, provides considerable imagery and remote sensing management and analysis capabilities increasingly including emerging hyperspectral capabilities. A close partnership with PANGEA, if selected, would provide Esri an opportunity to exercise these existing and emerging capabilities for positive environmental and social impact. Esri provides complimentary and low-cost access to its technology for Education, Conservation, Humanitarian, and Disaster Response initiatives through formal programs serving tens of thousands of organizations globally. Alignment with PANGEA presents an opportunity for demonstrating the potential of emerging technologies and data sources to communities who can substantially benefit from a new class of geospatial information products and decision support solutions.

We are eager to work with PANGEA to practically apply and improve ArcGIS to further advance Earth observation capabilities. We strongly endorse PANGEA's collaborative and multidisciplinary approach to understanding tropical forest, peatland, and wetland responses to global environmental change to support the development of innovative and effective solutions.

If PANGEA is selected, ESRI can provide in-kind support through the access of Esri technology for key stakeholders including nonprofits, academic institutions and Local and Indigenous



Communities. Our team is also prepared to explore funding opportunities to formally participate in PANGEA-related research and applications activities through support from Esri Professional Services and our global network of partner organizations.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As the Director of Conservation Solutions at ESRI, I offer my full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our impact towards sustainable development, climate and biodiversity conservation goals.

David Gadsden

A handwritten signature in black ink, appearing to read "David Gadsden".

Director, Conservation Solutions
Esri Inc.
380 New York Street
Redlands, California



Dr. Elsa Ordway
 Department of Ecology and Evolutionary Biology
 UCLA

4 December 2024

Re: PANGEA Application

Dear Dr. Ordway and the PANGEA Team,

We are writing in support of your project “PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)” and to express our intent to collaborate with you on the project. We established and coordinate the FLUXNET-CH₄ network and we are currently establishing a network of new methane flux towers across the Amazon and into Africa, in collaboration with researchers in these regions. This includes eddy flux measurements in Brazil, Peru, French Guiana, and Botswana, as well as synthesis of data from flux towers across the South America, Africa and Southeast Asia. The tropics are a large and growing source of methane emissions, but measurements of these fluxes remain extremely limited. PANGEA’s proposed work will fill this gap by providing new measurements locations and a platform to scale these findings with remote sensing.

We would welcome the chance to collaborate with you on PANGEA. We see many synergies between our efforts and PANGEA’s proposed work. For example, one of our major goals is synthesis of existing *in situ* methane flux data from tropical ecosystems. This will complement PANGEA’s airborne campaigns and provide a valuable foundation to target new field measurements. Additionally, we have developed virtual training materials on methane flux data processing to improve data quality from tropical sites. A collaboration with PANGEA would offer a platform to disseminate these resources more widely. In summary, if PANGEA is selected for funding, we see many opportunities to align our research and training efforts to improve our understanding of tropical methane emissions.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Rob Jackson".

Robert B. Jackson
 Douglas Provostial Professor
 Department of Earth System Science
 Stanford University
 Stanford, CA 94305
 (650) 497-5841 (Ph)
 rob.jackson@stanford.edu

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Alison Hoyt".

Alison M. Hoyt
 Assistant Professor
 Department of Earth System Science
 Stanford University
 Stanford, CA 94305
 (650) 283-9862
 ahoyt@stanford.edu



Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, IT

www.fao.org

Rome, Italy 24 September 2024

Dr Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of biogeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr Ordway,

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of biogeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, training gaps and needs related to the measurement of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGEA will also support and reinforce several activities led and carried out by the Climate Change, Biodiversity and Environment Office of the United Nation Food and Agriculture Organization (FAO).

We see several aligned efforts and general aims between FAO and PANGEA, in particular, improving our understanding of the tropical forest biomes and all the land use change processes that are occurring in these regions. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Should PANGEA be funded, FAO can provide in-kind support in the form of data exchange, cooperation and direct/indirect participation to many projects occurring in the tropical regions. Our team will also consider supporting participation in PANGEA-related studies.

While our organization excels at strength (e.g. community engagement, collecting and analysing ground-based data, strengthening capacity of local government officials, etc.), we seek to engage in research activities such as, "leveraging satellite imagery to improve carbon cycle assessment".

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As leader of the Climate Action Support Team in the Office of Climate Change, Biodiversity and Environment (OCB), I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort.



Martial Bernoux
Senior Natural Resources Officer
Climate Action Support Team
Office of Climate Change, Biodiversity and Environment (OCB)
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)
Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy



Forest Global Earth Observatory

Smithsonian Tropical Research Institute

6 December 2024

To: Dr. Elsa Orway
PANGEA Lead, Forest Ecosystems & Global Change Lab
Department of Ecology and Evolutionary Biology
Congo Basin Institute | Center for Tropical Research
UCLA

RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

I am pleased to provide my strong support for your NASA proposal entitled "*PAN-tropical bioGeochemistry Airborne Experiment in Africa and the Americas (PANGEA)*." This is an extremely important initiative that will lead to a huge leap in understanding of how tropical forests are and will respond to the combined effects of climate and land-use change.

As Director of the Forest Global Earth Observatory (ForestGEO) at the Smithsonian Institution, I am excited to contribute to this research effort through ForestGEO activities across the tropics. Leveraging the long-term site-based monitoring of tropical forests by ForestGEO partners over the past 40 years, will advance the goals of PANGEA and will be hugely beneficial to ForestGEO's goals of tropical forest science and capacity sharing and strengthening.

Please feel free to contact me if you require any further information.

Yours sincerely,

Stuart J. Davies
Frank H. Levinson Chair in Global Forest Science
Director, Forest Global Earth Observatory (ForestGEO)
Smithsonian Institution
www.forestgeo.si.edu
daviess@si.edu

School of Geography
University of Leeds
Leeds LS2 9JT
U.K.



+44 (0) 113 34 36832 (direct)
Email: o.phillips@leeds.ac.uk



Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

21st November 2024

Dear Dr. Ordway,

I write to express my enthusiastic support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly enhance the understanding of Earth's most precious ecosystems. It will also help support the work of many tropical partners of ForestPlots.net, connecting them better to the remote-sensing community.

ForestPlots.net is a global collaboration of many networks and almost 3,000 scientists engaged in measuring, monitoring and analysing the world's tropical forests. Our primary aims are to connect people measuring forests on the ground, to fund fieldwork in tropical countries, and to support our tropical partners so they can manage their data effectively and engage equitably in global science.

Several of PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at ForestPlots.net, perhaps especially in central Africa where we have received new funding recently from the Central African Forest Initiative (CAFI) to support AfriTRON partners in their long-term forest measurements. We are eager to support PANGEA's collaboration with the forest plot community to advance equitable collaboration, integrate of field measurements and knowledge with Earth observation, and develop a multidisciplinary approach to research in tropical forests, peatlands, and wetlands.

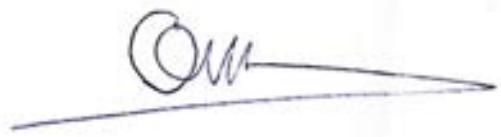
ForestPlots.net partner scientists are interested in diverse themes, such as tree mortality and its drivers, pan-tropical biodiversity and ecosystem function patterns and processes, and forest resilience to climate change. Our contributing networks are grounded in local partnerships, and especially active in Amazonia and tropical Africa. These partnerships and the deep knowledge of tropical forest ecosystems embedded in the ForestPlots.net community will facilitate PANGEA's objectives as this

expertise and ForestPlots.net's longstanding regional experience will provide strong local support for PANGEA's implementation across the tropics.

If PANGEA is selected, we are interested to explore funding opportunities so our partners can directly participate in PANGEA-related research and applications activities. We see opportunities in PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities in the tropics to further our goals, connecting our partners' work to help them collaborate with this community, and generating new sources of funding to support the vital fieldwork which underpins the calibration and validation of remote-sensors and their products.

I strongly believe that PANGEA represents a project with high potential impact. As Coordinator of the global ForestPlots.net initiative and the RAINFOR network in Amazonia, and Chair in Tropical Ecology at the University of Leeds, I therefore offer my full support for the PANGEA campaign. I hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared goals on climate mitigation and adaptation goals and globally-equitable science, with a particular emphasis on resilient forests and locally led solutions.

Yours sincerely

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Oliver Phillips", is written over a blue horizontal line.

Professor Oliver Phillips
Chair in Tropical Ecology
University of Leeds
School of Geography
Leeds, UK
(44) 113-343-6832
www.rainfor.org
www.ForestPlots.net
o.phillips@leeds.ac.uk



Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

**Subject: Letter of Support for
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, training gaps/needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGEA will also support and reinforce Gabonese national forest characterization and monitoring activities already led and carried out by AGEOS.

AGEOS is a government agency that was established in 2010 in Gabon (<http://ageos.ga/>). Our goal is to involve in the implementation of the Government's policy on the acquisition, analysis and availability of data from space observation of the national land for the sustainable management of the environment, natural resources, land use, regional planning, research and innovation. To achieve our objectives, we develop a national strategy for space observation activities ; manage the space infrastructure ; ensure the monitoring and evaluation of the implementation of public policies (roads, housing, energy, natural resources, etc.) ; provide data related to climate change and promote training, research and capacity building in earth observation tools.

We see several aligned efforts and general aims between AGEOS and PANGEA, in particular in biogeochemical cycles and carbon dynamics, ecosystem structure, function and biodiversity and climate feedbacks and interactions.

We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

While our organization/institution excels at analyzing remote sensing data and collecting ground-based data, we seek to engage in leveraging satellite imagery (data), data collect method and capacity building (advanced level) planned in PANGEA framework to improve carbon accounting.

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As [General Director of AGEOS, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common interest/activity/effort.



Aboubakar MAMBIMBA NDIOUNGUI
General Director
AGEOS
NKOK Special Economic Zone (ZES) - Plot R27- PK27
Gabon



2 December 2024

To: Dr. Elsa Orway
PANGEA Lead
Forest Ecosystems & Global Change Lab
Department of Ecology and Evolutionary Biology
Congo Basin Institute | Center for Tropical Research
UCLA

RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our enthusiastic support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly advance understanding of the role of tropical forests in the earth system. It will also benefit and be synergistic with the recently established GEO-TREES initiative.

GEO-TREES is a ground-based reference system for the calibration and validation of earth observation satellite estimates of forest carbon. GEO-TREES is working with hundreds of partners across the world's forests to establish a representative network of permanent reference sites. This involves ground plots, terrestrial laser scanning, and airborne laser scanning at each site, and is underpinned by significant investments in training and capacity sharing. Our initial goal is to establish 100 core reference sites globally, with at least 60 sites in tropical forests.

Several of PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at GEO-TREES, particularly in understanding current and future changes in tropical forest dynamics and functioning. We are eager to support PANGEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches in research in tropical forests, peatlands, and wetlands that span intact to disturbed forests. We see a particular opportunity for PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities in the tropics to further GEO-TREES goals through the incorporation of biodiversity monitoring in tropical forests.

If PANGEA is selected, GEO-TREES will endeavor to support PANGEA research and training initiatives at sites across the tropics. We would also welcome the opportunity to explore funding opportunities to participate in PANGEA-related research and applications activities. The longstanding experience of the GEO-TREES leadership team and partner sites and networks across the tropics will be of strategic importance to PANGEA's objectives.

On behalf of the GEO-TREES Executive Board, we offer our full support to the PANGEA campaign. We believe PANGEA represents a project with high potential impact, and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared climate mitigation and adaptation goals.

Yours sincerely,



Stuart J. Davies
Frank H. Levinson Chair in Global Forest Science
Director, Forest Global Earth Observatory (ForestGEO)
Smithsonian Institution
www.forestgeo.si.edu



Jérôme Chave, CNRS
UMR5300 Centre de Recherche sur la Biodiversité et l'Environnement,
CNRS, INPT, IRD, Université de Toulouse, France
<https://jeromechave.github.io/>



December 4, 2024

Re: PANGEA letter of support

To whom it may concern:

I am writing in support of the PANGEA research campaign and its goals of discovering the impacts of climate and land-use change on the world's humid tropical forests, focusing on the Americas and Africa. Our GLAD (Global Land Analysis and Discovery - glad.umd.edu) laboratory at the University of Maryland generates the annual global forest loss maps that are the core data set of the Global Forest Watch (globalforestwatch.org) program, and much of our work is focused on humid tropical forests. By definition, primary humid tropical forests are a finite resource. Our data show an increasing rate of loss for this invaluable, and non-renewable, environmental asset. The outcomes of deforestation are well documented, including carbon emissions, biodiversity loss, and local and global downstream climate impacts. Change in humid tropical forests used to be predominantly mechanical extraction/clearing. Increasingly, we see fires consuming rainforests. Whether accidental or intentional, practically all rainforest fires are human set and track with climate anomalies. What is clear is that land use and climate change have made the rainforests more likely to burn, and we are in critical need of understanding and mitigating this dynamic. The list of interventions is long, but must be informed by science. Without such action, per the concept of the tipping point, humid tropical climate systems may change states and lead to the conversion of rainforests without any direct human action.

All of this is to say that PANGEA fits the need and call for action. The proposed field campaign will help us understand the differences and commonalities between rainforests, building a data-driven framework that advances our monitoring, modeling, and possible mitigation of the effects of large-scale climate and land use change on rainforests.

Our work at GLAD is a ready input to this effort. While we work pan-tropically, we also partner with national governments, NGOs and universities. Our capacity building efforts advancing land remote sensing in the tropics, whether supporting national reporting with the forestry agencies of the Democratic Republic of the Congo and Republic of Congo, or in a scientific advisory capacity with MapBiomas in Brazil, constitute a host of in place partnerships ready to synergize with PANGEA.

Please, use this letter as evidence of my unqualified and enthusiastic support for PANGEA and its comprehensive and ambitious plan to advance our understanding of current rainforest dynamics in helping to mitigate future rainforest loss.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Matthew Hansen".

Matthew Hansen
mhansen@umd.edu
University of Maryland, Professor

November 20, 2024

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

On behalf of the Governors' Climate and Forests Task Force (GCF Task Force), we are writing to express our ongoing support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical needs in terms of data, capacity building, and improved understanding of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, and human activities. PANGEA also has significant potential to support and reinforce forest protection and land use governance efforts led and carried out by member jurisdictions of the GCF Task Force.

Established in 2009, the GCF Task Force is a unique coalition of 43 states and provinces from 11 countries working to establish and enhance jurisdiction-wide approaches to reducing deforestation and promoting sustainable land use. We work directly with the Governors, Secretaries, and civil servants in our member states and provinces as well as with their partners from civil society, Indigenous and local communities, academia, and the private sector to develop innovative, collaborative approaches to the problems of deforestation and climate change.

We see several aligned efforts and general aims between the GCF Task Force and PANGEA, particularly helping to ensure close collaboration between researchers, data scientists, and land use decisionmakers. To that end, we were pleased to co-sponsor a PANGEA scoping [workshop](#) in Lima, Peru in June 2024. Technical civil servants from GCF Task Force member jurisdictions in Bolivia, Colombia, Ecuador, and Peru, together with academic researchers from these same countries, convened to learn about PANGEA and to provide insight into how improved data, methods, and applications from this field campaign could support both scientific and forest governance advancements on the ground.

The GCF Task Force was an early advocate for the proposal to design the PANGEA scoping study (see attached support letter), and we look forward to continuing to support PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. Should PANGEA be funded, we are particularly excited at the prospect of increasing the engagement of diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices. We hope to leverage our network of policymakers, technical staff, and partners from across our 43 member states and provinces to use PANGEA products and participate in capacity building activities.

We believe this is an important project with the potential for high impact. We look forward to working with you and your team and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort together.

Sincerely,



William Boyd
Project Lead



Jason Gray
Project Director

Attachment: Support Letter for Scoping Studies



Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

**Subject: Letter of Support for
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter is to affirm my support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If the PANGEA field campaign is selected for funding, it will fill important knowledge gaps on how biodiverse tropical moist forests impact the energy, water and carbon cycling at local, regional, and global scales. It will also obtain calibration data for the new generation of satellite sensors at historically undersampled areas, and provide a unique opportunity to train and build research capacity in tropical regions. PANGEA will also be synergistic to Guyaflux activities led and carried out by INRAE in French Guiana.

Guyaflux (GF-Guy), located at the Paracou field station in French Guiana, is a long-term research program led by INRAE and funded by INRAE and various European contracts since 2003 (<https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyaflux-tower>). Guyaflux aims at analyzing the impact of environmental conditions, particularly climate change, on greenhouse gas fluxes between the tropical rainforest ecosystem and the atmosphere. The Guyaflux site has power (solar panels) and wooden houses that may facilitate collaborations with PANGEA. Participants of PANGEA will also have access to labs located at INRAE's research center at Kourou (45-min drive from Paracou field station).

There are multiple highly aligned goals between Guyaflux and PANGEA. For example, both projects seek to understand the impacts of climate variability and climate extremes on the resilience of tropical moist forests. We also share the same vision on the need of integrative approaches that combine field observations, remote sensing and models to better understand how tropical forests are responding to climate change.

Should PANGEA be selected, the Guyaflux team will consider applying for funding opportunities that are synergistic with PANGEA, to advance direct collaboration with PANGEA and expand international partnerships.

PANGEA will be an extremely important project for filling critical knowledge gaps in highly biodiverse yet vulnerable tropical moist forests, and for building a long-lasting local research capacity in the tropics. As the PI and scientific head of the Guyaflux site, I express my support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will unlock several opportunities for a strong partnership with Guyaflux.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "D. Bonal".

Dr. BONAL Damien
Senior Scientist
INRAE
UMR SILVA, 54180 Champenoux, France



Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

**Subject: Letter of Support for
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter is to affirm my support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If the PANGEA field campaign is selected for funding, it will fill important knowledge gaps on how biodiverse tropical moist forests impact the energy, water and carbon cycling at local, regional, and global scales. It will also obtain calibration data for the new generation of satellite sensors at historically undersampled areas, and provide a unique opportunity to train and build research capacity in tropical regions. PANGEA will also be synergistic to Guyafor activities led and carried out by Cirad in French Guyana.

Guyafor network (GF-Guy) is a long-time survey program of experimental forest plots led by Cirad and funded by Cirad and various French and European fundings since 1984 (<https://paracou.cirad.fr/>). Guyafor network aims at assessing the response of guyanese forests dynamics, structure and functioning to climatic variability and logging practices. We currently integrate regular forest inventories, botanical identification, environmental data and remote sensing data at the scale of experimental stations across the territory and at regional scale in french guyana. Within the Guyafor network, Paracou station has power and wooden houses that may facilitate collaborations with PANGEA, and the UMR EcoFoG labs are accessible in Kourou (45-min drive from the Paracou station).

There are multiple highly aligned goals between Guyafor and PANGEA. For example, both

projects seek to understand the impacts of climate variability and climate extremes on the resilience of tropical moist forests. We also share the same vision on the need of integrative approaches that combine field observations, remote sensing and models to better understand how tropical forests are responding to climate change.

Should PANGEA be selected, the Guyafor team will consider applying for funding opportunities that are synergistic with PANGEA, to advance direct collaboration with PANGEA and expand international partnerships.

PANGEA will be an extremely important project for filling critical knowledge gaps in highly biodiverse yet vulnerable tropical moist forests, and for building a long-lasting local research capacity in the tropics. As the PI of Paracou station and among scientific coordinators of Guyafor network, I express my support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will unlock several opportunities for a strong partnership with Guyafor.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Mirabel".

Dr. MIRABEL Ariane
Researcher
Cirad
UMR EcoFoG, 97310 Kourou, France

To

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Dr. habil. Werner Leo Kutsch

Director General
Integrated Carbon Observation
System (ICOS ERIC)

Email: werner.kutsch@icos-ri.eu

Helsinki, 15 November 2024

Dear Dr. Ordway,

Subject: Letter of Support for the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data and methods gaps related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests. PANGEA will also support and reinforce international research, training, and data collation activities led and carried out by ICOS.

The Integrated Carbon Observation System (ICOS) is a distributed Research Infrastructure to generate high-precision data and integrate knowledge on the carbon cycle and greenhouse gas (GHG) budgets and of their perturbations. ICOS conducts long-term observations in three networks – atmosphere, ecosystems, and oceans – as required to understand the present state and extrapolate to the future behaviour of the global carbon cycle and GHG fluxes. ICOS has an increasing role in scientific support of climate policy.

ICOS has a number of activities ongoing in Africa, in particular with one Ecosystem Associate station (Yangambi in the Democratic Republic of Congo) and the Atmospheric station in La Réunion, and in French Guiana with the Associated Ecosystem station GuyaFlux. In addition, ICOS coordinates an EU project that has the aim to design an environmental Research Infrastructure in Africa (<https://kadi-project.eu/>).

We see a number of aligned efforts and general aims between ICOS and PANGEA, in particular in advancing research that leverages satellite imagery to advance methods to scale fluxes, and to validate and calibrate remote sensing products using the data collected at the flux towers. The ICOS Ecosystem stations have long histories of data being used for Cal/Val and model benchmarking, and a set of standardized tower-based remote sensing data are being implemented in the ICOS network, including FAPAR, canopy thermal measurements and imaging, phenology cameras and spectral data. PANGEA would help to fill spatial gaps thanks to the extensive use of remote sensing data (including the European satellites) and help to build a consistent and robust link between local scale field measurements and large scale continental and global products.

The collaboration between ICOS and PANGEA will improve accessibility to high quality carbon cycle data and can develop common or coordinated training initiatives and material for the next generation of scientist, in particular on the scalability of in situ measurements using high quality remotely sensed data. The plan of PANGEA in extending training material and activities in Portuguese and French languages would make the training more effective and accessible in the target areas of Africa and South America.

Should PANGEA be funded, ICOS will be excited to coordinate activities, and support PANGEA through the ICOS stations in tropical regions, the ICOS Ecosystem Thematic Centre and the ICOS Head Office

and Carbon Portal. Among the activities, ICOS will continue to perform rigorous eddy covariance data processing and distribution services, including for possible new sites in Africa, and evaluate the extension of measurements and products as funding availability allows. ICOS will also consider developing research proposals to seek funding to support participation in PANGAEA-related scientific and training activities.

We recognize the mutual benefits in coordinating with PANGAEA and sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of tropical terrestrial ecosystems and better leverage Earth observation datasets to support our Research Infrastructure goals. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for the research and understanding in the carbon cycle, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As the Director General of ICOS, I express my utmost support on behalf of the PANGAEA campaign scoping team and hope that NASA's support of PANGAEA will enable us to pursue this common research interest.

Yours sincerely,



Dr. habil. Werner Leo Kutsch

**International mailing address**

IITA Ltd, Suite 32
5th floor, AMP House
Dingwall Road
Croydon
CR0 2LX

Headquarters

PMB 5320, Oyo Road, Idi-Oshe
Ibadan, Nigeria
Tel: +1 201 6338094
+234 700 800 4482
Fax: +44 (208) 711 3786 (via UK)

14 November 2024

Co-Director,
Centre for Tropical Research and Congo Basin Institute
Department of Ecology and Evolutionary Biology
410K Botany Building
University of California
Los Angeles, CA 90095.

Dear Dr. Ordway,

RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

I am writing to express the support of the International Institute of Tropical Agriculture (IITA) for the proposed National Aeronautics and Space Administration (NASA) Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, and training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of remote sensing data in tropical forest regions. This aligns well with IITA's mission to offer a leading research partnership that facilitates agricultural solutions to hunger, poverty, and natural resource degradation throughout sub-Saharan Africa.

IITA leads the One CGIAR's African continental agenda and operates in twenty-one (21) research stations in Africa covering sixteen (16) countries, including multiple stations in the Congo Basin covering Burundi, Cameroon, Central African Republic, Chad, Republic of Congo, DR Congo (DRC), Equatorial Guinea, Gabon, Rwanda, and São Tomé and Príncipe. IITA's operations focus on Research for Development (R4D) and Partnerships for Delivery (P4D), a structure designed to bridge the gap between research and its deployment in Africa. Through partnerships with governments, development partners, and communities, IITA deploys successful technologies and methods to sustainably advance food security in Africa.

As a leading organization focused on conducting research and deploying advances to address food insecurity, we anticipate partnering to use data and methodological improvements from PANGEA through an Earth Science to Action (ES2A) framework. Specifically, improved remote sensing data from the tropics could be leveraged as part of the One CGIAR Sustainable Farming program, a multi-institutional initiative on sustainable food production, with a focus on sub-Saharan Africa. Specifically, the PANGEA initiative aligns perfectly with IITA's programs on breeding for resilient crops under the genetic innovation research area, plant health, natural resource management and mixed crop agronomy under the resilient farming systems research area, as well as the climate adaptation under the system transformation research area. Methodological improvements from PANGEA offer opportunities to remotely track the impact of agronomy interventions on crop yields, significantly increasing our ability to measure the uptake and impact of new agronomic inputs and methods. We also anticipate using findings from PANGEA to advance climate-smart agriculture, and better understand the impacts of climate change on crop productivity.

**International mailing address**

IITA Ltd, Suite 32
5th floor, AMP House
Dingwall Road
Croydon
CR0 2LX

Headquarters

PMB 5320, Oyo Road, Idi-Oshe
Ibadan, Nigeria
Tel: +1 201 6338094
+234 700 800 4482
Fax: +44 (208) 711 3786 (via UK)

Remote sensing is a particularly powerful tool in a region like Central Africa, where the vast majority of farmers are smallholders, many of whom live in relatively remote areas. Improved remote sensing capabilities, and in particular improved resolution that allows remote research on parcels of less than 1 ha, offer significant promise to improve our ability to understand and improve food production in the region. Improved resolution on multiple scales is also needed to understand the interrelation between smallholder farms and forest loss and to reliably track land use changes at scale in the region.

PANGEA initiative is led by the University of California, Los Angeles (UCLA) with which IITA has established an initiative named Congo Basin Institute (CBI) that aims to integrate the dual goals of biodiversity and forest conservation while improving local community livelihoods. Since 2015, CBI has developed various initiatives aiming at connecting agricultural improvement activities with biodiversity and forest conservation to achieve more efficient traits that will maintain yield under heterogeneous environments. The PANGEA initiative will then be a unique opportunity for this partnership to further produce an impact on the needs to feed the growing population while conserving forest cover and biodiversity in the Congo Basin region that harbors the second-largest rainforest in the world, representing 30% of the global forest area, and that faces accelerated degradation due to multiple pressures among which poorly practised agriculture alone contributes up to 84% of the forest cover loss.

If selected, we look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage earth observation and multidisciplinary data and methods in ways that align with these IITA efforts. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for improved food security, climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Should PANGEA be funded, IITA expects to use the resulting data and methodologies to inform our research to sustainably improve food security in Africa and to monitor the deployment of those technologies. Our team also plans to develop research proposals to seek funding to apply PANGEA's data and methodologies to improve food security in Central Africa.

We believe this is an important project with the potential for high impact. As the Deputy Director General, Partnership for Delivery of IITA, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to collaboratively pursue these common interests.

Yours Sincerely,

Signed by:

Dr. Kenton Dashiell

4C88BD4F06234C8...

Dr. Kenton Dashiell
Deputy Director General Partnerships for Delivery

“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

Pucallpa, 10 de setiembre de 2024

CARTA No. 149-2024-MRA-PMRA

Señores

ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE AERONÁUTICA Y EL ESPACIO – NASA

Presente. -

ASUNTO: APOYO A LA INICIATIVA PANGEA

Por medio de la presente, me complace dirigirme a ustedes a fin de saludar la posibilidad de impulsar la iniciativa PANGEA por parte de la NASA, la misma que permitiría realizar una campaña de investigación de campo de largo a nivel de la Amazonía.

En el Perú, los gobiernos subnacionales de la Amazonía hemos conformado la Mancomunidad Regional Amazónica – MRA y pertenecemos a la plataforma de los Gobernadores por el Clima y los Bosques – GCF Task Force (por sus siglas en inglés) que agrupa a 43 gobiernos subnacionales a nivel global, incluyendo a los gobiernos subnacionales de Pastaza, Morona Santiago y Zamora Chinchipe de Ecuador; Caquetá en Colombia; Pando, Santa Cruz y Tarija de Bolivia; Maranhão, Amapá, Tocantins, Pará, Roraima, Mato Grosso, Amazonas, Rondonia y Acre de Brasil; y Amazonas, Huánuco, Loreto, Madre de Dios, Piura, San Martín y Ucayali del Perú.

Actualmente en mi calidad de Gobernador Regional de Ucayali en Perú, soy Presidente de la Mancomunidad Regional Amazónica del Perú, representando 7 gobiernos subnacionales peruanos y presido actualmente también la plataforma del GCF Task Force, representando a 43 gobiernos subnacionales, de los cuales 22 pertenecen a la Amazonía en 5 de los países amazónicos.

Los gobiernos subnacionales, especialmente los de la Amazonía somos conscientes de que los bosques tropicales están experimentando cambios climáticos dramáticos, se ha incrementado la pérdida de biodiversidad y hay cada vez mayor presión por cambios en el uso de la tierra, sin que contemos con las capacidades y la información necesaria para hacer frente a estos desafíos.

Los cambios en la dinámica del flujo de carbono, el ciclo del agua, los eventos climáticos extremos y las migraciones de las especies están generando cambios importantes que afectan la vida y la producción de alimentos, lo cual pone en riesgo la seguridad alimentaria de nuestras poblaciones, especialmente de pueblos indígenas que habitan nuestra Amazonía.

“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

La Amazonía es reconocida en el mundo entero por ser megadiversa y por ello altamente vulnerable al cambio climático y aunque los ecosistemas de bosques tropicales están mostrando evidencia de respuestas de adaptación frente al mismo, no conocemos a profundidad que esta sucediendo y cómo podríamos contribuir con este proceso de forma más eficiente y urgente.

Consideramos que la iniciativa PANGEA nos serviría para impulsar mejoras continuas en la ciencia de la teledetección, la recopilación de datos y la aplicación de esta ciencia para mejorar la gobernanza forestal, la planificación territorial, los esfuerzos de comando y control, la lucha contra incendios, combate a las economías ilegales y otras acciones críticas en el territorio.

Estamos comprometidos con la iniciativa PANGEA para mejorar la comprensión a través de sus tres pilares:

- *Utilizando la ciencia para avanzar en la comprensión de cómo las regiones de bosques tropicales responderán de manera diferente al cambio global.*
- *Desarrollando capacidades en nuestros científicos de las regiones amazónicas para que puedan liderar estos esfuerzos científicos.*
- *Actuando con mejores capacidades de teledetección satelital para mapear y monitorear el carbono, la biodiversidad y la agricultura.*

Esperamos que la NASA tenga a bien seleccionar la iniciativa PANGEA y esperamos poder contribuir desde nuestros gobiernos subnacionales en el trabajo de campo que pueda ser realizado, estamos seguros de que la recopilación de datos de sensores remotos aéreos, el uso de sensores remotos satelitales y modelos para comprender mejor la dinámica de los bosques tropicales contribuirán a una mejor gestión de los bosques brindándonos evidencia científica para tomar mejores decisiones de política pública.

Atentamente,



Manuel Gambini Rupay
Presidente de la Mancomunidad Regional Amazónica del Perú
Presidente del Grupo de Gobernadores por el Clima y los Bosques

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

15.11.2024

**Subject: Letter of Support for
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter indicates my support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). PANGEA will significantly advance the science and data to understand and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. Combined with land use change mapping initiatives such as the ones produced by the MapBiomas Network, this may be a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use.

I see a lot of potential for synergies with lots of positive feedback when MapBiomas and PANGEA spreads across Latina America, Congo Basin and Southeast Asia. It is especially important for ensuring local capacity across the board to generate timely, accurate and relevant information about the tropics.

I look forward to the collaboration and generation of lots of fruits!

Sincerely,


Tasso Azevedo
General Coordinator
MapBiomas Network



Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly enhance/advance/benefit several NASA Harvest-led initiatives including: agricultural climate risk assessments, environmental health research, agricultural insurance for sustainable farming transitions, and climate finance frameworks.

NASA Harvest is NASA's Global Food Security & Agriculture program, established in 2017, and led and implemented by the University of Maryland, College Park. Harvest is committed to advancing Earth observations for agricultural decision-making and food security. Our network of over 45 leaders in agriculture and Earth observation works across public, private, NGO, and humanitarian sectors. Our team pursues objectives that include improving crop yield forecasting, enhancing early warning systems for food security, and advancing satellite-based agricultural monitoring through active projects in Africa, Southeast Asia, and Latin America.

Several of PANGEA's objectives directly align with NASA Harvest's priorities, particularly in mapping and monitoring agricultural expansion and intensification in tropical forest regions, advancing methods to track carbon stocks and fluxes in agricultural-forest landscapes, improving crop type, yield, and condition monitoring capabilities using new satellite sensors, and supporting agricultural adaptation to climate change through enhanced monitoring.

NASA Harvest can provide valuable support through our ground validation data from agricultural monitoring sites, local logistics and community engagement through regional partners, technical expertise in agricultural remote sensing and machine learning, and access to our global network of food security stakeholders. The integration of PANGEA's forest measurements with agricultural observations will be transformative for understanding tropical land-use dynamics.

The integration of PANGEA's forest measurements with agricultural observations will be transformative for understanding tropical land-use dynamics. As NASA Harvest's Director, I enthusiastically support PANGEA and believe it will significantly advance our shared goals of sustainable agriculture and food security.





We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As Director at NASA Harvest, we offer our full support for the PANGEA campaign and hope that endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared food security and climate mitigation and adaptation goals.

Sincerely,

Inbal Becker-Reshef
NASA Harvest, Director
University of Maryland
2181 Lefrak Hall, College Park, MD 20742



www.nasaharvest.org



Professor Elsa Ordway
618 Charles E. Young Drive S.
Los Angeles, CA 90095

21^h November, 2024

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are pleased to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, the PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA has the potential to significantly advance our understanding of tropical forest resilience, climate impacts, and biodiversity conservation, with Gabon serving as a pivotal region, as led by the Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CENAREST).

Established in 1976, CENAREST is Gabon's national center for scientific and technological research, committed to fostering innovative research for sustainable resource management and poverty reduction. Gabon, known for its high carbon storage and low forest degradation within the Congo Basin, offers an exceptional environment for these efforts. CENAREST's work focuses on understanding the impacts of land use and climate change on biodiversity, ecosystem services, and the socio-economic aspects of conservation. CENAREST collaborates extensively on tropical ecology and global environmental change through active partnerships with regional and international organizations across the Congo Basin.

PANGEA's objectives align closely with CENAREST's mission, particularly in the integration of satellite data with ground and airborne measurements. These tools are critical for improving predictions of tropical forest responses to climate and land-use

changes, enabling the development of robust, science-based strategies for mitigation and adaptation. We are excited about PANGEA's emphasis on Earth observation technologies and its multidisciplinary approach to studying tropical forests, peatlands, and wetlands, which are essential for addressing complex ecological challenges.

CENAREST actively partners with key Gabonese institutions, such as the Agence Nationale des Parcs Nationaux (ANPN), the Agence d'Etude et d'Observation Spatiale (AGEOS), the National Climate Council (CNC), and the Gabonese Ministry of Water and Forests. These established partnerships, combined with our in-depth regional expertise, position CENAREST to provide robust local support for PANGEA's implementation in Gabon. If PANGEA is selected, CENAREST is prepared to offer in-kind support, including data sharing, assistance with local logistics, facilitation of research permits, and community engagement. Furthermore, we are committed to exploring funding opportunities to actively contribute to PANGEA's research and application activities.

We are confident that PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities will complement and enhance our own efforts, including improved carbon stock assessments, deeper understanding of land-use changes, and strengthened biodiversity conservation strategies.

As Commissaire General (Executive Director) of CENAREST and African Senior scientist on tropical and global ecology, I strongly believe that PANGEA represents an exceptional opportunity to tackle some of the most pressing global challenges. We are proud to offer our full support for this groundbreaking campaign and are optimistic that NASA's endorsement will help bring this valuable partnership to fruition, furthering our shared objectives of climate mitigation and biodiversity conservation.

Sincerely yours,





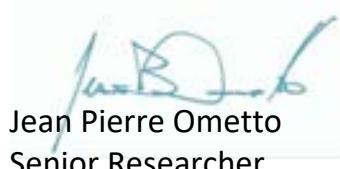
São José dos Campos, November 11, 2024

PANGEA letter of support

To whom it may concern:

The Strategic Projects Division of the National Institute for Space Research is pleased to support the PANGEA proposal. I foresee that the innovative approach in PANGEA will help to advance the understanding of the critical role that tropical forests play in the global climate, ecosystem services and relevance to local communities. Several projects developed by the Brazilian scientific community (e.g., LBA, ATTO, AMAZONFACE, ADAPTABRASIL, to name a few) are closely related to the PANGEA scientific agenda.

The team of scientists linked to the Strategic Project and the Impact, Adaptation and Vulnerability Divisions (where I also work) are eager to fully support PANGEA and are ready to help with the implementation plan, integrating our activities with its critical scientific agenda.


Jean Pierre Ometto
Senior Researcher
Head of the Strategic Project Division



Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly contribute to enhance relevant initiatives currently carried out by the National Observatory on Climate Change for Cameroon (ONACC).

ONACC is a State autonomous Scientific and Technical Institution created by a Presidential Decree and placed under the Technical supervisory authority of the Cameroon Ministry of Environment. ONACC has as main mission to monitor and assess the socioeconomic and environmental impacts of climate change and to propose prevention, mitigation and/or adaptation measures to fight the adverse effects and risks associated with these changes. To this end, it shall in particular:

- define relevant climate indicators for monitoring the environmental policy;
- conduct prospective studies to propose a vision on the evolution of climate in the short, medium and long terms;
- monitor the evolution of climate, provide weather and climate data/information to all sectors of human activity concerned and produce the annual climate report for Cameroon;
- initiate and promote studies on the identification of indicators, impacts and risks related to climate change;
- collect, analyze and make available to policy makers, private as well as various national and international organizations, reference information on climate change in Cameroon.
- initiate activities to promote awareness and information on the prevention of climate change;
- serve as operational tool to all other activities aimed at reducing greenhouse gases;
- carry out greenhouse inventories and produce annual Carbon balance of all socioeconomic development sectors;
- propose to the Government preventive measures for the reduction of greenhouse gas emissions, as well as mitigation and/or adaptation to the adverse effects and risks associated with climate change;
- serve as an instrument of cooperation with other regional or international observatories operating in the climate sector;

ONACC's primary focus is on several key action areas: the production of robust and precise climate services and forecasting, vulnerability studies, assessment of the economic cost of climate variability on the one hand and on the other, GHG emission inventory and production of annual carbon balance of the various socioeconomic development sectors including but not limited to agriculture, forestry and other land-uses. ONACC uses GIS and remote sensing tools to monitor forest cover change (losses and gains). She also uses climate modelling for forecasting weather and climate dynamics.

It is important to state here that PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at ONACC. We are eager to support PANGEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches in research in tropical forests, peatlands, wetlands and agricultural systems.

ONACC currently works on specific domains such as assessing the economic costs of climate change in the agricultural sector, disaster risk prediction and monitoring, and supporting farmers in climate adaptation efforts with partners including FAO, WFP, FIDA, GIZ, WWF, IUCN, ACF, USFS. Our shared expertise and ONACC's longstanding regional experience will provide strong local support for PANGEA's implementation in Cameroon and the Central African Sub region.

If PANGEA is selected, ONACC can provide in-kind support through local logistics, regionally relevant translation of science to action, and coordination with government ministries. Our team is also prepared to explore funding opportunities to participate in PANGEA-related research and application activities.

We see an opportunity for PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities in the tropics to further our goals, such as desired collaboration to enhance fire risk monitoring capabilities and develop fire monitoring tools to guide farmer land-use practices to support low-emissions agriculture, improve local and regional weather and climate predictions and improve local and regional early warning systems, and assess the economic cost of extreme weather events in the various socioeconomic development sectors.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As Director General at ONACC, we offer our full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared climate mitigation and adaptation goals, with a particular emphasis on resilient and sustainable development based on scientific evidence and local knowledge.

Prof. AMOUGOU Joseph Armathé
Director General
National Observatory on Climate Change, Cameroon
Email: info@onacc.cm, josepharmathe@yahoo.fr
Website: www.onacc.cm
App. onacc.alerte downloadable from Google playstore





BERKELEY LAB

CLIMATE AND ECOSYSTEM
SCIENCES DIVISION

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

**Subject: Letter of Support for
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter confirms our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). Should the proposed field campaign be selected, PANGEA will provide critical data on the dynamics of tropical forests across the tropics, train a new generation of scientists domestically and internationally, and foster collaborative international research that will help advance pressing scientific needs on the future of tropical forests under global change. Importantly, PANGEA will be synergistic to the Next Generation Ecosystem Experiments (NGEE-Tropics) activities led and carried out by Lawrence Berkeley National Lab and our partner institutions.

NGEE-Tropics is a long-term, multi-institutional project that has been supported by the Department of Energy since 2015 (<https://ngee-tropics.lbl.gov>). NGEE-Tropics aims at development and testing of a process-rich ecosystem model that can be used to project the future of tropical forests under global change. To this end, we currently are developing and testing the ELM-FATES model, which represents plant demography and a broad set of tropical forest processes, as well as field activities to measure plant physiology, forest demography, soil hydrology and biogeochemistry, and ecosystem carbon and water cycling, at multiple field sites, including in Panama, Brazil, and Malaysia.

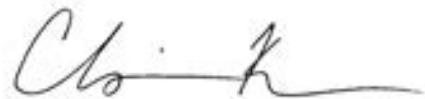
There are multiple highly aligned goals between NGEE-Tropics and PANGEA, as both projects

Lawrence Berkeley National Laboratory

aim to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. For example, both projects seek to understand the processes that govern forest carbon and water cycling, and growth and mortality dynamics of tropical forest trees. We also share the same vision on integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests. There are also key areas of complementarity between the projects, for example PANGEA's focus on African tropical forests, which NGEE-Tropics was not able to investigate as fully as forests in the Americas and Asia.

If PANGEA is selected, our team will also seek opportunities for direct collaboration with PANGEA, for example, through the development of proposals for funding opportunities aligned with PANGEA's goals.

PANGEA is a much-needed project that has the potential to greatly expand the scientific knowledge of critical yet under-studied ecosystems. Being the lead PI of NGEE-Tropics, I express my utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will unlock several opportunities for a strong partnership with NGEE-Tropics.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Charlie Koven".

Charlie Koven
Senior Scientist
Climate and Ecosystem Sciences Division
Lawrence Berkeley National Lab



Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

**Subject: Letter of Support for
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing on behalf of the One Forest Vision Initiative (OFVi) to express our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, and training gaps related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGEA will also support and reinforce international scientific cooperation and data collection activities led and carried out by OFVi.

OFVi is a scientific initiative that was initiated in 2023 in France by the coalition of 6 French research institutions: CEA, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD and MNHN, (for further details, please refer to our website: <https://www.oneforestvision.org/eng>). Our goal is to provide scientific support to countries within tropical basins with a specific focus on preserving their environmental integrity, particularly regarding the biodiversity and carbon stocks contained in tropical forests and wetlands. To achieve our objectives, we currently (i) increase and disseminate scientific knowledge on biodiversity and carbon; (ii) strengthen the skills and autonomy of researchers and managers in the Congo Basin; (iii) develop and disseminate biodiversity and carbon monitoring tools in the Congo Basin, more specifically in Congo, DRC and Gabon.

We see several aligned efforts and general aims between One Forest Vision and PANGEA, in particular in the measurement and monitoring of forest composition, structure and biogeochemical cycling. We are keen to support PANGEA in leveraging Earth observation techniques and multidisciplinary datasets to conduct impactful research. We are particularly

excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We pursue scientific activities and collaboration with local institutions from Congo, DRC, Gabon, Cameroon and Uganda. We are conducting field activities in 8 “super-sites” in these countries (link to the super-sites map : <https://www.oneforestvision.org/eng/scientific-productions/pillar-1>). These locations may be of strategic importance to PANGEA because of their habitat type and long-term data. Members of One Forest Vision have been working in some of these locations for years and can facilitate PANGEA’s implementation by helping with local expertise and the access to crucial data.

Should PANGEA be funded, One Forest Vision can provide aligned activities in the form of workshop and event expenses. While our initiative aims to assess the state of animal biodiversity in relation to plant biodiversity and the structure and functioning of the forest habitat ; to develop new approaches to enable multi-year monitoring at high spatial resolution of the structure, above-ground biomass and functional composition of tropical forests ; to build capacity building for local researchers and managers in the Congo Basin, we seek to ensure our activities are synchronized and complementary to other similar efforts carried out in the region. We already participate to monthly meetings with the PANGEA scoping team and the ongoing Congo Basin Science Initiative team.

We believe that PANGEA is an important project with the potential for high impact. As co-coordinators at One Forest Vision initiative, we express our utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA’s support of PANGEA will enable us to pursue this common activity.

The 24th September 2024:



Jean-François Soussana
Co-coordinator for One Forest Vision initiative
Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)
147 rue de l'Université, 75338 Paris, France



Laurent Durieux
Co-coordinator for One Forest Vision initiative
Institut national de Recherche pour le Développement (IRD)
44 boulevard de Dunkerque 13572 Marseille, France



Alain Billand
Co-coordinator for One Forest Vision initiative
Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD)
42, rue Scheffer, 75116 Paris France



Dr. Elsa Ordway
Department of Ecology and Evolutionary Biology
University of California, Los Angeles
410K Botany Building, Los Angeles, CA, 90095

**Department of Meteorology
and Atmospheric Science**
The Pennsylvania State University
502 Walker Building
University Park, PA 16802

814-865-0478
meteodept@meteo.psu.edu
met.psu.edu

Re: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We thank you for your leadership in developing the science plan of the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. We, the undersigned at The Pennsylvania State University, enthusiastically support the PANGEA program as it calls for novel and urgently needed research to advance the current understanding of the structure and function of the iconic tropical rainforests, which are undergoing major degradation in response to the influences of a rapidly changing global climate and land use changes.

Penn State University has several academic units and research groups, which have active interdisciplinary research programs related to the processes and activities that PANGEA will address over the next few years. In addition, we have strong graduate programs in Ecology, Ecosystem Science and Management, and Geography that grant Master of Science and Doctoral degrees. The academic program in Climate Science provides outstanding academic training in emerging research areas such as numerical modeling, data assimilation, machine learning, and artificial intelligence. At Penn State University, one key strength of academic training and research activities relates to climate change investigations and climate solutions, as evidenced by the Earth and Environmental Systems Institute, the Institute of Energy and Environment, and our new Penn State Climate Consortium (climate.psu.edu). Our pioneering strategies of engaging traditionally underrepresented groups in science and engineering will advance the community engagement component of the PANGEA initiative.

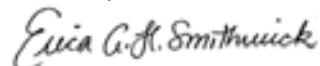
We wish to contribute to PANGEA's goals to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. New findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems and the people that depend upon them. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research and academic priorities. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observations and generate multidisciplinary data sets and methods to conduct ecological research. We are particularly excited to engage with diverse partners, including Indigenous communities, throughout the Tropics such that we can develop and advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, at Penn State University, we can provide cost-shared funding in the form of in-kind support contributed through the availability of research infrastructure such as laboratories equipped with contemporary technologies, and climate and ecological numerical models, and academic tuition or stipend support, commensurate with our university commitment to supporting graduate and undergraduate education. In addition, the Penn State University team will develop research proposals to seek funding to support participation in PANGEA-related studies. Our research proposals would draw from our current research interests and expertise that are closely related to PANGEA science questions: **"How do ongoing and projected changing climate impacts influence the resilience of the tropical carbon sink?"** and **"How does the weakening of the carbon sink influence additional feedbacks on the Earth's climate?"**

Our interest in PANGEA stems from previous experiences and partnerships that we have pursued in the Amazon rainforest. We have established long-term collaborations with diverse colleagues from academic institutions and government agencies in South America. Such partners will participate in PANGEA-related activities and play key roles in developing new research aimed at addressing regional and national land management practices. The Amazon rainforest plays critical roles not only in terms of water and carbon cycling but also in influencing the Earth's climate. Therefore, the Amazon is a strategic region to be investigated as part of the PANGEA initiative. Given our previous research in the Amazon during the last two decades, we can help facilitate PANGEA's implementation by assisting with ground-validation studies, numerical modeling, and community engagement. We will contribute analysis tools that identify causal feedback processes related to water and carbon cycling that lead to improved understanding of the nonlinear processes within the climate dynamics. In that context, one specific goal is to develop process-based numerical models to estimate the magnitude of feedbacks that can then be employed to perform targeted ground-based observations and thus enhance the fidelity of the data collection process. Our expertise with Earth System Modeling will be critical for identifying pathways that will inform ways to collect observational data that can inform causal inference estimates of tropical forest structure and function, and provide validation of remote sensing information. Our research community has existing and growing research interests working directly with Indigenous communities in the tropics, including in tropical South America and Africa. This work engages directly on issues related to climate resilience, socio-ecological systems, and Indigenous knowledge systems, providing ample opportunities for bridging Earth system modeling through a co-design framework.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), data sets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. PANGEA will certainly provide the unique venue to achieve a common set of novel research hypotheses that would create needed knowledge of tropical forest systems in a rapidly changing environment. We, therefore, are enthusiastic to join in the pursuit of new research endeavors under the auspices of PANGEA.

Sincerely,



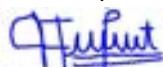
Erica Smithwick

Distinguished Professor of Geography, Walker Building, 302 North Burrowes Street, University Park, PA 16802; Director, Earth and Environmental Systems Institute; Associate Director, Institute of Energy and the Environment; The Pennsylvania State University, University Park, PA USA; Email: smithwick@psu.edu



Chris E Forest

Professor of Climate Dynamics, Department of Meteorology and Atmospheric Science, 507 Walker Building, University Park, PA 16802; Email: ceforest@psu.edu



Jose D Fuentes

Professor of Atmosphere Science, Department of Meteorology and Atmospheric Science, 508 Walker Building, University Park, PA 16802; Email: jdfuentes@psu.edu



Dr. Elsa Ordway
Department of Ecology and Evolutionary Biology
University of California, Los Angeles

10 December 2024

Dear Dr. Ordway,

Planet Labs expresses its strong support for the UCLA-led proposal entitled *The PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA) and the diverse coalition the initiative has brought together and continues to build. Planet believes that, if granted, the proposal has the potential to use space to help life on Earth by building understanding of the variation between and within Earth's two largest tropical forests in the Americas and Central Africa as they face rapid and large-scale climate and land-use changes that are already underway.

In addition, Planet believes that PANGEA, drawing on Planet's Earth observation data and analytics, can help make change visible, accessible, and actionable in accordance with Planet's mission. This mission aligns with PANGEA's well-established aim to establish patterns of recent and ongoing change in tropical forest landscape states, dynamics, and feedbacks; delineate the processes control heterogeneity in the vulnerability of tropical forest landscapes to structural and functional change; and the integration of space-based and in situ data to assess functional diversity, canopy foliar traits, carbon stocks, vertical structure of ecosystems, and other key characteristics in these regions.

Planet constantly evaluates new capabilities and providers developing new satellite products and services. For the reasons set forth above, in the event the proposal is selected for award, Planet is prepared to offer its support to PANGEA, subject to a more formal agreement.

Yours sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Amy Rosenthal".

Amy Rosenthal, Senior Global Director, Conservation Initiatives
Planet Labs PBC

Boston University

Department of Earth and Environment
685 Commonwealth Ave, Rm 130
Boston, MA 02215



November 20, 2024

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

**Subject: Letter of Support for
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance the measurement and modeling of tropical ecosystem processes, biogeochemistry, and greenhouse gas dynamics and their interactions with climate and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are very aligned with the model-data fusion activities conducted by the PEcAn (Predictive Ecosystem Analyzer) project.

PEcAn is a community cyberinfrastructure project that has been supported by a wide range of funding agencies (NASA, NSF, DOE, DoD SERDP, ARPA-E) and tech partners (Google, Amazon, Red Hat) since 2009 (<https://pecanproject.org/>). PEcAn's vision is to see ecosystem science, policy, and management informed by the best available data and models. We aim to achieve this through our mission to develop and promote open, accessible tools for reproducible ecosystem modeling and forecasting. This includes interoperable support for running >20 land models and analyzing them through a wide range of tools for data ingest, uncertainty propagation and partitioning, model calibration, validation, visualization, and iterative data assimilation. In particular, PEcAn is currently focused on developing continental-scale carbon cycle reanalysis products that fuse numerous bottom-up and remotely-sensed data constraints

with process-based models to produce harmonized carbon budgets with sophisticated uncertainty accounting across space, time, and pools/fluxes. We are working with a number of international, federal, and state agencies to integrate these products into carbon inventories, with an aim to expand to a global scale over the next few years.

PEcAn and PANGEA are inherently synergistic. For example, both PANGEA and PEcAn are focused on uncertainty quantification, field campaigns inspired by modeling needs and uncertainties, and better connecting science to policy, management, and decision making (e.g., national C inventories, REDD, voluntary markets). Likewise, PEcAn is deeply interested in integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests, which complements PANGEA's overall objectives.

Should PANGEA be selected, the PEcAn group will seek opportunities for close collaboration with PANGEA. For instance, we will look for funding opportunities that are related to PANGEA's goals, and will make PEcAn tools and training available to PANGEA scientists, including but not limited to working to add additional PANGEA-prioritized models to PEcAn and extending existing workflows to PANGEA sites and regional domains.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. As the PEcAn project lead, I confirm our utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between PEcAn and PANGEA.

Sincerely,



Michael C. Dietze
Professor, Boston University
PEcAn project lead
Director, Ecological Forecasting Initiative

Letter of support to the PANGEA research project lead by Elsa Ordway

I am writing to offer my strong support for the research project PANGEA that aims to explore how climate change and land-use changes are influencing the vulnerability and resilience of tropical rainforests, particularly those in Central Africa and the Amazon, and explores the degree to which these rainforests are impacted in similar or divergent ways. By examining both regions in tandem, this study has the potential to provide invaluable insights into how different rainforest ecosystems respond to similar climate and land use stressors and to identify the unique challenges each region faces.

The comparative nature of the research will offer new perspectives on the resilience of these ecosystems and inform conservation strategies that are tailored to the specific needs of each region. Furthermore, the findings could provide important guidance for policymakers and conservation organizations working to mitigate the impacts of climate change on biodiversity and forest health.

The research methodology outlined in the white paper demonstrates a robust approach to understanding the complex interactions between climate change and rainforest ecosystems. The project's interdisciplinary approach promises to yield results that are scientifically sound and of practical importance to global environmental sustainability efforts.

Sincerely,



Tørris Jæger
Secretary General



November 4, 2024

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, California 90095
USA

Dear Dr. Elsa Ordway:

Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

This letter is to provide my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If this field campaign is selected, it will provide critical measurements needed for advancing understanding of Earth's largest store of living carbon and will inform the scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests required for constraining Earth system models and projecting impacts and feedbacks of climate change. The goals and deliverables of PANGEA are well aligned with the simulation and analysis of global biogeochemical cycles conducted in the Reconciling Uncertainties in Biogeochemical Interactions through Synthesis and Computation (RUBISCO) Science Focus Area.

RUBISCO is a project supported by the US Department of Energy that investigates terrestrial and marine biogeochemical cycles by combining observations and models to understand feedbacks of climate change. One of the key products emerging from the project is the open source International Land Model Benchmarking (ILAMB) package, which assesses the fidelity of land carbon cycle models through comparison with best-available observations. PANGEA shares strong synergy with the RUBISCO project for the incorporation of new multi-scale reference (observational) data sets into ILAMB and the creation of new tropical ecosystem-relevant metrics for evaluating mechanistic models of tropical forests.

Should PANGEA be funded, the RUBISCO project team will collaborate directly with PANGEA on constraining models of tropical ecosystems and will seek collaborative funding opportunities to propose additional projects that are synergistic with PANGEA's main goals.

PANGEA has a unique potential to significantly advance understanding and reducing uncertainties on the impacts of global change on tropical forests. Therefore, as the Laboratory Research Manager, I express my utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable multiple collaboration opportunities with the RUBISCO project.

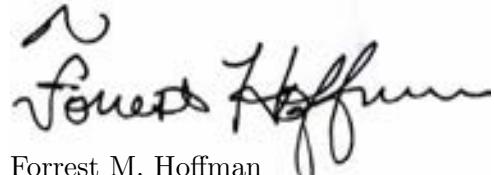
Dr. Elsa Ordway

Page 2

November 4, 2024

If I can provide any additional information in support of PANGEA and potential collaborations with the RUBISCO SFA, please contact my at your earliest convenience.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Forrest Hoffman". The signature is fluid and cursive, with a small decorative flourish at the top left.

Forrest M. Hoffman

Distinguished Computational Earth System Scientist

Group Leader, ORNL Integrated Computational Earth Sciences (ICES) Group

Laboratory Research Manager, Reconciling Uncertainties in Biogeochemical Interactions
through Synthesis and Computation (RUBISCO) Science Focus Area

Le directeur du département ECOBIO

Montpellier, le 5 décembre 2024

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing on behalf of IRD, the French Institute for Sustainable Development, to express our support to project PANGEA (PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation) submitted to NASA Terrestrial Ecology Field Campaign. If selected, this project will complement the efforts of IRD teams and researchers to collect critical data, develop methods and applications, and build capacities for the monitoring, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, human activities.

PANGEA will more specifically complement IRD research efforts in the Congo Basin forests, where we support for years international scientific cooperation. We see several aligned efforts and general aims between IRD research programs and PANGEA, in particular with activities conducted by our Laboratoire Mixte International DycoFac (Dynamics of Continental Ecosystems in Central Africa (<https://www.lmi-dycofac.org/>), which contributes, with local partners, to the monitoring of forest composition, structure and biogeochemical cycling. We are keen to support PANGEA in leveraging Earth observation techniques and multidisciplinary datasets to conduct impactful research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the topics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We believe that PANGEA is an important project with the potential for high impact and we express our utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common activity.

Jean-Christophe AVARRE



Directeur du département ECOBIO



Kinshasa November, 22, 2024

N/Réf : OSFAC-HQ/22112024

Dr. Elsa Ordway

Department of Ecology and Evolutionary Biology
University of California, Los Angeles
410K Botany Building, Los Angeles, CA. 90095

Concern: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr Elsa Ordway,

We are delighted to know that you are submitting a proposal for the implementation of a major international project called "*The PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)*" which will address several themes. This excellent initiative will provide a lot of scientific knowledge on tropical ecosystems.

The objectives of PANGEA are in line with the vision of the Satellite Observatory of Forests of Central Africa (OSFAC) which is a Non-Governmental Organization (NGO) with a regional vocation and also representative in Central Africa of the international network Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOFC-GOLD). Indeed, OSFAC's vision is that Central Africa has reliable and relevant data to guide decision-making. With this in mind, OSFAC and its partners in Africa and Northern countries work to provide users and decision-makers with reliable and regularly updated information. This information relates to the state of forests, their dynamics (extent of forest cover, deforestation,



degradation, forest fires, restoration of forest landscapes, etc.), the drivers that guide this dynamic, the quantification of biomass, carbon and greenhouse gas emissions, climate change etc.

We are confident that the implementation of the PANGEA Project will be a good opportunity to better understand the composition and functioning of tropical ecosystems, as well as the immense role they play in the living conditions of populations but also on several questions of interest the world today, among other things, climate change. In addition, considering all the teams that could participate in this project, PANGEA will be a place for multicultural meetings, a laboratory of ideas and proposals for innovative solutions.

The methods, tools (satellites, drones, planes) and data (in-situ, optics, Radar, Lidar, etc.) that the PANGEA Project plans to use will make it possible to generate results that will be used to resolve a large part of the environmental problems of the tropical world and contribute to improving the well-being of populations in this region.

It is for this reason that the Satellite Observatory of Central African Forests (OSFAC) of which I am the Director fully supports the PANGEA Project and wishes its funding.

Sincerely,

DIRECTOR OF OSFAC



Dr. Landing MANE

SPUN | SOCIETY FOR THE PROTECTION OF UNDERGROUND NETWORKS

Society for the Protection of Underground Networks
3500 South DuPont Highway, Suite E1-101
Dover, DE 19901

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

6, September, 2024

RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

Thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. The Society for the Protection of Underground Networks (SPUN) is happy to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

SPUN is a scientific research NGO that was established in 2021 (www.spun.earth) with a mission is to map, protect, and harness the mycorrhizal fungal networks that regulate Earth's climate and ecosystems. Mycorrhizal fungi form root symbioses with more than 90% of all plant species, creating underground networks that draw down carbon and provide essential nutrients to plants. These fungi help soil ecosystems store 75% of all terrestrial carbon, but mycorrhizal fungi are overlooked in Natural Climate Solution (NCS) goals. SPUN is developing high-resolution global and regional datasets of mycorrhizal fungal diversity and functioning to advocate for their protection and inclusion in NCS strategies.

PANGEA's aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities of pinpointing degraded ecosystems with underperforming fungal networks and identifying keystone mycorrhizal species associated with the recovery of threatened ecosystems. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, SPUN can provide cost-shared funding in the form of in-kind support contributed through the availability of SPUN's research infrastructure (e.g., computation resources for fungal bioinformatics, ecological modeling, and geospatial analysis), staff time, and relevant travel costs related to two of SPUN's ongoing project areas:

1) integrating remote sensing tools with *in-situ* mycorrhizal fungal measurements and 2) SPUN's Underground Explorers Grant program. These projects are closely related to PANGEA Science Question 1 (*Examine similarities and differences in forest composition, structure and biogeochemical cycling across tropical regions*), and PANGEA broader impact goals of advancing scientific capacity for researchers in the Global South.

Monitoring changes in mycorrhizal biodiversity is time and resource intensive with on-the-ground measurements. We need a dynamic way to estimate underground network responses in real-time, at scale. Remote sensing technologies offer the ability to observe plant biodiversity and ecosystem functioning with high spatial and temporal resolution, but so far its applications are limited to aboveground ecosystems. SPUN has partnered with Caltech and the 11th Hour Project at the University Chicago Data Science Institute to explore whether remote sensing data can be used to detect changes in mycorrhizal fungal diversity and abundance. Our goal is to identify mycorrhizal signatures in the immense volume of remotely-sensed spectral data from US [National Ecological Observatory Network](#) sites. However, these data do not cover tropical forests or tropical mycorrhizal fungi, meaning that any spectral biology models we develop to estimate mycorrhizal fungi will be incomplete and likely unapplicable for tropical systems. Working with PANGEA, SPUN will leverage our capacity to generate extensive *in-situ* mycorrhizal fungal data paired with the specific flight campaigns of this tropical focused NASA Terrestrial Ecology program. These novel datasets will 1) provide critical insights for understanding the role of mycorrhizal fungi in shaping biogeochemical variation across different tropical forest regions, and 2) expand the range of habitat types represented in our paired spectral-fungal dataset to remotely sensing mycorrhizal symbioses in all forest types.

SPUN has developed efficient data protocols and analysis pipelines for generating precise mycorrhizal fungal data in difficult-to-access regions of the world, including tropical forests in Colombia and Ghana. Our organization excels at community building, with a global network of 415+ Science Associates from more than 79 countries. Additionally, we have awarded a total of 92 Underground Explorer grants to an exceptional cohort of soil fungal researchers from 43 countries. Notably, 83% of these grants have been allocated to scientists based in the Global South. Our Underground Explorers are now conducting soil sampling across every continent, focusing on some of the world's most under-explored ecosystems. To maximize the impact of their research, we provide each Explorer with comprehensive technical and communications support. For specific locations in South America, Africa, Southeast Asia, SPUN can leverage our network of local researchers to engage and coordinate research activities with PANGEA to explore using satellite imagery to improve fungal biodiversity monitoring and belowground carbon accounting in tropical forest ecosystems.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

SPUN | SOCIETY FOR THE PROTECTION
OF UNDERGROUND NETWORKS



Dr. E. Toby Kiers
Professor, Faculty of Science, Ecology & Evolution, Vrije Universiteit Amsterdam
Executive Director & Chief Scientist, Society for the Protection of Underground Networks



Dr. Michael Van Nuland
Lead Data Scientist, Society for the Protection of Underground Networks



Dr Elsa Ordway
Ecology & Evolutionary Biology
410K Botany Building
Los Angeles, CA
90095, USA

26 August 2024

Dear Dr Ordway

Re: Support for NASA Research Opportunities in Space and Earth Sciences (ROSES) programme PANGEA – PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation

I am writing to offer the UK Centre for Ecology & Hydrology's (UKCEH) support for the proposed PANGEA project. We understand that PANGEA will link remote sensing data with on-the-ground measurements in tropical forests across the globe, to answer questions on tropical forest biodiversity, functioning, carbon stocks and sequestration, and how these will be affected by climate and land use change in the future. Answering these questions will lead to fundamental understanding that is crucial to mitigating climate change and enabling successful conservation and restoration of tropical forests.

UKCEH is an independent, not-for-profit research institute and the UK's leading institute for the terrestrial and freshwater sciences. We have a global impact, producing cutting edge scientific discoveries and contributing to understanding and monitoring the environment of our planet. We deliver these through valuable partnerships, using state of the art research facilities, managing interdisciplinary projects and comprehensive monitoring programs supported by 500 expert scientists.

Here at UKCEH we have a long history of collaborations in tropical forest ecology across Latin America, West and East Sub-Saharan Africa and Southeast Asia. My colleagues Dr Jill Thompson, Dr Lindsay Banin and others, are deeply embedded in long-term tropical research sites that could be focal landscapes for PANGEA, or provide complementary, contextual information. Our research questions in the tropics focus around climate change and greenhouse gases, forest functioning, plant community change, plant-animal interactions, land-use change and biogeochemical fluxes, social-ecological interactions, forest recovery and restoration. We also



UK Centre for
Ecology & Hydrology

UK Centre for Ecology & Hydrology
Maclean Building, Benson Lane
Crowmarsh Gifford, Wallingford
Oxfordshire
OX10 8BB
UK

T: +44 (0)1491 838800

process remotely sensed data from a variety of sources and have foundational skills in data management, analysis and synthesis.

The PANGEA proposal could provide a unique opportunity to link remotely-sensed data at various scales with ground-based data that UKCEH could effectively contribute to. UKCEH could provide information and connections with international organizations to assist in site selection for PANGEA activities. We would be keen to seek independent and joint funding with PANGEA members to enable collaborative research between UKCEH and PANGEA to promote our scientific endeavours.

Yours sincerely

Prof Harry Dixon
Associate Director of International Research and Development
Email: harr@ceh.ac.uk



Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095

**Subject: Letter of Support for
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical knowledge gaps on the impact of climate change on tropical forests such as the Congo Basin. PANGEA's work will make an important contribution to the activities led and carried out by the Science Panel for the Congo Basin, convened by the United Nations Sustainable Development Solutions Network.

The [Science Panel for the Congo Basin](#) (SPCB) was established in 2023 at COP28, in Dubai, as an independent platform for scientists from the region to synthesize the existing knowledge including Indigenous peoples and autochthonous knowledge on the functioning of, and threats to, the Congo Basin and its ecosystems. The Panel was inspired by the successful Science Panel for the Amazon (SPA). It collaborates with SPA along with the newly formed Science Panel for Borneo (SPB) to facilitate scientific communication across the three tropical forest ecosystems. SPCB is currently engaged in developing its first assessment report to present at COP30, in Belém.

We see several aligned efforts and general aims between the Science Panel for the Congo Basin and PANGEA, in assessing the impact of anthropogenic activities on tropical forest ecosystem health and resilience. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

While our Panel excels at analyzing the current body of knowledge on the Congo Basin, we require a strong basis of existing information. PANGEA's efforts to expand knowledge on the impact of climate change in tropical forests will contribute to achieve our aim.



We believe that this is an important project with the potential for high impact. As Strategic Coordinator for the SPCB, I express my strong support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue the common goal to bring the status of the Congo Basin to the global forefront.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Emma Torres".

Emma Torres
Head of the New York Office and Vice President of the Americas
Strategic Coordinator of the Science Panel for the Congo Basin
United Nations Sustainable Development Solutions Network



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
VICERRECTORADO INVESTIGACION**

Ciudad Universitaria s/n Edificio Administrativo 2do Piso - Teléfono 51-365054



Dra. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Asunto: Carta de apoyo a la investigación PANtropical sobre biogeoquímica y adaptación ecológica (PANGEA)

Estimada Dra. Ordway,

Por intermedio de la Universidad de Oklahoma, agradezco por la invitación a colaborar en la investigación PANtropical de biogeoquímica y adaptación ecológica (PANGEA). La Oficina del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno está encantada de apoyar el programa PANGEA cuando se confirme la financiación de la NASA.

La Universidad Nacional del Altiplano, Puno, una universidad pública fundada el 29 de Agosto de 1856 en la Ciudad de Puno, Perú con la misión de desarrollar y transmitir el conocimiento científico, tecnológico y humanístico, formando profesionales y posgraduados calificados y competitivos, impulsando el desarrollo de la investigación y la responsabilidad social, la práctica de valores y la identidad cultural, orientadas al estudiante y la sociedad, con miras a contribuir al desarrollo sostenible de la región y del país.

El objetivo de PANGEA es mejorar la comprensión de cómo el clima global y los cambios antropogénicos afectan la composición, la estructura y el ciclo biogeoquímico de los bosques en las regiones tropicales. Los nuevos hallazgos son necesarios para determinar la resiliencia y la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales tropicales. Por lo tanto, la agenda de investigación de PANGEA está estrechamente alineada con nuestras prioridades de investigación. Esperamos apoyar los esfuerzos de PANGEA para aprovechar la observación de la Tierra y los datos y métodos multidisciplinarios para realizar investigaciones. Estamos particularmente entusiasmados con las perspectivas de interactuar con diversas comunidades en todo el trópico para avanzar en la comprensión científica, fortalecer la capacidad de investigación ecológica y apoyar la aplicación de los resultados científicos a la gobernanza y las prácticas de gestión sostenible de la tierra.

En caso de que se financie PANGEA, la UNAP proveerá espacios de colaboración para llevar a cabo estudios y experimentos especialmente en sus centros de investigación en la zona Amazónica y Andina así como la participación de profesores investigadores en el tema. La UNAP con su aliada estratégica la Universidad de Oklahoma (USA), buscarán desarrollar propuestas de investigación para buscar financiación para apoyar la participación en estudios relacionados con PANGEA.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO
VICERRECTORADO INVESTIGACION

Ciudad Universitaria s/n Edificio Administrativo 2do Piso - Teléfono 51-365054



Llevamos adelante esta iniciativa con nuestros investigadores, las comunidades locales, especialmente en la zona Amazónica de Puno, Carabaya, San Gabán, Sandía que se alinean a los objetivos de PANGEA. La UNAP en alianza con la Universidad de Oklahoma también facilitará alianzas con instituciones relevantes del gobierno para obtener datos históricos y apoyo para las investigaciones que PANGEA lleve a cabo.

La UNAP apoya esta iniciativa enfocada en el ecosistema Amazónico de la región Puno, donde los efectos del cambio climático afectan a la población y el medio ambiente. El ecosistema Andino-Amazónico en el suroeste del Amazonas es de importancia estratégica para PANGEA por ser la región que en la última década ha sufrido los mayores efectos de deforestación y contaminación ambiental del continente. La implementación de PANGEA nos ayudará a renovar y potenciar nuestras estaciones experimentales, su instrumentación y formar profesores expertos en la biogeoquímica y adaptación ecológica en Puno, Perú.

Si bien nuestra universidad se destaca en poseer participación comunitaria, recopilación y análisis de datos terrestres buscamos participar en PANGEA para desarrollar capacidad en investigación y educación para la siguiente generación de científicos formados en Puno. Igualmente nos ayudará a acceder a las tecnologías de NASA y aprovechar las imágenes satelitales por ejemplo para entender y mejorar el manejo del carbono.

Reconocemos los beneficios mutuos de compartir esfuerzos, métodos de investigación (por ejemplo, modelos numéricos), conjuntos de datos, recursos y experiencias para avanzar en la comprensión de la ecología terrestre y aprovechar mejor la observación de la Tierra para apoyar el objetivo de nuestra organización. Esperamos que el apoyo de la NASA a PANGEA nos permita perseguir este interés común de investigación.

Atentamente,


Dr. Angel Rogelio Velasco Cárdenas
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN
UNA - PUNO

Universidad Nacional del Altiplano UNAP Letter of Support – English Translation

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

Through our partner the University of Oklahoma I thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. On behalf of the office of the Vice President for Research of the [Universidad Nacional del Altiplano](#), Puno (UNAP) I am glad to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

The UNAP It is a public university founded on August 29, 1856 in the city of Puno, Peru with the mission of developing and transmitting scientific, technological and humanistic knowledge, training qualified and competitive professionals and graduates, promoting the development of research and social responsibility, the practice of values and cultural identity, oriented to the student and society, with a view to contributing to the sustainable development of the region and the country.

PANGEA's aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities in the Amazon region of Peru. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, UNAP can provide the use of our university experimental stations and support for field work in the rainforest and Andean region. Similarly, we will involve our research faculty experts on the area. UNAP and its strategic partner the University of Oklahoma (USA), will work to develop research proposals seeking funding to support studies aligned with PANGEA

We pursue this initiative with local communities and institutions in the Amazonic and Andean regions that aligned with the objectives of PANGEA. UNAP and OU will also facilitate alliances with relevant government agencies to obtain historic and current data for the planned research.

UNAP supports this initiative focused on the Southern Amazon region of Peru where the effects of climate change effects severely the population and the environment. The Andean-Amazonian ecosystem in the southwest Amazon is of strategic importance for PANGEA because it is the region that in recent decades has suffered the most with massive deforestation, environmental pollution, and wildfires on the continent. The implementation of PANGEA will help us to renew and enhance our experimental stations, their instrumentation and train expert professors in biogeochemistry and ecological adaptation in Amazonas, Peru.

While our organization/institution excels in community engagement, local ground data collection, we seek to engage with PANGEA to help capacity building in research and education to train the next generation of scientists for the Amazon region in Puno. Similarly, we hope it will allow us access to new technology and information from NASA and benefit from the remote sensing information and maps to better understand for instance the carbon accounting in our region.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

Sincerely,

Dr. Ariel Velasco Cardenas
Vice Rector de Investigación
Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Peru



Rectorado

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la Conmemoración de las Heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

Chachapoyas, 3 de octubre del 2024

CARTA N° 065-2024-UNTRM-R

Dra. Elsa Ordway

Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles

410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095

Asunto: Carta de apoyo a la investigación PANtropical sobre biogeoquímica y adaptación ecológica (PANGEA)

Estimada Dra. Ordway,

Por intermedio de la Universidad de Oklahoma, agradezco por la invitación a colaborar en la investigación PANtropical de Biogeoquímica y Adaptación Ecológica (PANGEA). En nombre de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Amazonas (UNTRM) deseo expresar nuestro apoyo al programa PANGEA, una vez se confirme el financiamiento de la NASA.

La UNTRM es una universidad pública creada el 18 de setiembre del 2000 en la Ciudad de Chachapoyas, Perú, con la visión ser líder y referente nacional e internacional en formación académica, investigación científica, tecnológica y humanista de calidad que contribuya al desarrollo de la sociedad.

El objetivo de PANGEA es mejorar la comprensión de cómo el clima global y los cambios antropogénicos afectan la composición, la estructura y el ciclo biogeoquímico de los bosques en las regiones tropicales. Los nuevos hallazgos son necesarios para determinar la resiliencia y la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales tropicales. Por lo tanto, la agenda de investigación de PANGEA está estrechamente alineada con nuestras prioridades de investigación. Esperamos apoyar los esfuerzos de PANGEA para aprovechar la observación de la Tierra y los datos y métodos multidisciplinarios para realizar investigaciones. Estamos particularmente entusiasmados con las perspectivas de interactuar con diversas comunidades en todo el trópico para avanzar en la comprensión científica, fortalecer la capacidad de investigación ecológica y apoyar la aplicación de los resultados científicos a la gobernanza y las prácticas de gestión sostenible de la tierra.

En caso de que se financie PANGEA, la UNTRM proveerá espacios de colaboración para llevar a cabo estudios y experimentos, especialmente en sus centros de investigación en la zona Amazónica y Andina, así como la participación de profesores investigadores en el tema. La UNTRM con su aliada estratégica la Universidad de Oklahoma (USA), buscarán desarrollar propuestas de investigación para buscar financiamiento y apoyar la participación en estudios relacionados con PANGEA.

Llevamos adelante esta iniciativa con nuestros investigadores, las comunidades locales, especialmente en la zona Amazónica de la región Amazonas que se alinean a los objetivos de PANGEA, también, la UNTRM en alianza con la Universidad de Oklahoma promoverán la creación de



Rectorado

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la Conmemoración de las Heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

alianzas con instituciones relevantes del gobierno para obtener datos históricos y apoyo para las investigaciones que PANGEA lleve a cabo.

La UNTRM apoya esta iniciativa enfocada en el ecosistema Amazónico de la región Amazonas, donde los efectos del cambio climático afectan severamente a la población y el medio ambiente. El ecosistema Andino-Amazónico en el oeste del Amazonas es de importancia estratégica para PANGEA por ser la región que en las últimas décadas ha sufrido los mayores efectos de deforestación y contaminación ambiental del continente. La implementación de PANGEA nos ayudará a renovar y potenciar nuestras estaciones experimentales, su instrumentación y formar profesores expertos en la biogeoquímica y adaptación ecológica en Amazonas, Perú.

Si bien nuestra universidad se destaca en poseer participación comunitaria, recopilación y análisis de datos terrestres buscamos participar en PANGEA para desarrollar capacidad en investigación y educación para formar la siguiente generación de científicos formados en la región Amazonas. Igualmente nos ayudará a acceder a las tecnologías e información de la NASA y aprovechar las imágenes satelitales, por ejemplo, para entender y mejorar el manejo del carbono.

Reconocemos los beneficios mutuos de compartir esfuerzos y métodos de investigación, tales como, modelos numéricos, conjuntos de datos, recursos y experiencias para avanzar en la comprensión de la ecología terrestre y aprovechar mejor la observación de la Tierra para apoyar el objetivo de nuestra universidad. Esperamos que el apoyo de la NASA a PANGEA nos permita perseguir este interés común de investigación.

Atentamente,

UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS
Jorge Luis Macielo Quintana Ph.D.
Rector

Universidad Nacional Toribio Rodriguez de Mendoza (UNTRM) – English Translation

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

Through our partner the University of Oklahoma I thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. On behalf of the [Universidad Nacional Toribio Rodriguez de Mendoza](#) (UNTRM) I am glad to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

The UNTRM It is a public university created on September 18, 2000 in the city of Chachapoyas, Peru with the vision of being a leader and national and international reference in academic training, scientific, technological and humanistic research of quality that contributes to the development of society.

PANGEA's aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities in the Amazon region of Peru. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, UNTRM can provide access to our university experimental stations and support for field work in the rainforest and surrounding Andean areas. Similarly we will involve our research faculty experts on the area. The UNTRM and its strategic partner the University of Oklahoma (USA), will work to develop research proposals seeking funding to support studies aligned with PANGEA

We pursue this initiative with local communities and institutions in the Amazonic and Andean regions that aligned with the objectives of PANGEA. The UNTRM and OU will also facilitate

alliances with relevant government agencies to obtain historic and current data for the planned research.

UNTRM supports this initiative focused on the Northern Amazon region of Peru where the effects of climate change severely affect the population and the environment. The Andean-Amazonian ecosystem in the western Amazon is of strategic importance for PANGEA because it is the region that in recent decades has suffered the most the effects of deforestation, environmental pollution, and wildfires on the continent. The implementation of PANGEA will help us to renew and enhance our experimental stations, their instrumentation and train expert professors in biogeochemistry and ecological adaptation in Amazonas, Peru.

While our organization/institution excels in community engagement, local ground data collection, we seek to engage with PANGEA to help capacity building in research and education to train the next generation of scientists for the Amazon region. Similarly, we hope it will allow us access to new technology and information from NASA and benefit from the remote sensing information and maps to better understand for instance the carbon accounting in our region.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

Sincerely,

Dr. Jorge Luis Maicelo Quintana
President
Universidad Nacional Toribio Rodriguez de Mendoza,
Amazonas, Peru



UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANATO

June 10, 2024

Elsa M. Ordway, Ph.D.

Department of Ecology and Evolutionary Biology Institute of the Environment and Sustainability

University of California, Los Angeles, USA

Dr. Ordway,

I am writing to express my sincerest gratitude for the invitation to participate in the PANGEA Workshop, held at the Pontifical Catholic University of Peru in Lima. It was an enriching and valuable experience, both professionally and personally. The opportunity to share knowledge and experiences with colleagues from various institutions and countries was invaluable.

Additionally, I would like to express the intention of the Faculty of Agronomy at the National University of Piura to collaborate with you. We are deeply interested in working together on the study, analysis, and development of alternatives to address the negative effects of climate change on agriculture and the forest environment of the Amazon. We believe that close collaboration between our institutions can generate innovative and effective solutions to mitigate the impact of climate change in these crucial areas, strengthening our academic development and professional exchange in various scientific specialties.

In the Piura Region, we currently have a diagnosis of the effects of climate change on agriculture. This study has allowed us to propose concrete recommendations to prevent the increased risk in food production and suggest alternatives for biodiversity conservation. We would like to share these findings with you and your team and explore possible areas of collaboration to strengthen our joint efforts.

We look forward to the possibility of working with you and the University of California, Los Angeles, on initiatives that promote the sustainability and resilience of our agricultural and forest systems in the face of climate change.

Once again, thank you for the invitation, and I hope to establish a fruitful collaboration.

Sincerely,

Ing. Jose Remigio

Dean of the Faculty of Agronomy, National University of Piura
51 990076076; jremigioa@unp.edu.pe, remigiopepe@gmail.com


UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
ING. JOSE REMIGIO ARGUELLO M.Sc.
DECANO

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Louvain-la-Neuve, Belgium, July 25, 2024

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

Thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. The [Land Systems for Sustainability](#) lab that I am leading at the Université catholique de Louvain (UCLouvain) in Belgium is happy to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

Our lab is part of [Earth and Life Institute](#) (ELI). Established in 2009, ELI is UCLouvain's flagship research institute on sustainability and environmental sciences, with over 300 researchers and key research foci on land-use change, climate change, soil sciences, and biodiversity conservation. ELI has a longstanding research track record in Earth Observation, land-use and land-cover change (LULCC) and global change studies in tropical regions. Within ELI, the research in our lab focuses on how land use and more broadly land systems can contribute to sustainability.

PANGEA's aims—to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions—are clearly linked to our research agenda. We have been working on mapping and understanding tropical social-ecological systems, with a focus on the role of governance interventions (public, private and hybrid) and economic dynamics, in particular linked to international supply chains. We have been investigating various processes that are strongly linked to the PANGEA agenda, including tropical deforestation, reforestation, and agricultural expansion, intensification and extensification. Our team has strong expertise in understanding drivers of land use and land system changes, including governance and economic structures such as international supply chains. The work developed in PANGEA throughout its well-identified but strongly articulated Working Groups would be extremely useful for us for embedding our understanding of land system drivers into a broader understanding of their Earth System impacts, including biogeochemical cycles & carbon dynamics, ecosystem structure, function, biodiversity, and climate feedbacks and interactions. Further, we believe that we can develop valuable synergies with the social-ecological systems Working Group,

which investigates questions that are very close to our research agenda, such as *how does governance structure, policy, and market dynamics interact with climate change, and land use and land cover change in tropical regions, and which interventions are most effective in restoring and adapting social and ecological processes to changes in tropical regions.*

We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth Observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices. Although our team has been working in various contexts across the Tropics, we have developed a strong focus on the Miombo woodlands of Southern Africa, in particular Mozambique, where we collaborate with colleagues who have a very strong and long-standing expertise in ecosystem dynamics in these forests, in particular at Universidade Eduardo Mondlane (UEM). The Miombo woodlands are a highly understudied both in terms of social and ecological dynamics, and their interactions, and African research institutes are strongly under-represented in global change research. The teams led by our colleagues at UEM are pivotal in the research and the science-policy interface in Mozambique, being directly engaged with public authorities and administrations on policy-making and evaluation. I sincerely believe that engaging further in this region and with these partners would be highly beneficial for the research agenda and the positioning of PANGEA.

Should PANGEA be funded, we are willing to facilitate any engagement of PANGEA in that region, and to consider developing research proposals, including in other regions, to seek funding to support participation in PANGEA-related studies. We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our lab's goals. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

Yours sincerely,

Professor Dr. Patrick Meyfroidt



F.R.S. - FNRS &
Earth and Life Institute - UCLouvain
Place Louis Pasteur, 3
1348 Louvain-La-Neuve Belgium
Email : patrick.meyfroidt@uclouvain.be
Tel: +32 10 472 992 <http://www.uclouvain.be/eli>
<http://landsystems-lab.earth/>

November 19, 2024

Elsa Ordway, Ph.D.
Assistant Professor, UCLA Department of Ecology and Evolutionary Biology
Co-Director, Congo Basin Institute, UCLA
Co-Director, UCLA Center for Tropical Research

RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Professor Ordway,

As the UCLA Vice Chancellor for Research & Creative Activities, I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will fill critical data, methods, applications, and training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of remote sensing data in tropical forest regions.

If awarded, PANGEA will be able to draw upon the extensive research infrastructure at UCLA. As one of the country's largest and most productive research universities with over \$1.5 billion in annual research funding, UCLA has experience managing large complex federal awards. UCLA's Office of Research Administration and other campus offices have the capacity, resources, and expertise needed to ensure appropriate award management.

In addition, UCLA has a history of nurturing international research programs, some of which will facilitate PANGEA's data collection and engagement. UCLA co-founded the Congo Basin Institute (CBI) in 2015 as a model for modern scholarship in Africa. Based in Cameroon and covering the Central African region, CBI has nearly a decade of operational experience, dozens of collaborations with local researchers, and relationships with numerous local communities. Another example, the Center for Tropical Research (CTR), has been housed at UCLA since 2001 and promotes pan-tropical research in the three major tropical basins.

PANGEA will also benefit from the enormous depth and breadth of scholarship at UCLA, which has over 140 departments and interdepartmental programs. Our highly engaged undergraduate and graduate student body will support PANGEA's capacity-building goals. Furthermore, UCLA's status as an emerging Hispanic-Serving Institution and our partnership with Morgan State University, a historically Black university, will facilitate engaging minority and first-generation students in PANGEA's research.

The PANGEA campaign has significant potential for high-impact research. UCLA is committed to supporting the project's success and helping it flourish as part of UCLA's expansive research enterprise.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink that reads "Roger M. Wakimoto". The signature is fluid and cursive, with "Roger" and "M." on the first line and "Wakimoto" on the second line.

Roger M. Wakimoto, Ph.D.
Vice Chancellor for Research & Creative Activities



November 7, 2024

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Dear Dr. Ordway,

LETTER OF SUPPORT FOR PAN TROPICAL INVESTIGATION OF BIOGEOCHEMISTRY AND ECOLOGICAL ADAPTATION (PANGEA)

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGEA will also support and reinforce earth observation of forest through satellite imagery, forest biodiversity and conservation, landscape restoration, Non-Timber Forest Products (NTFP) conservation and utilization at the local level for food, energy and medicine, forest resources utilization for indigenous medicine, capacity building and research-related activities led and carried out by the University of Energy and Natural Resources.

The University of Energy and Natural Resources (UENR) is a public funded institution that was established in 2011 in Ghana. Our goal is to promote the development of human resources and skills required to solve the critical energy and natural resources challenges of society and undertake interdisciplinary academic research and outreach programmes in engineering, science, economics and environmental policy. To achieve our objectives, we currently do carbon flux tower monitoring project between atmosphere and tropical forest (https://eoric.uenr.edu.gh/?bunch_projects=carbon-flux-tower-project) in Bia-Tano Forest Reserve, Ghana, Non-Timber Forest Products cultivation and community development at Lake Bosomtwe, Ghana, Forest Phenology project (in selected forest reserves in Ghana) and Climate Forest Feedbacks Project, also at Bia-Tano Forest Reserve.

We see several aligned efforts and general aims between UENR and PANGEA, in earth observation research, climate change mitigation and adaptation, forest monitoring and conservation, carbon sequestration research, NTFP research and community development. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout

the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We pursue forest monitoring and conservation, community capacity building for forest management initiatives with local communities, and national institutions and agencies such as Forestry Commission, Forestry Research Institute of Ghana (FoRIG), Environmental Protection Agency (EPA) and Local Government Authorities. These institutions have the legal, regulatory, scientific and technical mandate and capacity to support research, capacity building, data analysis and dissemination activities related to PANGEA. We conduct this initiative in Bia-Tano Forest Reserve, Tain II Forest Reserve, Tinte Bepo Forest Reserve, Bobri Forest Reserve within both moist and dry semi-deciduous forest ecosystems because it is special for habitation of indigenous forest species, biodiversity hotspot and buffers the forest zone from the harsh savannah ecosystems in Northern Ghana. This location may be of strategic importance to PANGEA because of their unique scientific and socioeconomic value. The UENR has been working in this location for twelve years and can facilitate PANGEA's implementation by helping with research, stakeholder engagement, capacity building and community development.

Should PANGEA be funded, UENR can provide in-kind support in the form of research support services, office space, IT services, financial management services and vehicles for travel and 20% of staff time (FTE) estimated at US \$200,000.

While our institution excels at earth observation services (global navigation satellite systems, high performance computing, GIS and data analysis) multidisciplinary research, stakeholder engagement, collecting and analyzing ground-based data, strengthening capacity of local government authorities, we seek to engage in cutting-edge research, training and capacity building in emerging innovative methods and technologies within our area of expertise including leveraging satellite imagery to improve carbon accounting.

We believe that this is an important project with the potential for high impact across the globe and is mutually beneficial to all partners involved. As Director of Research, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort.

Name: Peter Sanful PhD

Title: Director of Research

Institution name: University of Energy and Natural Resources

Institution Address: P. O Box 214 Sunyani, Ghana

Signature:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Peter Sanful PhD".



Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

This letter attests our support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If funded, PANGEA will advance data, methods, applications, training gaps/needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. The field campaign will contribute to understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are aligned with U.S. Forest Service International Programs work on sustainable forest management and biodiversity conservation internationally.

U.S. Forest Service International Programs has had long term technical cooperation in the Amazon and Central Africa that has been supported by USAID, Department of State and other donors. U.S. Forest Service International Programs activities include both specific cooperation with countries in the South America and Africa regions as well as pantropical programs such as SilvaCarbon to enhance capacity of tropical forested countries to monitor, measure, and report carbon in their landscapes.

PANGEA is an exciting mission and will advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regimes. As the Director of International Programs, I confirm my support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign.

Sincerely,

Valdis

Digitally signed
by Valdis Mezainis
Date: 2024.11.22
08:30:34 -05'00'

Val Mezainis, PhD



INTERNATIONAL PROGRAMS | OFFICE OF THE CHIEF

Director
Forest Service
International Programs
Office of the Chief
201 14th Street SW, Stop 1127
Washington DC 20250-1127



01 BP 526, Cotonou, Bénin
Tel : + 229 21 36 11 19
www.uac.bj



Abomey-Calavi, 28 November 2024

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles, USA

Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

This is to express my strong support for the proposed NASA PANGEA (**PANtropical Investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation**) Terrestrial Ecology Field Campaign. The idea developed is relevant to advance our understanding of biogeochemical cycles in tropical forests, their dynamics and their feedbacks with climate, biodiversity, and human agricultural related activities. PANGEA will be also valuable in completing and reinforcing national and international collaborative research activities led currently by our research group. These are LMI REZOC a bilateral laboratory between INE (National Institute for Water) of University Abomey-Calavi (UAC) in Bénin and IGE (Institute of Geoscience and Environment, Grenoble, France); and AMMA-CATCH a regional hydro-meteorological observatory. This observatory has been monitoring since more than ten years water vapor, carbon dioxide fluxes as well weather data across ecosystems spanning from the South to the North of Bénin and Dr. Ossénatou Mamadou is the leader of the beninese flux sites.

Considering that Bénin has a large part of its territory covered by forest, culture and plantations, PANGEA will clearly help to elucidate how land use and land cover changes affect biogeochemical gas fluxes and forest dynamics using ground base data, drone, and remote

sensing products in one of the most understudied regions of West Africa. Bénin is also at the frontier between two large tropical forested ecosystems (the Dahomey Gap), between Guinean and the Central African equatorial forests which offers an unique opportunity for developing a comprehensive understanding of beninese ecosystems.

Our research group has a keen interest and is enthusiastic about PANGEA's vision to combine observation data and multidisciplinary tools, approaches to co-produce and co-create knowledge by engaging local communities. This corroborates with our objectives to promoting scientific collaboration, building capacity for research and monitoring, nurturing the next generation of scientists, developing innovative results applicable to inform climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, ecosystem water-related services, and sustainable land-use practices.

We guarantee that if the PANGEA is funded, our research group, the LMI REZOC and AMMA-CATCH Benin team can offer logistical support across our three sites to validate and improve satellite-derived measurements. LMI REZOC will also directly support these activities through triggering funds and sharing of expertise with the AMMA-CATCH technical staff, permanent in Benin, to survey and collect data of the three sites. We will also provide our long term existing data to collaborate on PANGEA-related studies, which would benefit from dedicated research funding. Finally, we aim to expand opportunities for young beninese scientists by supporting their participation in Master's and Ph.D. programs that utilize flux towers data.

As a local principal investigator of beninese flux sites, I express my undeniable support for this campaign. Finally, we look forward to the possibility of contributing to PANGEA and are persuaded that this collaboration will generate impactful societal results for our country.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Ossénatou MAMADOU".

Ossénatou MAMADOU, PhD
Associate Professor, IMSP/UAC
Leader of the WAF-Net (West Africa Flux Network)



WCS

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly contribute to the aims of the Wildlife Conservation Society's (WCS) Forests & Climate Change Program.

Established in 1895, WCS is a global 501 non-governmental organization committed to saving wildlife and wild places around the world. WCS leads active projects in more than 50 countries and more than 500 project locations around the world. WCS' Forests and Climate Change Program works to safeguard the long-term integrity of the tropical forest carbon sink, and leads the development of the HIFOR nature finance initiative to scale investments in these climate-critical ecosystems (www.hifor.org).

Several of PANGEA's goals align closely with WCS' priorities, particularly in the development of a broader understanding of risks to the tropical land sink, how these risks vary over space and time, and the determinants of sink dynamics. PANGEA's planned activities will illuminate crucial relationships between tropical forest integrity, biodiversity, anthropogenic pressures, and resistance and resilience to climate variability that will inform WCS' efforts to implement effective, durable, and equitable forest conservation solutions. We are therefore eager to support PANGEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches to fill these knowledge gaps.

WCS currently collaborates with community, civil society, and government partners on the development, piloting, and scaling of HIFOR nature finance in more than 50 countries. Our partnerships and the unique qualities of these ecosystems may be of strategic importance to PANGEA's objectives, as our shared expertise and WCS's longstanding regional experience will provide strong local support for PANGEA's implementation.

If PANGEA is selected, WCS can provide in-kind support, including data -sharing and assistance with local logistics. Our team is also prepared to explore collaborative funding opportunities to participate in PANGEA-related research and applications activities.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As the Executive Director of the Forests and Climate Change Program at WCS, I offer my full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared climate and biodiversity conservation goals.

Sincerely,

Signed by:

 3407CE162A204FE

Daniel J. Zarin, Ph.D.
 Executive Director, Forests and Climate Change

November 29, 2024

Dr. Elsa Ordway
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology
University of California Los Angeles
410K Botany Building
Los Angeles, CA, 90095
USA

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

I am writing to convey my strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will address essential gaps in data, methodology, and training, advancing our ability to measure, understand, and scale carbon cycle dynamics in tropical forests and their interactions with biogeochemical cycles, biodiversity, climate change, disturbance events, and human activities. PANGEA will also strengthen and enhance tropical forest conservation initiatives in the Democratic Republic of Congo and Brazil led by the Woodwell Climate Research Center (Woodwell Climate).

Woodwell Climate Research Center conducts science for solutions at the nexus of climate, people and nature. We partner with leaders and communities for just, meaningful impact to address the climate crisis. For nearly 40 years, we have combined hands-on experience and policy impact to identify and support societal-scale solutions that can be put into immediate action. Woodwell Climate was established in 1985 as the Woods hole Research Center. To achieve our objectives, Woodwell Climate conducts basic and applied research on the biophysical, economic, and social systems affecting tropical forest and land use dynamics in the Amazon (since 1985) and Congo (since 2008) Basins.

The Tropics team at Woodwell Climate see several aligned efforts and goals between Woodwell and PANGEA, in particular tropical forest and carbon cycle resilience and the role of biodiversity in maintaining healthy forests. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Woodwell Climate conducts its research with local partners/institutions such as the Amazon Environmental Research Institute in Brazil (IPAM), the Congo Regional Post-Graduate Training School on Integrated Management of Tropical Forests and Lands ([ERAIFT](#)), and Congo Basin Water Resources Research Center ([CRREBaC](#)). We carry out this work in mixed use landscapes consisting of native forest, large scale industrial agriculture, traditional uses, and cattle pasture. The remaining forests in these regions contain the bulk of the world's terrestrial biodiversity and play a crucial but still not well understood role in regulating our climate. These partnerships and locations may be of strategic



**Woodwell
Climate
Research
Center**

149 Woods Hole Road
Falmouth, MA 02540-1644

woodwellclimate.org
508 540 9900

info@woodwellclimate.org

importance to PANGEA because of long term research programs and well-established connections to local research, community organisations, and policy management institutions. Woodwell Climate's deep experience in these landscapes and on these topics can facilitate PANGEA's implementation by supporting research, training, and capacity building.

If PANGEA is selected to move forward, Woodwell Climate can provide in-kind support in the form of internal grants and grants to our institution from private foundations and individuals to support participation in PANGEA-related research activities.

While Woodwell Climate excels at collecting and analyzing ground-based and satellite data, strengthening capacity of local students, researchers, and land managers, we seek to engage in leveraging satellite imagery to improve our understanding of the processes of forest degradation and the overall importance of forests for climate and agricultural productivity.

We believe that PANGEA is an important project with the potential for high impact. As Director of the Tropics Program, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common interest.

Michael T. Coe

A handwritten signature in black ink that reads "Michael T. Coe".

Director of the Tropics Program
Woodwell Climate Research Center
149 Woods Hole Rd, Falmouth, MA, 02540

Subject:

Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly benefit our Global Forest Watch and Land & Carbon Lab's initiatives, as led by the World Resources Institute (WRI).

WRI is a non-profit environmental think tank, incorporated under the laws of Delaware, USA, that goes beyond research to create practical ways to protect the earth and improve people's lives. WRI is committed to move human society to live in ways that protect Earth's environment and its capacity to provide for the needs and aspirations of current and future generations.

Our team pursues the development of high-quality information about land and its associated values (e.g. carbon, biodiversity) and make these universally accessible and useful for people worldwide, so as to empower them to manage landscapes sustainably and improve the livelihoods of local people through active projects in Food Land & Water Department especially Global Forest Watch and Land & Carbon Lab.

Several of PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at WRI, particularly the Land & Carbon Lab and Global Forest Watch of improved land cover data, land cover changes and the impacts of these changes on biodiversity, carbon and people. We are eager to work with PANGEA to share our data, work in cooperation to develop new data, scale PANGEA data on our platforms, help get data used in our wide network and cooperate on advances in Earth observation capabilities and collaborative multidisciplinary approaches to understanding tropical forest, peatland, and wetland responses to global environmental change.

WRI currently collaborates on Global Forest Watch and the Land & Carbon Lab with many local and international partners as the University of Maryland, University of Minnesota, Purdue University, Cornell university, Wageningen University, German Research Centre for Geosciences, NASA,



WORLD
RESOURCES
INSTITUTE

10 G Street, NE Suite 800 Washington, DC 20002 USA (PH) +1 (202) 729-7600 (FAX) +1 (202) 729-7610
Www.WRI.org

Google, Meta and international partners including ESA, IFPRI, World Bank and UN FAO. WRI's deep experience developing breakthroughs in geospatial mapping that power local-to-global solutions by making those capabilities accessible will provide critical support for PANGEA's translation of science to action.

If PANGEA is selected, WRI can provide in-kind support through expertise, data sharing, partnership engagement and user testing. Our team is also prepared to explore funding opportunities to participate in PANGEA-related research and applications activities.

We see an opportunity for PANGEA's focus on advancing carbon, biodiversity, and agricultural remote-sensing capabilities in the tropics to further our goals, such as enhance crop-type/yield mapping, biodiversity assessments, carbon flux mapping and supporting supply chain traceability.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As Director of Partnership and Innovation for Land & Carbon Lab at WRI, we offer our full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared land, climate and biodiversity conservation goals.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Fred Stolle", is placed here.

Dr. Fred Stolle
Director Innovation & Partnership GFW/LCL
World Resources Institute
10 G street, NE, Suite 800, Washington DC, 20002,

B. Socios de PANGEA y actividades de participación

Tabla B-1. Resumen de las estrategias de participación y ejemplos de socios para cada grupo destinatario

| COMUNIDAD | DESCRIPCIÓN | RELEVANCIA PARA PANGEA | ESTRATEGIA Y OBJETIVOS DE COMPROMISO | EJEMPLOS DE SOCIOS |
|--|--|---|---|---|
| NASA | Programas de Investigación y Análisis de la NASA y Acción por la Tierra, Programa de Creación de Capacidades de la NASA e iniciativas de la NASA | La NASA es el motor de PANGEA | Avanzar en la comprensión científica, la calibración y la validación, el desarrollo de algoritmos y productos, las asociaciones y la creación de capacidades en toda la empresa de la NASA a través de un enfoque integrador. | <ul style="list-style-type: none"> Ecología terrestre, Diversidad biológica y conservación ecológica, Cambio en el uso de la tierra y ocupación del suelo (LCLUC) de la NASA, Hidrología Sistema de vigilancia del carbono, Clima y resiliencia, Catástrofes, Incendios forestales, Cosecha de la NASA, Recursos hídricos SERVIR, ARSET, DEVELOP, GLOBE, Iniciativa de los Pueblos Indígenas |
| OTRAS AGENCIAS GUBERNAMENTALES DE EE.UU. | Agencias federales de investigación y desarrollo no pertenecientes a la NASA | Numerosas agencias gubernamentales estadounidenses apoyan actividades de investigación y formación directamente relacionadas con PANGEA. | Coordinarse con los directores de programas para identificar oportunidades de licitaciones interinstitucionales en las que las actividades de investigación y aplicación sean mutuamente beneficiosas. | <ul style="list-style-type: none"> DOE NGEE-Trópicos NSF BIO, GEO, SBE, GOLD-EN, RISE USAID CARPE, USAID-PEER** Programa USFS-Internacional USGS SilvaCarbono |
| AGENCIAS ESPACIALES INTERNACIONALES E INSTALACIONES DE APOYO | Agencias espaciales ajenas a la NASA e institutos federales que apoyan el seguimiento de satélites y la capacidad técnica. | Estos socios colaboran activamente con la NASA en numerosas misiones por satélite y campañas aerotransportadas. PANGEA es una oportunidad para reforzar y ampliar estas asociaciones. | Apoyar la colaboración internacional en las misiones conjuntas y campañas aerotransportadas existentes; crear capacidad para apoyar un mayor compromiso entre la NASA y las agencias espaciales en los trópicos. | <ul style="list-style-type: none"> Observatorio Satelital de los Bosques de África Central (OSFAC) Agencia Espacial Gabonesa (AGEOS) Agencia Espacial Europea (ESA) Agencia Nacional Francesa del Espacio (CNES) Centro Aeroespacial Alemán (DLR) Organización de Investigación Espacial de la India (ISRO) Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales de Brasil (INPE) Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) |

| COMUNIDAD | DESCRIPCIÓN | RELEVANCIA PARA PANGEA | ESTRATEGIA Y OBJETIVOS DE COMPROMISO | EJEMPLOS DE SOCIOS |
|--|---|---|---|--|
| AGENCIAS GUBERNAMENTALES EXTRANJERAS E INSTITUTOS NACIONALES DE INVESTIGACIÓN | Ministerios sectoriales nacionales y locales; instituciones especializadas en geoespacial; plataformas de múltiples partes interesadas dirigidas por el gobierno. | Estos socios adoptan medidas a gran escala (planificación y modelización económica y medioambiental, aplicación de la ley, inversión en investigación, etc.) y apoyan los datos y análisis a largo plazo (por ejemplo, meteorología). | Informar las cuestiones y actividades científicas de PANGEA a través de instituciones de investigación; establecer condiciones propicias (institucionales, financieras y programáticas) para la apropiación de los resultados de la investigación de PANGEA; capacitación del personal a escala nacional y local. | <ul style="list-style-type: none"> Brasil Instituto Nacional de Investigaciones de la Amazonía (INPA) Observatorio Nacional del Cambio Climático de Camerún (ONACC) Asociación Forestal de la Cuenca del Congo (CBFP) Centro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Gabón (CENAREST) Grupo de Trabajo de Gobernadores sobre Clima y Bosques (GCF-TF) Ministerios de Medio Ambiente, Bosques, Fauna, Agricultura e Investigación Científica Mancomunidad Regional Amazónica peruana Fundación para la Investigación de São Paulo (FAPESP) |
| INSTITUCIONES CIENTÍFICAS | Universidades y escuelas superiores; laboratorios nacionales; institutos de investigación | Estos socios facilitan la transferencia de conocimientos y tecnología para generar capacidad en las instituciones locales y regionales con el fin de formar a la próxima generación de científicos. | Co-desarrollará investigación, análisis y aplicaciones con estos socios, y reforzará la capacidad local de investigación apoyando la gestión de datos, el desarrollo de infraestructuras y la formación de investigadores novedosos en instituciones locales y regionales. | <ul style="list-style-type: none"> Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt Alianza Bioversity International & CIAT Instituto Tecnológico de Amazonas (AmiT) Instituto de la Cuenca del Congo (CBI) Instituto Nacional francés de Investigación Agronómica, Alimentaria y Medioambiental (INRAE) Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA) K. Lisa Yang Centro de Bioacústica para la Conservación LBA Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) Centro Woodwell de Investigación Climática |

| COMUNIDAD | DESCRIPCIÓN | RELEVANCIA PARA PANGEA | ESTRATEGIA Y OBJETIVOS DE COMPROMISO | EJEMPLOS DE SOCIOS |
|---|--|--|---|--|
| INICIATIVAS INTERNACIONALES COORDINADAS DE INVESTIGACIÓN | Consorcios de investigación; redes; redes de redes | Estos socios trabajan a grandes escalas que se alinean con los objetivos transdisciplinarios y pantropicales de PANGEA. | Alinear los esfuerzos con estos socios para garantizar que las actividades de PANGEA cubran estratégicamente las lagunas necesarias en lugar de duplicar esfuerzos. | <ul style="list-style-type: none"> Alianza para la Ciencia de los Bosques Tropicales (ATFS) AndesFlux ASCEND Iniciativa Científica de la Cuenca del Congo (CBSI) CongoFlux Redes regionales FLUXNET (por ejemplo, AmeriFlux, ICOS, AsiaFlux) GEO-TREES Guyafor Guyaflux Iniciativa "Una visión forestal" (OFVi) Red Flux de África Occidental |
| ORGANIZACIONES DE LA SOCIEDAD CIVIL | Organizaciones no gubernamentales (ONG) nacionales e internacionales e iniciativas de investigación no gubernamentales con presencia en los países objetivo. | Estos socios facilitan la consolidación de conocimientos sobre carbono, biodiversidad y sistemas socioecológicos; traducen los resultados de la investigación en campañas y acciones dirigidas por las OSC | Coproducir aplicaciones que aprovechen los avances científicos y técnicos de PANGEA. | <ul style="list-style-type: none"> Conservación Internacional CTrees Instituto de Recursos Mundiales (incluidos Global Forest Watch y Land and Carbon Lab) MapaBiomass Organización para la Conservación de los Pequeños Mamíferos |

| COMUNIDAD | DESCRIPCIÓN | RELEVANCIA PARA PANGEA | ESTRATEGIA Y OBJETIVOS DE COMPROMISO | EJEMPLOS DE SOCIOS |
|---|---|--|--|---|
| ALIANZAS Y ORGANIZACIONES DE PUEBLOS INDÍGENAS Y COMUNIDADES LOCALES | Organizaciones y alianzas lideradas por pueblos indígenas, comunidades locales y mujeres activas en los países objetivo. | Estos socios están conectados con las comunidades, líderes y socios pertinentes en los países objetivo | Diseñar conjuntamente cuestiones científicas y aplicaciones que afecten directamente a los pueblos indígenas y las comunidades locales, a las mujeres y a otros grupos; diseñar conjuntamente las actividades de las campañas terrestres y aéreas en los territorios y las comunidades locales; impartir formación para capacitar a los pueblos indígenas y las comunidades locales en la recogida de datos, la investigación y la comunicación. | <ul style="list-style-type: none"> Alianza Global de Comunidades Territoriales Iniciativa de Derechos y Recursos Escuela del CBI para el Conocimiento Indígena y Local (SILK) Dinámica de las Agrupaciones de Pueblos Autóctonos (DGPA-RDC) |
| COMUNIDAD DE DONANTES | Donantes clásicos (bilaterales, fundaciones familiares, organizaciones filantrópicas) Agencias especializadas (geoespaciales) de los países donantes | Estos socios consiguen financiación complementaria que ofrece apoyo específico para ampliar PANGEA más allá del apoyo financiero de la NASA. | Centrar la inversión en el desarrollo de aplicaciones y productos PANGEA, el apoyo a los colaboradores internacionales, los talleres conjuntos y el desarrollo de herramientas de recopilación y gestión de datos IPLC. | <ul style="list-style-type: none"> Fondo Bezos para la Tierra Fundación Ford Donantes particulares Fundación Mellon Fundación Moore Agencia Noruega de Cooperación para el Desarrollo (Norad) Iniciativa Internacional de Noruega sobre el Clima y los Bosques (NICFI) |
| SECTOR PRIVADO | Agronegocios, industrias extractivas, empresas energéticas, empresas de big data, instituciones de inversión y empresas de ecoturismo. | Estos socios son importantes responsables de la acción y la toma de decisiones, con repercusiones de gran alcance. | Trabajar en estrecha colaboración con la NASA y los socios de aplicaciones para determinar las estrategias más adecuadas para colaborar con el sector privado en la producción de diversas aplicaciones. | <ul style="list-style-type: none"> Mesa redonda sobre aceite de palma, cacao, soja y biomateriales sostenibles Unilever Olam Recursos ecológicos CNaught Equidad del carbono Capital para créditos de carbono |

| COMUNIDAD | DESCRIPCIÓN | RELEVANCIA PARA PANGEA | ESTRATEGIA Y OBJETIVOS DE COMPROMISO | EJEMPLOS DE SOCIOS |
|--------------------------------------|---|---|---|--|
| AGENCIAS INTERGUBERNAMENTALES | Organizaciones compuestas por múltiples gobiernos soberanos que colaboran para abordar problemas comunes, desarrollar políticas y coordinar acciones a escala regional o mundial. | Estos socios proporcionan evaluaciones autorizadas y con base científica que fundamentan las decisiones políticas mundiales y orientan los esfuerzos internacionales para combatir el cambio climático y promover el desarrollo sostenible y un planeta resiliente. | Mantenerse al día sobre los informes de evaluación y las actividades para garantizar que los resultados científicos y las aplicaciones de PANGEA puedan utilizarse eficazmente. | <ul style="list-style-type: none"> • Comité de Satélites de Observación de la Tierra (CEOS) • Grupo de Observación de la Tierra (GEO) • Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) • Plataforma intergubernamental científico-normativa sobre diversidad biológica y servicios de los ecosistemas (IPBES) • Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) • Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) |

* DOE NGEE-Tropics está entrando en la Fase 3 y finalizará cuando comience PANGEA, permitiendo una continuidad importante en la limitación de la incertidumbre del modelo y los esfuerzos de integración de datos-modelos.

** USAID PEER va a ser sustituido por un nuevo programa llamado SPARK.

C. Participación durante el estudio exploratorio

La campaña de exploración de PANGEA fue un esfuerzo de colaboración en el que participaron más de 800 personas de 396 instituciones de más de 60 países de los 5 continentes (**Tabla C-1**) a través de (1) grupos de trabajo internacionales, (2) breves eventos de intercambio de información, (3) talleres consultivos de varios días y (4) reuniones bilaterales con socios potenciales. La labor de definición del alcance de PANGEA comenzó en noviembre de 2023, con un seminario web inicial. A continuación se describen las actividades que siguieron en 2024.

Grupos de trabajo internacionales

Más de 200 personas participaron en al menos una de las más de 60 sesiones de las reuniones de los grupos de trabajo de PANGEA, organizadas virtualmente por los colíderes de los grupos de trabajo. Al inicio de la campaña, siete grupos de trabajo diferentes solicitaron aportaciones de la comunidad científica y de otros sectores:

- Retroalimentaciones e interacciones climáticas: 158 compromisos
- Ciclos biogeoquímicos y dinámica del carbono: 155 compromisos
- Estructura, función y biodiversidad de los ecosistemas: 101 compromisos
- Sistemas socioecológicos: 91 compromisos
- Modelización y síntesis de datos: 141 contratos
- Compromiso con la comunidad y aplicaciones de investigación: 110 compromisos
- Viabilidad: 79 compromisos

Los compromisos se definen para registrar la asistencia única de un participante a una única reunión del Grupo de Trabajo. Por ejemplo, tres participantes únicos en la misma reunión o un participante único en tres reuniones consecutivas tienen el mismo peso como 3 compromisos. Por lo tanto, esta definición capta una amplia gama de interacciones con los participantes del Grupo de Trabajo que representa mejor la combinación de contribuciones en línea y fuera de línea al desarrollo de los temas y objetivos del Grupo de Trabajo.

El grupo de trabajo Participación de la Comunidad y Aplicaciones de la Investigación (CERA) estaba formado principalmente por estudiantes, investigadores y profesores de instituciones académicas, profesionales de organizaciones no gubernamentales e intergubernamentales y algunos representantes del sector privado. Al igual que los demás grupos de trabajo de PANGEA, la participación en CERA era abierta y se anunciaba en Internet, en los actos de PANGEA y "de boca en boca". Aproximadamente 100 personas se inscribieron en el grupo de trabajo del CERA y participaron en una o más de las 12 reuniones del CERA celebradas en línea y/o contribuyeron a los documentos de colaboración del equipo. Muchos miembros también participaron en sesiones relacionadas con el CERA en los talleres de varios días de PANGEA en Camerún, Estados Unidos, Brasil y Perú.

Actos de intercambio de información

El equipo directivo de PANGEA se relacionó con cientos de personas a través de doce actos de intercambio de información celebrados en los cinco continentes. Estos eventos incluyeron sesiones de presentación y debate de 1 -a 2 horas- en conferencias académicas internacionales, seminarios web, eventos regionales y reuniones especiales organizadas por la comunidad PANGEA.

Una parte importante del proceso de definición del alcance de PANGEA fue la participación de las comunidades indígenas en el proceso de definición del alcance para debatir sobre la ciencia coproducida, la soberanía de los datos, los intereses en la formación y otros aspectos importantes del proceso. Dado que los países concretos en los que se centrará PANGEA no se determinarán hasta el desarrollo del Plan Experimental Conciso, la participación inicial se centró en las organizaciones fronterizas, las alianzas y los líderes comunitarios. Una de las principales organizaciones que participó en la definición del alcance de PANGEA fue la Alianza Global de Comunidades Territoriales. Se celebraron reuniones periódicas con los dirigentes de la GATC, incluidos los líderes de los movimientos de mujeres y jóvenes dentro de la GATC. Estas reuniones se celebraron siempre con interpretación y los documentos y correos electrónicos se compartieron en inglés, francés, español, portugués y brasileño. En la COP16 se celebró una reunión en persona con varios miembros del GATC para seguir debatiendo sobre PANGEA e identificar los pasos a seguir en caso de que se seleccione PANGEA. En enero se celebrará una reunión de seguimiento con la dirección del GATC para hacer un balance del año de evaluación. También se celebraron reuniones con la Iniciativa para los Derechos y Recursos (RRI, por sus siglas en inglés), cuyo trabajo se centra en capacitar e implicar a los pueblos indígenas, los pueblos afrodescendientes, las comunidades locales y las mujeres de estas comunidades. Además, PANGEA celebró un Taller con Comunidades Indígenas en Panamá, que reunió a 12 participantes y representantes de los territorios Embera, Wounaan y Guna en el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales el 26 de abril de 2024. La reunión híbrida en persona y en línea fue coorganizada virtualmente por el Equipo de Liderazgo de PANGEA y asistieron 10 participantes adicionales de Zoom de 7 países. Si PANGEA es seleccionada, sin duda habrá más comunidades con las que colaborar en los paisajes de PANGEA. Sin embargo, este trabajo sienta las bases a partir de las cuales pueden florecer esas asociaciones.

Lista de actos de intercambio de información:

- **Asambleas públicas, presentaciones y simposios en conferencias:**
 - Unión Geofísica Americana (AGU) 2023 y 2024 (próximamente) - San Francisco, CA, y Washington DC
 - Asociación para la Biología Tropical y la Conservación (ATBC) - Kigali, Ruanda, julio de 2024
 - Presentación de la 20^a Reunión de las Partes de la Asociación Forestal de la Cuenca del Congo (CBFP) - Kinshasa, República Democrática del Congo (junio de 2024)
 - Sociedad Ecológica de América (ESA) - Long Beach, CA
 - Unión Geofísica Europea (EGU) - Viena, Austria (abril de 2024)

- Programa Global de Tierras (GLP) (próximo 5 de noviembre de 2024) - Oaxaca, México
- Unión Internacional de Organizaciones de Investigación Forestal (IUFRO) - Estocolmo, Suecia
- Reunión de la NASA sobre Diversidad Biológica y Conservación Ecológica en Maryland, mayo de 2024
- Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Simposio del Centenario de la Isla de Barro Colorado (BCI 100) - Gamboa, Panamá (junio de 2024)
- **Ayuntamientos virtuales:**
 - PANGEA - ayuntamientos abiertos a todos
 - PANGEA - grupo de trabajo específico ayuntamientos
 - Ayuntamiento en línea de la AEE (marzo de 2024)
- **Talleres más pequeños:**
 - Sesión virtual sobre la mujer africana para poner de relieve la investigación dirigida por mujeres en África Central (abril de 2024)
 - Reunión con comunidades indígenas en Panamá (abril de 2024)
 - Reunión de SBG Collab con socios indígenas y comunitarios (junio de 2024)
 - Semana de los Mamólogos Negros con científicos negros (20 de septiembre de 2024)
 - Reuniones periódicas con los líderes de la Alianza Global de Comunidades Territoriales (GATC) (julio-noviembre de 2024)
- **Reuniones del equipo científico de la NASA:**
 - ECOSTRESS
 - EMIT
 - GEDI
 - OCO
 - SBG
 - SMAP

Talleres consultivos de varios días

El equipo directivo de PANGEA organizó cuatro talleres regionales de alcance de varios días de duración que incluyeron sesiones centradas en las mejores prácticas de participación comunitaria y en la demanda y las preferencias regionales para aplicaciones de investigación. Los talleres de alcance de PANGEA incluyen un evento de 3 días en Yaundé, Camerún, en febrero de 2024; un evento de 3 días en Washington, DC, en abril de 2024; un taller de 3 días en Manaos, Brasil, en mayo de 2024; y un taller de 2 días en Lima, Perú. Todos los eventos se organizaron en estrecha colaboración con socios locales de PANGEA que representan a la comunidad académica, organismos gubernamentales y organizaciones no gubernamentales. Las actividades del taller contaron con una nutrida asistencia de 263 participantes presenciales de 30 países en las consultas regionales celebradas en Camerún (90), Washington DC (103), Panamá (10) y Lima (60).

Cuando el equipo y la agenda lo permitieron, estos eventos interactivos se extendieron a una audiencia virtual más amplia con la participación de 362 participantes virtuales adicionales de 33 países en las consultas regionales de Camerún (54), Washington DC (298) y Panamá (10). Todos los actos, salvo el taller de Manaos (Brasil), contaron con servicios de interpretación para personas de habla no inglesa.

El taller de Camerún, celebrado los días 21 y 22 de febrero de 2024 en el Hotel Mont Fébé, reunió a 90 participantes de 16 países que asistieron al evento organizado conjuntamente por el CIFOR, el IITA y la Universidad local de Yaundé. A las sesiones híbridas se sumaron otros 54 participantes del Zoom. Al taller de DC, celebrado del 9 al 11 de abril de 2024 en la sede de la AGU, asistieron 103 participantes de 16 países. El taller, totalmente híbrido, incluyó el diálogo y la participación de 297 participantes de Zoom a lo largo de los 3 días que duró el evento. El Taller de Lima, celebrado los días 3 y 4 de junio de 2024 en el Centro Cultural de la PUCP, contó con 60 participantes de 8 países. El taller de Lima se celebró en colaboración con el Grupo de Trabajo de Gobernadores sobre el Clima y los Bosques (GCF-TF) y fue una oportunidad importante para contar con una asistencia al taller más o menos igual de científicos y responsables políticos. Gobernadores de todo Perú, Colombia, Bolivia, Brasil y Ecuador estuvieron presentes en la reunión, que proporcionó una valiosa información sobre el potencial de los resultados de PANGEA en la Amazonía.

Lista de talleres consultivos de varias jornadas de PANGEA:

- Consulta regional africana Taller de 3 días, Yaundé, Camerún, febrero de 2024
- Taller de tres días sobre el alcance de PANGEA, Washington, DC, abril de 2024
- Taller de 4 días sobre el clima amazónico, Manaos, Brasil, mayo de 2024
- PANGEA/Governors' Climate & Forests Task Force (GCFTF) Taller regional americano de 2 días en Lima, Perú, junio 2024
- Consulta regional de Asia mediante la participación en el taller SERVIR de 3 días de duración, Bangkok, Tailandia, julio, 2024

Reuniones bilaterales con posibles socios de PANGEA

El equipo directivo de PANGEA y los miembros del grupo de trabajo de CERA celebraron reuniones bilaterales con cientos de socios potenciales de PANGEA, entre los que se encontraban agencias federales estadounidenses, la Agencia Espacial Europea, SERVIR, empresas privadas, institutos de investigación estadounidenses e internacionales, organizaciones conservacionistas, ministerios gubernamentales y otros. Las organizaciones e instituciones se enumeran en **la Tabla C-1**. Muchos socios (n=58) han compartido cartas de apoyo para confirmar su interés en colaborar en el programa PANGEA (si se financia).

Tabla C-1. Todas las organizaciones e instituciones que participaron en el proceso de definición del alcance del PANGEA.

OSC: Organización de la Sociedad Civil

| # | ORGANIZACIÓN/INSTITUCIÓN | TIPO |
|---|--|-------------|
| 1 | Universidad de Aarhus (Dinamarca) | Universidad |
| 2 | ACCA: Conservación del Amazonas (Perú) | CSO |

| # | ORGANIZACIÓN/INSTITUCIÓN | TIPO |
|----|--|---------------|
| 3 | ADC: Asociación Acción para el Desarrollo Comunitario (Camerún) | CSO |
| 4 | ADPC: Centro Asiático de Preparación para Desastres | CSO |
| 5 | Red Medioambiental Africana | CSO |
| 6 | AGEOS: Agencia de Estudios y Observaciones Espaciales (Gabón) | Gobierno |
| 7 | AGU: Unión Geofísica Americana | Sociedad |
| 8 | Universidad Akamai | Universidad |
| 9 | Universidad de Akdeniz (Turquía) | Universidad |
| 10 | Alianza Biodiversidad - CIAT: Alianza de Bioversity International y el Centro Internacional de Agricultura Tropical (Italia) | CSO |
| 11 | AmiT: Instituto Amazónico de Tecnología (Brasil) | CSO |
| 12 | Anawakalmekak | Escuela K-12 |
| 13 | ANI: Fundación Inversora Africa Nature (Nigeria) | Donante |
| 14 | Conexión Arbimon/Rainforest | CSO |
| 15 | ARES: Centro Aerotransportado de Investigación del Sistema Terrestre | Universidad |
| 16 | ASU: Universidad Estatal de Arizona | Universidad |
| 17 | ATBC: Asociación de Biología Tropical y Conservación | Sociedad |
| 18 | BAERI: Instituto de Investigación Medioambiental del Área de la Bahía | CSO |
| 19 | Fondo Bezos para la Tierra | Donante |
| 20 | BHI: Biodiversity Hub International (Centro Internacional de Biodiversidad) | CSO |
| 21 | Mamíferos negros | CSO |
| 22 | Universidad de Boston | Universidad |
| 23 | Caltech: Instituto de Tecnología de California | Universidad |
| 24 | Universidad Calvin | Universidad |
| 25 | Ministerio de Medio Ambiente de Camerún | Gobierno |
| 26 | CAPC-AC: Centro de Aplicación y Previsión del Clima en África Central (Unión Africana) | Multilateral |
| 27 | Carboneers (Países Bajos) | Investigación |
| 28 | Institución Carnegie para la Ciencia | CSO |
| 29 | Instituto Cary de Estudios Ecosistémicos | CSO |
| 30 | CBCS: Sociedad de Conservación de la Cuenca del Congo (Rep. Dem. del Congo) | CSO |
| 31 | CDB: Convenio sobre la Diversidad Biológica | Multilateral |
| 32 | CBFP: Asociación Forestal de la Cuenca del Congo | Multilateral |
| 33 | CBI: Instituto de la Cuenca del Congo | Multilateral |
| 34 | CBSI: Iniciativa Científica de la Cuenca del Congo | Multilateral |
| 35 | CEAS: Centro de Estudios para una Amazonía Sostenible | CSO |
| 36 | CEEAC: Comunidad Económica de los Estados de África Central (Unión Africana) | Multilateral |
| 37 | CENAREST: Centro Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (Gabón) | Gobierno |
| 38 | CEW: Observatorio del Medio Ambiente de Camerún (Camerún) | CSO |
| 39 | GCIAL: Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional | CSO |
| 40 | Universidad de Chapman | Universidad |
| 41 | CI: Conservación Internacional | CSO |
| 42 | CICERO: Centro de Investigación Internacional sobre el Clima y el Medio Ambiente de Oslo (Noruega) | CSO |
| 43 | CIFOR-ICRAF: Centro de Investigación Forestal Internacional y Agroforestal Mundial. | CSO |
| 44 | CIRAD: Centro de Investigación Agrícola para el Desarrollo Internacional (Francia) | CSO |
| 45 | CIRES: Instituto Cooperativo de Investigación en Ciencias Medioambientales | CSO |
| 46 | CIRMF: Centro Internacional de Investigaciones Médicas de Franceville | CSO |

| # | ORGANIZACIÓN/INSTITUCIÓN | TIPO |
|----|---|-------------------|
| 47 | Reloj climático RDC (Rep. Dem. del Congo) | CSO |
| 48 | Enfoque climático | Industria privada |
| 49 | CMEC: Capacidades Coordinadas de Evaluación de Modelos | CSO |
| 50 | CNPq: Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Brasil) | Gobierno |
| 51 | CoEB: Centro de Excelencia en Biodiversidad y Gestión de Recursos Naturales (Ruanda) | CSO |
| 52 | Universidad de William & Mary | Universidad |
| 53 | Universidad de Columbia | Universidad |
| 54 | COMIFAC: Comisión Forestal del África Central | Multilateral |
| 55 | Acción Congoleña por la Naturaleza (Rep. Dem. del Congo) | CSO |
| 56 | Ejido Forestal Cordón Grande (Méjico) | CSO |
| 57 | Universidad de Cornell | Universidad |
| 58 | CRDPI: Centro de Investigación sobre Productividad y Sostenibilidad de las Plantaciones Industriales (Rep. del Congo) | CSO |
| 59 | CSU: Universidad Estatal de Colorado | Universidad |
| 60 | CTrees | CSO |
| 61 | CUNY: Universidad de la Ciudad de Nueva York | Universidad |
| 62 | Universidad Denis Sassou Nguesso (Rep. del Congo) | Universidad |
| 63 | DOE: Departamento de Energía de EE.UU. | Gobierno |
| 64 | Universidad de Duke | Universidad |
| 65 | Universidad de Carolina del Este | Universidad |
| 66 | Eco-Consult | Industria privada |
| 67 | EcoAgricultura | CSO |
| 68 | Marca Ecobed Biotech | Industria privada |
| 69 | EDA: Activar la acción de desactivación | CSO |
| 70 | EEZA: Estación Experimental de Zonas Áridas (España) | CSO |
| 71 | EGU: Unión Geofísica Europea | Sociedad |
| 72 | Embrapa: Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Brasil) | Gobierno |
| 73 | Universidad de Emory | Universidad |
| 74 | ENEF-Gabón: Escuela Nacional de Aguas y Bosques de Gabón (Gabón) | Gobierno |
| 75 | ERAIFT: Escuela Regional de Posgrado en Gestión Integrada de Bosques y Tierras Tropicales (Rep. Dem. del Congo) | Universidad |
| 76 | ESA: Sociedad Ecológica de América | Sociedad |
| 77 | ESA: Agencia Espacial Europea | Gobierno |
| 78 | ESRI: Environmental Systems Research Institute, Inc. | Industria privada |
| 79 | ETH Zúrich: Escuela Politécnica Federal de Zúrich (Suiza) | Universidad |
| 80 | FAP: Fuerza Aérea del Perú | Gobierno |
| 81 | FAPEAM: Fundación de Investigación del Amazonas (Brasil) | Gobierno |
| 82 | FAPESP: Fundación para la Investigación de São Paulo (Brasil) | Gobierno |
| 83 | FAPESPA: Fundación de Investigación de Pará (Brasil) | Gobierno |
| 84 | Primera Universidad Técnica, Ibadán (Nigeria) | Universidad |
| 85 | Universidad Atlántica de Florida | Universidad |
| 86 | Universidad del Estado de Florida | Universidad |
| 87 | Fundación Eboko | CSO |
| 88 | ForestGEO | CSO |
| 89 | ForestPlots.net | CSO |
| 90 | FRMi: Gestión de Recursos Forestales, Inc. | Industria privada |

| # | ORGANIZACIÓN/INSTITUCIÓN | TIPO |
|-----|---|-------------------|
| 91 | FSC: Consejo de Administración Forestal | CSO |
| 92 | FUPRO: Organización nacional de productores de anacardos (Benín) | CSO |
| 93 | GADD: Grupo de Apoyo al Desarrollo Sostenible (Camerún) | CSO |
| 94 | GATC: Alianza Global de Comunidades Territoriales | Multilateral |
| 95 | GCF-TF: Grupo de Trabajo de Gobernadores sobre Clima y Bosques | Multilateral |
| 96 | GEO-TREES | Multilateral |
| 97 | GEOGLAM: Grupo sobre Observaciones de la Tierra Iniciativa Mundial de Seguimiento de la Agricultura | CSO |
| 98 | Geoindigena | CSO |
| 99 | Universidad George Mason | Universidad |
| 100 | Instituto de Tecnología de Georgia | Universidad |
| 101 | GFZ-Potsdam: Centro Alemán de Investigación en Geociencias | Universidad |
| 102 | Universidad de Gante (Bélgica) | Universidad |
| 103 | GLP: Programa Global de Tierras | Sociedad |
| 104 | Google | Industria privada |
| 105 | Guna | CSO |
| 106 | Universidad de Harvard | Universidad |
| 107 | HMEI: Instituto Medioambiental de los Altos Prados de Princeton | Universidad |
| 108 | Universidad Howard | Universidad |
| 109 | IBAY-SUP: Instituto Superior de Ciencias Medioambientales | Universidad |
| 110 | ICOS: Sistema Integrado de Observación del Carbono | Multilateral |
| 111 | IFA-Yangambi: Instituto Facultativo de Ciencias Agronómicas de Yangambi | CSO |
| 112 | IIAP: Instituto de Investigación de la Amazonía Peruana (Perú) | CSO |
| 113 | IITA: Instituto Internacional de Agricultura Tropical | CSO |
| 114 | ILAMB: Evaluación Comparativa Internacional de Modelos Terrestres | CSO |
| 115 | INDEFOR-AP: Instituto Nacional de Desarrollo Forestal y Manejo del Sistema de Áreas Protegidas, Guinea Ecuatorial | Gobierno |
| 116 | India Centro Nacional de Ciencias Biológicas | Gobierno |
| 117 | INPA: Instituto Nacional de Investigaciones de la Amazonía (Brasil) | Gobierno |
| 118 | INPE: Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (Brasil) | Gobierno |
| 119 | INRAE: Instituto Nacional de Investigación Agronómica, Alimentaria y Medioambiental (Francia) | Gobierno |
| 120 | INRS: Instituto Nacional de Investigación Científica (Canadá) | Universidad |
| 121 | Instituto Araguaia | CSO |
| 122 | Instituto Humboldt: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt | CSO |
| 123 | IPAM: Instituto de Investigación Ambiental de la Amazonía (Brasil) | CSO |
| 124 | IPBES: Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas | Multilateral |
| 125 | IPCC: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático | Multilateral |
| 126 | IRAD: Instituto de Investigación Agrícola para el Desarrollo (Camerún) | Gobierno |
| 127 | IRCCB: Centro Internacional de Referencia Chantal Biya (Camerún) | CSO |
| 128 | IRD: Instituto de Investigación para el Desarrollo (Francia) | Gobierno |
| 129 | IRIC: Instituto de Relaciones Internacionales de Camerún | CSO |
| 130 | ISDR: Instituto Superior de Desarrollo Rural de M'Baïki (República Centroafricana) | CSO |
| 131 | ISEA-Bengamisa: Instituto Superior de Estudios Agronómicos de Bengamisa (Rep. Dem. del Congo) | CSO |
| 132 | ISP-Gemena: Instituto Superior de Enseñanza de Gemena (Rep. Dem. del Congo) | CSO |

| # | ORGANIZACIÓN/INSTITUCIÓN | TIPO |
|-----|---|-------------------|
| 133 | ISTA: Instituto Superior de Técnicas Aplicadas (Rep. Dem. del Congo) | CSO |
| 134 | UICN: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza | Multilateral |
| 135 | Universidad James Cook (Australia) | Universidad |
| 136 | Instituto de Tecnología de Karlsruhe (Alemania) | Universidad |
| 137 | KU Lovaina: Universidad Católica de Lovaina (Bélgica) | Universidad |
| 138 | Universidad Estatal de Kwara (Nigeria) | Universidad |
| 139 | Labosystem s.r.l. (Italia) | Industria privada |
| 140 | LANL: Laboratorio Nacional de Los Álamos | Gobierno |
| 141 | LBNL: Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley | Gobierno |
| 142 | LCRP: Rescate y Protección de Chimpancés de Liberia (Liberia) | CSO |
| 143 | Universidad de Leiden (Países Bajos) | Universidad |
| 144 | Universidad de Leipzig (Alemania) | Universidad |
| 145 | Universidad de Lund (Suecia) | Universidad |
| 146 | Universidad de Makererere (Uganda) | Universidad |
| 147 | Mancomunidad Regional Amazónica | gobierno |
| 148 | MapBiomas (Brasil) | CSO |
| 149 | Universidad Marien Ngouabi (Rep. del Congo) | Universidad |
| 150 | Universidad Marymount | Universidad |
| 151 | Instituto Max Planck (Alemania) | CSO |
| 152 | Universidad McGill (Canadá) | Universidad |
| 153 | Universidad Mendel | Universidad |
| 154 | Universidad Estatal de Michigan | Universidad |
| 155 | MINRESI: Ministerio de Investigación Científica e Innovación de Camerún | Gobierno |
| 156 | MIT: Instituto Tecnológico de Massachusetts | Universidad |
| 157 | Instituto Mora (México) | CSO |
| 158 | Universidad Estatal Morgan | Universidad |
| 159 | MoveBank | Multilateral |
| 160 | Universidad Estatal de Murray | Universidad |
| 161 | Real Universidad de Muteesa I (Uganda) | Universidad |
| 162 | Centro de Investigación Ames de la NASA | Gobierno |
| 163 | Acción por la Tierra de la NASA | Gobierno |
| 164 | Equipo científico ECOSTRESS de la NASA | Multilateral |
| 165 | NASA GISS: Instituto Goddard de Estudios Espaciales | Gobierno |
| 166 | Equipo científico de la Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) de la NASA | Multilateral |
| 167 | NASA GSFC: Centro Goddard de Vuelos Espaciales | Gobierno |
| 168 | Cosecha de la NASA | Multilateral |
| 169 | Iniciativa de la NASA para los pueblos indígenas | Gobierno |
| 170 | NASA JPL: Laboratorio de Propulsión a Chorro, Instituto Tecnológico de California | Universidad |
| 171 | NASA LRC: Centro de Investigación Langley | Gobierno |
| 172 | NASA MSFC: Centro Marshall de Vuelos Espaciales | Gobierno |
| 173 | Equipo científico del Observatorio Orbital del Carbono (OCO) de la NASA | Multilateral |
| 174 | Equipo científico del SMAP (Soil Moisture Active Passive) de la NASA | Multilateral |
| 175 | Equipo científico de biología y geología de superficie (SBG) de la NASA | Multilateral |
| 176 | Agencia Nacional de Parques Nacionales (Gabón) | Gobierno |
| 177 | Universidad Nacional Agraria (Perú) | Universidad |

| # | ORGANIZACIÓN/INSTITUCIÓN | TIPO |
|-----|---|-------------------|
| 178 | Fundación Nacional de los Pueblos Indígenas (FUNAI) | CSO |
| 179 | Escuela Nacional de Silvicultura (Camerún) | Gobierno |
| 180 | Sociedad National Geographic | CSO |
| 181 | Universidad Nacional de Taiwán (Taiwán) | Universidad |
| 182 | Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial (Guinea Ecuatorial) | Universidad |
| 183 | Universidad Nacional San Antonio Abad de Cuzco (Perú) | Universidad |
| 184 | Universidad Nacional de Singapur (Singapur) | Universidad |
| 185 | Universidad Nacional de Ucayali (Perú) | Universidad |
| 186 | Colectivo Nature Tech | CSO |
| 187 | NAU: Universidad del Norte de Arizona | Universidad |
| 188 | NCBS: Centro Nacional de Ciencias Biológicas (India) | Gobierno |
| 189 | NCSU: Universidad Estatal de Carolina del Norte | Universidad |
| 190 | NEON: Red Nacional de Observatorios Ecológicos de Estados Unidos | Gobierno |
| 191 | Museo de Nuevo Brunswick (Canadá) | Gobierno |
| 192 | Universidad de Nueva York | Universidad |
| 193 | NICFI: Iniciativa Internacional de Noruega sobre el Clima y los Bosques | Gobierno |
| 194 | NIOO-KNAW: Instituto Holandés de Ecología (Países Bajos) | CSO |
| 195 | Laboratorio de Vigilancia Mundial de la NOAA | Gobierno |
| 196 | NSF: Fundación Nacional de la Ciencia | Gobierno |
| 197 | OceanExpert | CSO |
| 198 | Universidad Oficial de Bukavu (Rep. del Congo) | Universidad |
| 199 | Universidad Estatal de Ohio | Universidad |
| 200 | Reserva de Fauna Okapi (Rep. Dem. del Congo) | Gobierno |
| 201 | Universidad del Estado de Oklahoma | Universidad |
| 202 | Universidad Omar Bongo (Gabón) | Universidad |
| 203 | ONACC: Observatorio Nacional del Cambio Climático (Camerún) | Gobierno |
| 204 | Universidad Estatal de Oregón | Universidad |
| 205 | ORNL: Laboratorio Nacional de Oak Ridge | Gobierno |
| 206 | OSFAC: Observatorio Satelital de los Bosques de África Central | CSO |
| 207 | Gobierno local del distrito de Pakwach (Uganda) | Gobierno |
| 208 | PAUWES: Instituto Universitario Panafricano de Ciencias del Agua y la Energía | Universidad |
| 209 | Universidad Estatal de Pensilvania | Universidad |
| 210 | Piriatí Emberá | CSO |
| 211 | Planeta | Industria privada |
| 212 | Planet One-Mboa Hub | CSO |
| 213 | PNNL: Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico | Gobierno |
| 214 | Proforest (Reino Unido) | CSO |
| 215 | PUCP: Pontificia Universidad Católica del Perú (Perú) | Universidad |
| 216 | Pueblo de Jemez | CSO |
| 217 | R2FAC: Red de Investigación sobre los Bosques de África Central | Multilateral |
| 218 | Conexión con la selva tropical | CSO |
| 219 | Rainbow Environment Consult (Camerún) | Industria privada |
| 220 | Fundación Rainforest Noruega | CSO |
| 221 | RAPEE: Red Africana para la Promoción de la Educación Ambiental (Camerún) | Gobierno |
| 222 | Gobierno Regional de Amazonas (Perú) | Gobierno |

| # | ORGANIZACIÓN/INSTITUCIÓN | TIPO |
|-----|---|-------------------|
| 223 | Gobierno Regional de Caquetá (Perú) | Gobierno |
| 224 | Gobierno Regional de Huánuco (Perú) | Gobierno |
| 225 | Gobierno Regional de Loreto (Perú) | Gobierno |
| 226 | Gobierno Regional de Madre de Dios (Perú) | Gobierno |
| 227 | Gobierno Regional de Piura (Perú) | Gobierno |
| 228 | Gobierno Regional de San Martín (Perú) | Gobierno |
| 229 | Gobierno Regional de Ucayali (Perú) | Gobierno |
| 230 | REPALEAC: Red de Poblaciones Indígenas y Locales para la Gestión Sostenible de los Ecosistemas Forestales en África Central | CSO |
| 231 | RIFFEAC: Red de Instituciones de Formación Forestal y Medioambiental de África Central | Gobierno |
| 232 | RIOFAC: Proyecto de Refuerzo e Institucionalización de la OFAC | CSO |
| 233 | RRI: Iniciativa para los Derechos y Recursos | Multilateral |
| 234 | Universidad de Rutgers | Universidad |
| 235 | Universidad Estatal de San Diego | Universidad |
| 236 | Universidad Estatal de San Francisco | Universidad |
| 237 | Satelligence | Industria privada |
| 238 | Ciencias Schmidt | Donante |
| 239 | Science Systems and Applications Inc. | Industria privada |
| 240 | SERFOR: Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre, Perú | Gobierno |
| 241 | SERNANP: Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, Perú | Gobierno |
| 242 | SERVIR | Multilateral |
| 243 | SGN: Senckenberg - Institución Leibniz para la Biodiversidad y la Investigación del Sistema Terrestre | CSO |
| 244 | SIG: Grupo de Informática Espacial | Industria privada |
| 245 | SMACON: Organización para la Conservación de los Pequeños Mamíferos | CSO |
| 246 | Instituto Smithsoniano | Gobierno |
| 247 | Universidad Estatal de Dakota del Sur | Universidad |
| 248 | Instituto de Investigación del Suroeste | CSO |
| 249 | Soluciones climáticas Spark | Industria privada |
| 250 | SPCB: Panel Científico para la Cuenca del Congo | CSO |
| 251 | SPUN: Sociedad para la Protección de Redes Subterráneas | CSO |
| 252 | STA: Acciones Tropicales Sostenibles | CSO |
| 253 | Universidad de Stanford | Universidad |
| 254 | STRI: Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales | Gobierno |
| 255 | Centro de Investigación del Agua de Stroud | CSO |
| 256 | SURUDEV: Corredor Sostenible de las Naciones Unidas para el Desarrollo | Multilateral |
| 257 | Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas, Uppsala | Universidad |
| 258 | Sylvera | Industria privada |
| 259 | TERRA: Centro de Enseñanza e Investigación (Bélgica) | CSO |
| 260 | Universidad A&M de Texas | Universidad |
| 261 | Fundación David y Lucile Packard | Donante |
| 262 | Fundación Gordon y Betty Moore | Donante |
| 263 | Universidad Nacional de Colombia (Colombia) | Universidad |
| 264 | TINTA: El TreAd INvisible | CSO |
| 265 | TotalEnergies (Uganda) | Industria privada |
| 266 | Universidad de Tulane | Universidad |

| # | ORGANIZACIÓN/INSTITUCIÓN | TIPO |
|-----|--|--------------|
| 267 | UAB: Universidad Autónoma de Barcelona (España) | Universidad |
| 268 | UAC: Universidad de Abomey-Calavi (Benín) | Universidad |
| 269 | UB: Universidad de Burundi (Burundi) | Universidad |
| 270 | UCC: Universidad Católica del Congo | Universidad |
| 271 | UCL: Colegio Universitario de Londres | Universidad |
| 272 | UCLouvain: Universidad Católica de Lovaina (Bélgica) | Universidad |
| 273 | UEA: Universidad Estatal de Amazonas (Brasil) | Universidad |
| 274 | UFC: Universidad Federal de Ceará (Brasil) | Universidad |
| 275 | UFRJ: Universidad Federal de Río de Janeiro (Brasil) | Universidad |
| 276 | UFSC: Universidad Federal de Santa Catarina (Brasil) | Universidad |
| 277 | UFSM: Universidad Federal de Santa María (Brasil) | Universidad |
| 278 | UFVJM: Universidad Federal de Vales do Jequitinhonha e Mucuri (Brasil) | Universidad |
| 279 | UK Center of Ecology & Hydrology (Reino Unido) | CSO |
| 280 | UK FCDO: Foreign, Commonwealth & Development Office (Ministerio de Asuntos Exteriores, de la Commonwealth y de Desarrollo) | Gobierno |
| 281 | UK NERC: Consejo de Investigación del Medio Natural | Gobierno |
| 282 | UL: Universidad de Lorena (Francia) | Universidad |
| 283 | ULB: Universidad Libre de Bruselas (Bélgica) | Universidad |
| 284 | ULiège: Universidad de Lieja (Bélgica) | Universidad |
| 285 | UMR EcoFoG: Ecología de los bosques de la Guayana Francesa (Francia) | Multilateral |
| 286 | FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación | Multilateral |
| 287 | ONU SDSN: Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas | Multilateral |
| 288 | UN-SDSN: Red de Soluciones para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas | Multilateral |
| 289 | UNA: Universidad Nacional de Agricultura (Benín) | Universidad |
| 290 | UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México (México) | Universidad |
| 291 | UNAMAD: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (Perú) | Universidad |
| 292 | UNAP: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (Perú) | Universidad |
| 293 | UnB: Universidad de Brasilia (Brasil) | Universidad |
| 294 | PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente | Multilateral |
| 295 | UNESCO: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura | Multilateral |
| 296 | UNGE: Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial (Guinea Ecuatorial) | Universidad |
| 297 | UNIKIN: Universidad de Kinshasa (Rep. Democrática del Congo) | Universidad |
| 298 | UNIKIS: Universidad de Kisangani (Rep. Democrática del Congo) | Universidad |
| 299 | Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines Laboratorio de Ciencias Climáticas y Medioambientales | Universidad |
| 300 | Universidad de Buffalo | Universidad |
| 301 | Universidad de Aberdeen (Reino Unido) | Universidad |
| 302 | Universidad de Alabama Huntsville | Universidad |
| 303 | Universidad de Alberta | Universidad |
| 304 | Universidad de Arizona | Universidad |
| 305 | Universidad de Arkansas | Universidad |
| 306 | Universidad de Bamenda, Camerún | Universidad |
| 307 | Universidad de Bangui | Universidad |
| 308 | Universidad de Berna | Universidad |
| 309 | Universidad de Burdeos | Universidad |
| 310 | Universidad de Buea, Camerún | Universidad |

| # | ORGANIZACIÓN/INSTITUCIÓN | TIPO |
|-----|---|-------------|
| 311 | Universidad de California, Berkeley | Universidad |
| 312 | Universidad de California, Davis | Universidad |
| 313 | Universidad de California, Irvine | Universidad |
| 314 | Universidad de California, Los Ángeles | Universidad |
| 315 | Universidad de California, Merced | Universidad |
| 316 | Universidad de California, Santa Bárbara | Universidad |
| 317 | Universidad de California, Santa Cruz | Universidad |
| 318 | Universidad de Campinas | Universidad |
| 319 | Universidad de Ciudad del Cabo | Universidad |
| 320 | Universidad de Charleston | Universidad |
| 321 | Universidad de Colorado Boulder | Universidad |
| 322 | Universidad de Copenhague | Universidad |
| 323 | Universidad de Delaware | Universidad |
| 324 | Universidad de Delhi (India) | Universidad |
| 325 | Universidad de Douala (Camerún) | Universidad |
| 326 | Universidad de Dschang (Camerún) | Universidad |
| 327 | Universidad de Edimburgo (Reino Unido) | Universidad |
| 328 | Universidad de Energía y Recursos Naturales (Ghana) | Universidad |
| 329 | Universidad de Exeter (Reino Unido) | Universidad |
| 330 | Universidad de Florida | Universidad |
| 331 | Universidad de Georgia | Universidad |
| 332 | Universidad de Hong Kong (China) | Universidad |
| 333 | Universidad de Ibadán (Nigeria) | Universidad |
| 334 | Universidad de Idaho | Universidad |
| 335 | Universidad de Illinois Urbana-Champaign | Universidad |
| 336 | Universidad de Jambi (Indonesia) | Universidad |
| 337 | Universidad de Kindu (Rep. del Congo) | Universidad |
| 338 | Universidad de Leeds (Reino Unido) | Universidad |
| 339 | Universidad de Maroua (Camerún) | Universidad |
| 340 | Universidad de Maryland | Universidad |
| 341 | Universidad de Miami | Universidad |
| 342 | Universidad de Michigan | Universidad |
| 343 | Universidad de Minnesota | Universidad |
| 344 | Universidad de Montana | Universidad |
| 345 | Universidad de New Hampshire | Universidad |
| 346 | Universidad de Nueva Orleans | Universidad |
| 347 | Universidad de Ngaoundéré (Camerún) | Universidad |
| 348 | Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill | Universidad |
| 349 | Universidad de Notre Dame | Universidad |
| 350 | Universidad de Oklahoma | Universidad |
| 351 | Universidad de Oxford | Universidad |
| 352 | Universidad de Pretoria (Sudáfrica) | Universidad |
| 353 | Universidad de Puerto Rico - Río Piedras | Universidad |
| 354 | Universidad de Ruanda (Ruanda) | Universidad |
| 355 | Universidad de Ciencia y Tecnología de Masuku (Gabón) | Universidad |

| # | ORGANIZACIÓN/INSTITUCIÓN | TIPO |
|-----|---|--------------|
| 356 | Universidad del Sur de California | Universidad |
| 357 | Universidad del Rosario (Colombia) | Universidad |
| 358 | Universidad de Tokio (Japón) | Universidad |
| 359 | Universidad de Tolima (Colombia) | Universidad |
| 360 | Universidad de Utah | Universidad |
| 361 | Universidad de Vermont | Universidad |
| 362 | Universidad de Victoria (Canadá) | Universidad |
| 363 | Universidad de Virginia | Universidad |
| 364 | Universidad de Washington | Universidad |
| 365 | Universidad de Wisconsin | Universidad |
| 366 | Universidad de Yaundé I (Camerún) | Universidad |
| 367 | UNP: Universidad Nacional de Piura (Perú) | Universidad |
| 368 | UNTRM: Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (Perú) | Universidad |
| 369 | Embajada de EE.UU. en Camerún | Gobierno |
| 370 | Centro de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Estados Unidos | Gobierno |
| 371 | Laboratorio de Investigación Naval de EE.UU. | Gobierno |
| 372 | Departamento de Estado | Gobierno |
| 373 | USAID: Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional | Gobierno |
| 374 | USDA: Departamento de Agricultura de EE.UU. | Gobierno |
| 375 | USFS-IP: Programa Internacional del Servicio Forestal de EE.UU. | Gobierno |
| 376 | USGS: Servicio Geológico de Estados Unidos | Gobierno |
| 377 | USP: Universidad de São Paulo (Brasil) | Universidad |
| 378 | USTM: Instituto Nacional Superior de Agronomía y Biotecnología | CSO |
| 379 | UTEC: Universidad de Ingeniería y Tecnología (Perú) | Universidad |
| 380 | Universidad de Utrecht (Países Bajos) | Universidad |
| 381 | UTRGV: Universidad de Texas Rio Grande Valley | Universidad |
| 382 | UZH: Universidad de Zúrich (Suiza) | Universidad |
| 383 | Universidad de Wageningen (Países Bajos) | Universidad |
| 384 | Universidad Wake Forest | Universidad |
| 385 | Universidad de Washington | Universidad |
| 386 | WCS: Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre | CSO |
| 387 | Universidad de Virginia Occidental | Universidad |
| 388 | Universidad de Wilkes | Universidad |
| 389 | Wits: Universidad de Witwatersrand, Johannesburgo (Sudáfrica) | Universidad |
| 390 | Centro Woodwell de Investigación Climática | CSO |
| 391 | Banco Mundial | Multilateral |
| 392 | Wounaan | CSO |
| 393 | WRI: Instituto de Recursos Mundiales | CSO |
| 394 | WWF: Fondo Mundial para la Naturaleza | CSO |
| 395 | Academia Wyss para la Naturaleza | Universidad |
| 396 | Universidad de Yale | Universidad |

D. Actividades de investigación y seguimiento previstas y en curso

Tabla D-1. Proyectos y programas de investigación y seguimiento previstos y en curso en los trópicos que podrían contribuir a PANGEA.

NOTA: Esta lista no es exhaustiva. A: Proyecto o programa de evaluación. E: Educativo. L: Programa o proyecto continuo a largo plazo que probablemente continúe durante el PANGEA. M: Proyecto o programa de seguimiento. R: Proyecto o programa de investigación. T: Tentativo, aún no confirmado.

| PROYECTO/PROGRAMA | PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(ES) | PAÍS/PAÍSES/REGIÓN | ÁMBITO GEOGRÁFICO/CONTINENTE | TIPO DE PROYECTO/PROGRAMA | AÑOS |
|--|---|--|------------------------------|---------------------------|---------------|
| 1.000 PAISAJES PARA 1.000 MILLONES DE PERSONAS | Filantrópica | Colombia, Ecuador, Fiyi, Guyana, Kenia, Indonesia, México, Namibia, Nicaragua, Perú y Sudáfrica. | Global | L | 2019-En curso |
| 2NDFOR | Variada | 25 países | Pantropical | M,L | 1990-En curso |
| AFR100: INICIATIVA PARA LA RESTAURACIÓN DEL PAISAJE FORESTAL AFRICANO | Agencia de Desarrollo de la Unión Africana (AUDE)-NEPAD | África | África | L | 2015-En curso |
| AFRISAR I | ESA, NASA | Gabón | África | R | 2016 |
| AFRISAR II | ESA, NASA | Gabón, Ghana, Camerún, RDC, Rep. del Congo, Santo Tomé y Príncipe | África | R | 2023-2024 |
| ALIVE (ADVANCED BASELINE IMAGER LIVE IMAGING OF VEGETATED ECOSYSTEMS) | NSF | América Latina | América | R | 2024-En curso |
| CAMPAÑA AMAZON ESA-INPE | ESA, INPE | Brasil | América | R | 2024-2026 |
| EL AMAZONAS FRENTE AL CONGO: COMPRENDER LAS DIFERENCIAS INTERCONTINENTALES DE LAS RESPUESTAS DE LAS SELVAS TROPICALES A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA | Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) | Amazonas, Congo | África, América | R | 2024-2027 |
| AMERIFLUX | DOE DE EE.UU. | América del Norte y del Sur | América | M,L | 1996-En curso |
| AMIT (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AMAZONAS) | Fundación Moore, GCF, USAID | Amazon | América | L | 2020-En curso |
| AMMI (MÁSTER AFRICANO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL) | Facebook, Google | Camerún, Ghana, Ruanda, Senegal, Sudáfrica | África | L | 2003-En curso |

| PROYECTO/PROGRAMA | PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(ES) | PAÍS/PAÍSES/REGIÓN | ÁMBITO GEOGRÁFICO/CONTINENTE | TIPO DE PROYECTO/PROGRAMA | AÑOS |
|--|--|--|------------------------------|---------------------------|---------------|
| ANDESFLUX | Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) | Amazon | América | L | 2022-En curso |
| ANDEX | Programa Mundial de Investigaciones Climáticas | Perú | América | R | 2018-2025 |
| ASCEND (AVANCE DE LA BIOLOGÍA ESPECTRAL EN ENTORNOS CAMBIANTES PARA COMPRENDER LA DIVERSIDAD) | NASA, NSF | Global | Global | R | 2020-2025 |
| ASIA-AQ (INVESTIGACIÓN AEROTRANSPORTADA Y POR SATÉLITE DE LA CALIDAD DEL AIRE EN ASIA) | NASA | Filipinas, Corea del Sur, Taiwán, Tailandia | Asia | R | 2024 |
| ASIAFLUX | Variada | Asia | Asia | L | 1999-En curso |
| ATFS (ALIANZA PARA LA CIENCIA DE LOS BOSQUES TROPICALES) | NSF | Pantropical | Pantropical | R, L | 2021-2025 |
| ATTO (OBSERVATORIO DE TORRES ALTAS DEL AMAZONAS) | Max Planck, Gobierno alemán, etc. | Amazon | América | L | 2009-En curso |
| AVUELO (EXPERIMENTO UNIFICADO DE VALIDACIÓN AEROTRANSPORTADO-TIERRA-Océano) | NASA | Panamá | América | R | 2025 |
| MÁS ALLÁ DE CONTAR ÁRBOLES | WRI, Planeta | | Pantropical | R | 2024-En curso |
| BIODIVERSITY: UNA NUEVA MISIÓN ESPACIAL PARA VIGILAR LOS ECOSISTEMAS A GRAN ESCALA | ESA | Global | Global | T, L | TBD |
| BIOSCAPE (ESTUDIO SOBRE LA BIODIVERSIDAD DEL CABO) | NASA, Gobierno sudafricano, UNESCO, etc. | Sudáfrica | África | R | 2023-En curso |
| DIVERSIDAD DEL CACAO | Perú Ministerio de Agricultura y Riego, USDA, Cacao Seguro, USAID | Perú, Ecuador, Nicaragua, Honduras, El Salvador, Guatemala | América | L | 2021-En curso |
| CALEDNA: PROGRAMA DE ADN AMBIENTAL DEL CONSORCIO DE GENÓMICA DE LA CONSERVACIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA | Instituto de Genómica de la UCSC, Oficina del Presidente de la UC, HHMI, Red Mundial de Biodiversidad Genómica | California | América | R | 2017-En curso |
| CARBONO-I | NASA | Global | Global | T | TBD |

| PROYECTO/PROGRAMA | PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(ES) | PAÍS/PAÍSES/REGIÓN | ÁMBITO GEOGRÁFICO/CONTINENTE | TIPO DE PROYECTO/PROGRAMA | AÑOS |
|---|---|---|------------------------------|---------------------------|---------------|
| CARPE (PROGRAMA REGIONAL DE ÁFRICA CENTRAL PARA EL MEDIO AMBIENTE) | USAID | | África | L | 1995-En curso |
| RED DE PARCELAS DE ÁFRICA CENTRAL | IRD | Camerún, Gabón y RDC | África | R, L | 2010-En curso |
| CLIMA (ALIANZA PARA LA MODELIZACIÓN DEL CLIMA) | Ciencias Schmidt | EE.UU. | Global | R | 2018-En curso |
| CoFORFUNC (COMPOSICIÓN FUNCIONAL DE LOS BOSQUES DE LA CUENCA DEL CONGO) | BiodivERsA, la Comisión Europea | Camerún, República del Congo, República Democrática del Congo | África | R | 2023-En curso |
| COLOMBIA BON (RED DE OBSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD) | GIZ | Colombia | América | M,L | 2015-En curso |
| INSTITUTO DE LA CUENCA DEL CONGO | NASA, NSF, Filantrópica | Camerún, República Democrática del Congo, Gabón | África | R, L | 2015-En curso |
| INSTITUTO DE LA CUENCA DEL CONGO PARA LA NUEVA ECONOMÍA CLIMÁTICA | EE.UU., Francia, Alemania, Bezos Earth Fund, etc. | Camerún | África | L | 2023-En curso |
| INICIATIVA CIENTÍFICA DE LA CUENCA DEL CONGO | Filantrópica | República Democrática del Congo, Gabón, Camerún y República del Congo | África | L | 2024-En curso |
| CONGOFLUX | Unión Europea | República Democrática del Congo | África | L | 2021-En curso |
| CONGOPEAT | UKRI NERC | República Democrática del Congo, República del Congo | África | R | 2018-En curso |
| MUESTREO LIDAR NACIONAL DE LA RDC | WWF | República Democrática del Congo, Gabón, Camerún y República del Congo | África | R | 2012 |
| GEMELO DIGITAL DEL SISTEMA TIERRA PARA LOS CORREDORES DE CARBONO Y BIODIVERSIDAD DE ÁFRICA CENTRAL | NASA | África Central | África | R | 2025-2027 |
| ED2: COMUNIDAD DE MODELIZACIÓN DEMOGRÁFICA DE ECOSISTEMAS | Variada | Global | Global | R | 2001-En curso |
| EDGE | NASA | Global | Global | T | TBD |
| PROYECTO DE ESCUCHA DE ELEFANTES | Cornell | África Central y Oriental | África | L | 1999-En curso |

| PROYECTO/PROGRAMA | PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(ES) | PAÍS/PAÍSES/REGIÓN | ÁMBITO GEOGRÁFICO/CONTINENTE | TIPO DE PROYECTO/PROGRAMA | AÑOS |
|---|---|---|------------------------------|---------------------------|---------------|
| FINANCIACIÓN HORIZONTE DE LA UE (POR EJEMPLO, CONCERTO) | UE | Global | Global | R | 2021-2027 |
| FLUXNET | NASA, DOE, NSF | Global | Pantropical | R, L | 1997-En curso |
| FORESTGEO | Smithsonian, Variado | Global | Pantropical | R, L | 1980-En curso |
| FORESTPLOTS.NET | ERC, NERC, Filantrópica | Pantropical | Pantropical | R, L | 2009-En curso |
| GCF-TF (GRUPO DE TRABAJO DE GOBERNADORES SOBRE CLIMA Y BOSQUES) | Filantrópica | Bolivia, Brasil, Colombia, Costa de Marfil, Ecuador, España, Estados Unidos, Indonesia, México, Nigeria y Perú. | Pantropical | L | 2008-En curso |
| GATC: ALIANZA GLOBAL DE COMUNIDADES TERRITORIALES MOVIMIENTO DE MUJERES FORMACIÓN Y VIGILANCIA DE DRONES | Filantrópica | Pantropical | Pantropical | R, L | 2014-En curso |
| CAMPAÑA AEROTRANSPORTADA GEDI-SE DE ASIA | NASA | Sudeste asiático | Asia | R | 2025 |
| GEM | OTB | Pantropical | Pantropical | R, L | 2013-En curso |
| GEO-TREES | Filantrópica | Global | Pantropical | R, L | 2024 |
| GEO-NEX | NASA, NOAA | Global | Global | M, R | 2019-En curso |
| GFW: OBSERVATORIO MUNDIAL DE LOS BOSQUES | Instituto de Recursos Mundiales | Pantropical | Pantropical | L | 2014-En curso |
| ESTUDIO SOBRE LA MORTALIDAD DE LOS GRANDES ÁRBOLES GIGANTE-PANTROPICAL | NSF | Brasil, Camerún, Malasia, Panamá | Pantropical | R | 2023-En curso |
| GLAD: ANÁLISIS Y DESCUBRIMIENTO GLOBAL DE LA TIERRA | NASA, Google, USDA, USGS | Global | Global | R, L | 2013-En curso |
| ATLAS GLOBAL DE ECOSISTEMAS | Grupo de Observación de la Tierra (GEO) | Global | Global | L | 2024-En curso |
| GLOBE: APRENDIZAJE Y OBSERVACIÓN MUNDIALES EN BENEFICIO DEL MEDIO AMBIENTE | NASA, NSF, NOAA, Departamento de Estado de EE.UU. | Global | Global | L | 1994-En curso |

| PROYECTO/PROGRAMA | PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(ES) | PAÍS/PAÍSES/REGIÓN | ÁMBITO GEOGRÁFICO/CONTINENTE | TIPO DE PROYECTO/PROGRAMA | AÑOS |
|--|---|---|--|---------------------------|---------------|
| GOFC-GOLD (OBSERVACIONES GLOBALES DE LA CUBIERTA FORESTAL Y LA DINÁMICA DEL USO DE LA TIERRA) | NASA, ESA | Global | Global | L | 1997-En curso |
| GRUAN | Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC), CMNUCC | África, América | África, América | L | 2008-En curso |
| GUYAFLUX | INRAE | Francia (Guayana Francesa) | América | L | 2003-En curso |
| GUYAFOR | CIRAD, ONF, CNRS | Francia (Guayana Francesa) | América | L | 2000-En curso |
| KADI | Unión Europea | África | África | R | 2023-En curso |
| LABORATORIO DE TIERRA Y CARBONO | Instituto de Recursos Mundiales, Filantropía | Pantropical | Pantropical | M | 2021-En curso |
| INICIATIVA LATINOAMERICANA DE SOSTENIBILIDAD / PERU HUB | USAID | Perú | América | L | 2019-En curso |
| LBA (FASES 1, 2, 3) | MCTI Brasil, NASA | Amazon | América | L | 1998-En curso |
| MAPABIOMAS | Filantrópica | Amazonas, Indonesia | América, Asia, expansión prevista a África | R, L | 2017-En curso |
| COSECHA DE LA NASA | NASA | Global | Global | L | 2017-En curso |
| NGEE-TRÓPICOS | DOE | EE.UU. | Pantropical | R | 2015-2028 |
| MOSAICOS PLANETARIOS NICFI | NICFI | Pantropical | Pantropical | R | 2020-2025 |
| OFVI (INICIATIVA "UNA VISIÓN FORESTAL") | Ministerio francés de Enseñanza Superior e Investigación (MESR), Ministerio francés de Europa y Asuntos Exteriores (MEAE) | República Democrática del Congo, Gabón, República del Congo | África | R, L | 2023-En curso |
| PEcAN | NSF, NASA, DOE | Global | Global | R, L | 2011-En curso |

| PROYECTO/PROGRAMA | PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(ES) | PAÍS/PAÍSES/REGIÓN | ÁMBITO GEOGRÁFICO/CONTINENTE | TIPO DE PROYECTO/PROGRAMA | AÑOS |
|---|---|--|------------------------------|---------------------------|---------------|
| PLANETA TANGER | Planeta | Global | Global | R, L | 2024-En curso |
| PROGRAMA PPG-CLIAMB | UEA, INPA | Brasil | América | R, L | 2009-En curso |
| PROYECTO CENTINELA | Planeta | Bolivia, Brasil, Costa Rica, República Democrática del Congo, Indonesia | Pantropical | R | 2024-En curso |
| R2FAC (RED DE INVESTIGACIÓN FORESTAL DE ÁFRICA CENTRAL) | Multiinstitucional | Camerún, República Centroafricana, Gabón, República del Congo, República Democrática del Congo, Bélgica, Francia | África | L | 2012-En curso |
| RECCAP2 | Agencia Espacial Europea, Proyecto Internacional de Coordinación del Carbono, proyecto de la UE | Global | Global | R, M | 2017-2023 |
| RESSAC | Unión Europea | Angola, Burundi, Camerún, República Centroafricana, Chad, Guinea Ecuatorial, República Democrática del Congo, Gabón, República del Congo, Ruanda, Santo Tomé y Príncipe. | África | L | 2024-En curso |
| RUBISCO SCIENCE FOCUS AREA | DOE | Global | Pantropical | L | 2011-En curso |
| ÁRBOL DE RUANDA | Consejo Sueco de Investigación | Ruanda | África | R, L | 2021-En curso |
| SARI (INICIATIVA DE INVESTIGACIÓN SOBRE ASIA MERIDIONAL Y SUDORIENTAL) | NASA LCLUC | Asia Meridional y Sudoriental | Asia | R, L | 2013-En curso |
| PANEL CIENTÍFICO PARA LA AMAZONIA | ONU SDSN | Colombia, Bolivia, Ecuador, Perú, Surinam, Guyana, Guayana Francesa, Brasil y Venezuela. | América | L | 2020-En curso |
| GRUPO CIENTÍFICO PARA EL CONGO | ONU SDSN | Camerún, República Centroafricana, Gabón, República Democrática del Congo, República del Congo, Guinea Ecuatorial | África | L | 2023-En curso |

| PROYECTO/PROGRAMA | PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(ES) | PAÍS/PAÍSES/REGIÓN | ÁMBITO GEOGRÁFICO/CONTINENTE | TIPO DE PROYECTO/PROGRAMA | AÑOS |
|--|---|---|------------------------------|---------------------------|---------------|
| SE.PLAN | FAO | Pantropical | Pantropical | M, L | 2016-En curso |
| SELPER: SOCIEDAD LATINOAMERICANA DE TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN ESPACIAL | Variada | América Latina | América | L | 1980-En curso |
| ACTIVIDADES DEL SERVIR HUB | NASA, USAID | Amazonia, América Central, África Oriental y Meridional, Himalaya del Hindu Kush, Sudeste Asiático, África Occidental | África, América, Asia | L | 2004-En curso |
| SILK (ESCUELA DE CONOCIMIENTOS INDÍGENAS Y LOCALES) | Instituto de la Cuenca del Congo | Camerún | África | R, L | 2018-En curso |
| SILVACARBON | USGS | Pantropical | Pantropical | L | 2011-En curso |
| SMAP CAL/VAL EN EL SUDESTE ASIÁTICO | NASA | Malasia | Asia | R | 2024-En curso |
| PAISAJES SOSTENIBLES BRASIL | USFS, USAID, DOS, Embrapa | Brasil, Perú | América | R | 2008-2023 |
| SWAMP (PROGRAMA DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN SOSTENIBLE DE LOS HUMEDALES) | USAID, NICFI, Norad, IKI, Filantrópica | Asia-Pacífico, África, América Latina y el Caribe | Pantropical | R, L | 2008-En curso |
| TALLO (BASE DE DATOS MUNDIAL SOBRE ALOMETRÍA DE LOS ÁRBOLES Y ARQUITECTURA DE LAS COPAS) | UKRI NERC | Global | Global | L | 2022-En curso |
| TERN (RED DE INVESTIGACIÓN DE ECOSISTEMAS TERRESTRES DE AUSTRALIA) | Gobierno australiano | Australia | Australia | R, L | 2009-En curso |
| TERRABIO | USAID, Alianza Internacional para la Biodiversidad/CIAT, sector privado | Amazon | América | M | 2023-2034 |
| TERRA-I | Aliance Biodiversity & CIAT, the Nature Conservancy | América Latina | América | M | 2023-En curso |
| TMFO | Cirad, CGIAR, FTA, ESA, Gobierno francés | Pantropical | Pantropical | L | 2017-En curso |

| PROYECTO/PROGRAMA | PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(ES) | PAÍS/PAÍSES/REGIÓN | ÁMBITO GEOGRÁFICO/CONTINENTE | TIPO DE PROYECTO/PROGRAMA | AÑOS |
|--|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------|
| TROPICAL FLUXNET-CH₄ | Fundación Moore, NSF | Amazonas, SE de Asia, Botsuana | África, América, Asia | R | 2021-En curso |
| RED FLUX DE ÁFRICA OCCIDENTAL | AMMA-CATCH Benín, FairCarboN | Benín | África | R, L | 1997-En curso |

E. Tabla detallada de medidas PANGEA

Tabla E-1. Descripción de las variables ecológicas y geofísicas relevantes para esta campaña, con los requisitos de observación correspondientes y los recursos de observación de la Tierra existentes o futuros. ET: evapotranspiración; LST: temperatura de la superficie terrestre; SIF: fluorescencia inducida por el sol. El texto en morado indica satélites de agencias federales no estadounidenses. *Indica misiones que aún no se han lanzado y/o que pueden estar aún en fase de estudio competitivo. ** Indica misiones finalizadas recientemente.

| VARIABLE(S) | PREGUNTAS CIENTÍFICAS | MEDICIONES SOBRE EL TERRENO | TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN | ACTIVOS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA | |
|--|---|---|---|---|--|
| | | | | SATÉLITE (PREVISTO/PROPUESTO) | AEROTRANSPORTADO (DRON/AVIÓN) |
| GPP | Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q26 | Torres de flujo, espectros a nivel de hoja | Espectroscopía infrarroja | OCO-2/3, TROPOMI , GOES-R ABI, AHI, MTG-I, NASA GHG ESE*, Sentinel 5P/5* , FLEX* , CO2M* , GOSAT-2, GOSAT-GW*. | NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER |
| ET | Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q24-Q26 | Torres de flujo | Térmico | Landsat, ECOSTRESS, SBG*, CHIME* , TRISHNA* , LSTM* , VIIRS, Sentinel-3 , satélites meteorológicos comerciales* , GEO | NASA HyTES, MAESTRO |
| RESPIRACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS | Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q13, Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q26 | Torres de flujo | Espectroscopía infrarroja | GOES-R ABI, AHI, MTG-I | NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER |
| CO ₂ & CH ₄ FLUJOS | Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q18, Q20, Q22, Q26 | Torres de flujo, mediciones en cámara | Hiperespectral | EMIT, MethaneSat , SBG*, Carbon- i*, CarbonMapper*. | NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, NEON AOP, GAO |
| | | | Covarianza de Foucault aerotransportada (AEC) | | NASA CARAFE |
| COLUMNA CO /CH /CO ₂₄ | Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q18, Q20, Q22, Q26 | Espectrómetros TCCON, COCCON, EM27/SUN | Espectroscopía infrarroja | OCO-2/3, NASA GHG ESE*, Sentinel- 5P/5* , FLEX* , CO2M* , GOSAT-2, GOSAT-GW*. | NASA CFIS (SIF), DLR CoMet (CO /CH) ₂₄ |
| BIOMASA AÉREA | Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q15, | Datos de parcelas de inventario forestal, escaneado láser terrestre | Lidar | GEDI, ICESat-2, MOLI* , EDGE*. | NASA LVIS, lidar de pequeña huella (drón y avión) |

| VARIABLE(S) | PREGUNTAS CIENTÍFICAS | MEDICIONES SOBRE EL TERRENO | TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN | ACTIVOS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA | |
|---|--------------------------------------|--|---|--|--|
| | | | | SATÉLITE (PREVISTO/PROPUESTO) | AEROTRANSPORTADO (DRON/AVIÓN) |
| | Q18, Q20, Q22 | | Radar | Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS* | UAVSAR DE LA NASA |
| MORTALIDAD DE LOS ÁRBOLES | Q9, Q11-Q13, Q15, Q17-Q22, Q25, Q27 | Repetición de los datos de las parcelas del inventario forestal censado | Lidar, radar, multiespectral | Landsat, Sentinel-1/2, Planet, GEDI, NISAR*, BIOMASS*, EDGE*. | Repetir dron RGB o lidar |
| ALTURA DEL TEJADILLO HETEROGENEIDAD DE LA ALTURA VERTICAL | Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q17-Q22, Q27 | Escaneado láser terrestre | Lidar | GEDI, ICESat-2, MOLI*, EDGE*. | NASA LVIS, lidar de pequeña huella (dron y avión) |
| DINÁMICA DE LA BRECHA DEL DOSEL | | | Radar | NISAR*, Sentinel-1, BIOMASS* | UAVSAR DE LA NASA |
| DIVERSIDAD ESPECTRAL | Q5, Q10-Q12, Q15, Q18, Q21, Q27 | Espectros a nivel de hoja | Hiperespectral | EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, Planet's Tanager, SBG*, CHIME*, FLEX*. | NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO |
| DIVERSIDAD FUNCIONAL | Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q18, Q21, Q27 | Diversidad taxonómica de las plantas; rasgos vegetales; IEK, TEK, LEK | | | |
| RASGOS FOLIARES DEL DOSEL: LMA, N, P, CA, K, PIGMENTOS | Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q18, Q21, Q22 | Diversidad taxonómica de las plantas; rasgos funcionales de las plantas | | | |
| DIVERSIDAD FAUNÍSTICA: PRESENCIA/AUSENCIA, ABUNDANCIA, MOVIMIENTO, INTERACCIONES ENTRE ESPECIES | Q5, Q10-Q12, Q18, Q27 | Cámaras trampa; sensores bioacústicos; seguimiento de movimientos de animales; eDNA; IEK, TEK, LEK; inventarios de especies vegetales. | Hiperespectral, Lidar, Radar | EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, Planet's Tanager, SBG*, CHIME*, NISAR*, BIOMASS*. | NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO, NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar de pequeña huella |
| FENOLOGÍA | Q2, Q4, Q11-Q15, Q18, Q22, Q27 | Phenocams, Observaciones fenológicas terrestres a largo plazo; IEK, TEK, LEK | Radiómetros ópticos (OR) e hiperespectrales | Landsat, Sentinel-2, Planet, OLCI, EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, SBG*, CHIME*, FLEX*. | Repetir dron RGB |
| ESTRÉS HÍDRICO: HUMEDAD DEL SUELO | Q1-Q4, Q6-Q9, Q13-Q19, Q22, Q24, Q25 | Sondas de humedad del suelo | Radar/radiometría de microondas | SMAP, SMOS, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*, LSTM* | UAVSAR de la NASA, AirMOSS |
| ESTRÉS HÍDRICO: CONTENIDO DE AGUA EN LA HOJA, RASGOS HIDRÁULICOS HOJA/PLANTA | Q2-Q4, Q6-Q9, Q12-Q19, Q22 | Contenido hídrico de la hoja, potenciales hídricos de la hoja/tallo y conductancia, VOD desde torre (GNSS de banda L) | GNSS-R/Señales de oportunidad, Espectroscopía de imágenes | AMSR-E, EMIT, SBG VSWIR & TIR*, CHIME*, FLEX*, SNOOPI*, CYGNSS, Lemur-2 | NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER |

| VARIABLE(S) | PREGUNTAS CIENTÍFICAS | MEDICIONES SOBRE EL TERRENO | TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN | ACTIVOS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA | |
|--|---|--|--|--|--|
| | | | | SATÉLITE (PREVISTO/PROPUESTO) | AEROTRANSPORTADO (DRON/AVIÓN) |
| ESTRÉS TÉRMICO: T50, TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE, EMISIVIDAD | Q2-Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q15, Q19 | Cámaras FLIR | Térmico | Landsat, ECOSTRESS, SBG*, FLEX* , TRISHNA* , LSTM* , Comerciales*. | NASA HyTES, MAESTRO |
| FUEGO ACTIVO | Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q20, Q23, Q27 | Humedad vital del combustible, humedad del suelo, superficie quemada, gravedad de la quema, IEK, TEK, LEK | Térmico | Landsat, VIIRS, Sentinel-3 , SBG*, TRISHNA* , LSTM* , Comercial*. | NASA HyTES, MAESTRO |
| AEROSOLES DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA | Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q20, Q27 | Tipo de combustible, densidad del combustible, mediciones de aerosoles | UV/Infrarrojo, Fotómetros, Lidar | OMPS, VIIRS, EMIT, PACE, OLCI , NISAR*, BIOMASA* , CALIPSO-CALIOP**, AOS*. | |
| USO Y OCUPACIÓN DEL SUELO | Q1, Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q14, Q16, Q19-Q20, Q25, Q27 | Actividad agrícola (tipo de cultivo, rendimiento, rotación), severidad de la tala, prácticas de incendios, IEK, TEK, LEK, prácticas de gestión de la conservación. | Radiómetros ópticos (OR), hiperespectrales, Lidar, radar | Landsat, Sentinel-2 , Planet , VIIRS, OLCI , EMIT, PRISMA , EnMAP , SBG*, CHIME* , FLEX* , CarbonMapper* , PACE*. | NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO, NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar de pequeña huella |
| SERVICIOS ECOSISTÉMICOS CULTURALES Y DE APROVISIONAMIENTO: ALIMENTOS, AGUA DULCE, MEDICINA, PRÁCTICAS ESPIRITUALES Y CEREMONIALES | Q27 | Áreas y rendimiento de cultivos y recolección de PFNM, identificación de tipos de bosques de importancia cultural y espiritual, cantidad y calidad del agua. | Radiómetros ópticos (OR), hiperespectrales, Lidar, radar | Landsat, Sentinel-1/2 , Planet , VIIRS, OLCI , EMIT, PACE, PRISMA , EnMAP , SWOT, SMAP, SMOS , GRACE-FO, SBG*, CHIME* , FLEX* , CarbonMapper* . | NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO, NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar de pequeña huella |
| AGUAS SUPERFICIALES: CANTIDAD, CAUDALES (DESCARGA), INUNDACIÓN | Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q24, Q25, Q27 | Altura de la superficie del agua, extensión de la inundación, caracterización de la descarga | Altímetro, Radar, Radiómetro | SWOT, Sentinel-1 , NISAR*, BIOMASS*. | UAVSAR DE LA NASA |
| ALMACENAMIENTO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y TERRESTRES | Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q24, Q25, Q27 | Mediciones de pozos | Gravimetría | GRACE-FO, MC* | |
| HUMEDAD ATMOSFÉRICA, VPD | Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q17, Q19, Q22, Q24, Q25, Q27 | Estación meteorológica | Microondas, sondas infrarrojas, generadores de imágenes | ATMS, GeoXO*, AOS* | |

| VARIABLE(S) | PREGUNTAS CIENTÍFICAS | MEDICIONES SOBRE EL TERRENO | TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN | ACTIVOS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA | |
|--------------------------------|---|-----------------------------|----------------------------|--|---|
| | | | | SATÉLITE (PREVISTO/PROPUESTO) | AEROTRANSPORTADO (DRON/AVIÓN) |
| VIENTO | Q1-Q4, Q6, Q7, Q9, Q14, Q17, Q19, Q22, Q24, Q25 | Estación meteorológica | Lidar de viento Doppler | Eolo | Mediciones por radiosonda |
| NUTRIENTES Y TEXTURA DEL SUELO | Q21, Q22, Q24, Q25, Q27 | Muestras de suelo | Hiperespectral | EMIT, PACE, SBG*, CHIME* | NASA AVIRIS-NG/3 |
| | | | | Nota: PANGEA explorará las relaciones correlativas con variables teledetectadas, no con mediciones directas. | |
| TOPOGRAFÍA GEOMORFOLOGÍA | Q1, Q8, Q19, Q21, Q22, Q24, Q25, Q27 | | Lidar, Radar | SRTM, Copernicus GLO-30 | UAVSAR de la NASA, LVIS de la NASA, lidar de pequeña huella |

F. Respuestas a los comentarios

Agradecemos los comentarios recibidos en las respuestas a la encuesta del CCE de la NASA. En particular, nos gustaría dar las gracias a Alejandro Cueva (El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa), Bruno Ubiali (Universidad de Georgia), Christiane Nimpa (Universidad de Bamenda), Cristhian Saldarroaga Sanchez (Ing Forestal y del Medio Ambiente), Cyrille Bienvenu Bediang (Ministerio de Educación Secundaria), Gerson Lopes (Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá), David Carchipulla-Morales (Wake Forest University), Cristhian Saldarroaga Sanchez (Gobierno Regional Piura, Perú), Diana Rocio Carvajal-Contreras (Universidad Externado), Jeff Atkins (USDA Forest Service, Southern Research Station), Joe Berry (Carnegie Institution for Science), Joost van Haren (Universidad de Arizona, Biosfera 2), Kyle Dexter (Universidad de Turín), Lorena Santamaría Rojas (Universidad de Stanford), Louis Defo (Universidad de Yaundé I, Proforest), Luciana Pires (World Environmental Conservancy), Luiz A. T. Machado (IFUSP), Maricar M Aguilos (North Carolina State University), Ossenatou Mamadou (Universite d'Abomey-Calavi), Paul Stoy (University of Wisconsin), Peke Koukou Leon Cest la Vie (Groupement Agropastoral pour le Developpement de Yongoro), Wu Sun (Carnegie Institution for Science), y dos encuestados anónimos.

Proceso

La oficina del Ciclo del Carbono y Ecosistemas de la NASA solicitó comentarios sobre el borrador del Libro Blanco de PANGEA a través de una encuesta en Internet de 13 preguntas desarrollada por el Programa de Ecología Terrestre de la NASA. Los comentarios se basaron en un borrador de Libro Blanco publicado para revisión pública en septiembre de 2024. Las respuestas a la encuesta se enviaron a la dirección de PANGEA con regularidad hasta noviembre. Los comentarios de la encuesta se utilizaron ampliamente para mejorar el Libro Blanco final.

Respondemos a los comentarios resumiendo en primer lugar los puntos fuertes y los aspectos que requieren mejoras destacados por los encuestados, seleccionados por los autores del Libro Blanco. También respondemos punto por punto a los comentarios de la encuesta. No registramos los comentarios en los que la respuesta era simplemente "sí" o "no". En un número limitado de casos, un encuestado repitió la misma respuesta a más de una pregunta. Respondimos una sola vez a comentarios idénticos.

Nota sobre la traducción: Un número limitado de encuestados utilizó el francés y el español. Registramos sus comentarios originales y ofrecemos [entre corchetes] nuestra traducción.

Puntos fuertes de PANGEA destacados por los encuestados

Citas directas de los encuestados:

- "PANGEA recoge un programa de investigación notablemente ambicioso, pero alcanzable, que abordará uno de los mayores retos a los que nos enfrentamos hoy en día: comprender los patrones y procesos y la heterogeneidad que gobiernan los bosques tropicales a nivel mundial."

- "Los temas científicos son exhaustivos y tocan los aspectos más importantes de la dinámica de los ecosistemas tropicales y sus implicaciones climáticas y socioecológicas. Las lagunas de conocimiento y las preguntas están claramente identificadas con la aportación de la comunidad".
- "El esfuerzo de colaboración de PANGEA", que "es una iniciativa destacada que puede apoyar las estrategias de conservación del planeta y también integrará a científicos de todo el mundo en un esfuerzo común por proteger la biodiversidad".
- "El estudio está bien organizado y es multidisciplinar, y recoge los estudios necesarios para colmar las lagunas existentes en estos ecosistemas altamente vulnerables a escala mundial".
- "La estructura y el contenido del informe del estudio de alcance de PANGEA son muy claros. Por ejemplo, entendemos claramente que PANGEA dilucidará patrones de cambios recientes (5-30 años) y en curso en los bosques tropicales, paisajes, dinámicas y retroalimentaciones, así como sus variaciones geográficas, con un enfoque medioambiental. Se hace hincapié en las comparaciones entre las Américas y África".
- "Esto está realmente adaptado a las realidades del campo"
- "Es una integración de distintas áreas; es un estudio multidisciplinar".
- "Este enfoque es lo que necesitamos para comprender mejor y prever -simular- cómo el cambio climático y el uso del suelo repercutirán en el clima y en la vida".
- "Este informe es exhaustivo y está bien organizado. La introducción expone claramente por qué esta campaña es necesaria y oportuna. Las lagunas de conocimiento y las preguntas están bien articuladas y servirán de hoja de ruta para futuras investigaciones. El informe también identifica las misiones por satélite y los productos de datos que son esenciales para responder a las preguntas de investigación de la campaña PANGEA."
- "Me pareció sobresaliente la atención prestada a los bosques africanos; PANGEA abordará incertidumbres absolutamente críticas sobre el papel del continente africano en el sistema terrestre, sin excluir el papel central que desempeña la selva amazónica".
- "La inclusión de un enfoque principal en los sistemas tropicales de África es un punto fuerte importante"
- "El proceso de PANGEA parece haber sido muy deliberado e intencionado para incluir a las comunidades locales, las partes interesadas y los gobiernos cuando ha sido necesario. La inclusión de muchas comunidades de las zonas objetivo (Sudamérica y África Central) y el proceso deliberado de compromiso así lo demuestran. También está claro que los líderes de PANGEA también involucrarán a otras comunidades -aún no identificadas- cuando su inclusión sea sugerida o necesaria para el éxito. "
- "El enfoque de la diversidad y la inclusión es muy sólido".

La pertinencia de PANGEA fue valorada muy positivamente por la mayoría de los encuestados, incluso con el uso de "excelente", "muy bueno" y "muy pertinente".

Casi todos los encuestados consideraron que PANGEA era factible, y una respuesta captó la esencia de estas respuestas: "Me parece totalmente factible, ya que amplía la exitosa investigación LBA y décadas de colaboración con investigadores tropicales y desplaza la atención a los bosques tropicales africanos, críticos pero poco conocidos, con un plan de observación exhaustivo". Por el contrario, otro encuestado compartió "La implementación requerirá mucho trabajo, pero sin un plan más detallado de qué sitios utilizar y en qué centrarse es difícil evaluar plenamente la viabilidad."

Apreciamos mucho y estamos de acuerdo con los comentarios que hacían hincapié en el importante trabajo que queda por hacer si PANGEA es seleccionada. Por ejemplo, "Se trata de un trabajo de gran envergadura que contará con la ayuda y ejecución de varios grupos de trabajo, así como de nativos de las zonas que se van a investigar. Tras leerlo detenidamente, el proyecto parece bien ligado. A medida que se desarrolle la investigación, pueden ser necesarias mejoras específicas, pero en general la propuesta está muy bien estructurada."

Además de los comentarios positivos, se compartieron varios puntos débiles, que los autores del Libro Blanco de PANGEA trabajaron para abordar en el documento final. Nuestras respuestas a las preguntas de la encuesta, en las que se pedía claridad y se identificaban áreas de mejora, se organizan temáticamente a continuación.

Áreas del estudio PANGEA que requieren mejoras

Los extractos de los comentarios originales aparecen en letra normal. [Las respuestas de PANGEA aparecen en azul](#).

Biodiversidad:

- "Biodiversidad

La sección 2.2 del Libro Blanco, sustancialmente revisada, presta especial atención a los temas de biodiversidad relevantes para PANGEA. Muchas preguntas científicas concretas (por ejemplo, las P5, P6 y P7) también se centran específicamente en cuestiones de biodiversidad.

Poco tiempo:

- "Aunque se tienen en cuenta los efectos del cambio climático y la acción humana, el proyecto tiene una ventana temporal muy corta. No se cuenta con la colaboración de otros científicos como los arqueólogos. Limitaciones al no considerar la referencia temporal que puede aportar la arqueología de África y América Latina en relación con los ecosistemas terrestres"
- "Se necesita una visión a largo plazo que aportan los datos paleoecológicos y la información de la arqueología africana y latinoamericana en relación con los bosques tropicales".

El ámbito temporal del proyecto abarca desde el pasado cercano (la era histórica de los satélites, de unos 50 años) hasta finales del siglo actual. Sin duda, los estudios

arqueológicos y paleontológicos mejorarán nuestra perspectiva, pero los recursos son limitados dentro del proyecto y tuvimos que tomar decisiones prácticas para responder a los criterios de nuestros patrocinadores de la NASA.

Proceso de colaboración e intercambio poco claro:

- "Se muestra como un proyecto de colaboración entre científicos. También incluye los conocimientos locales autóctonos e indígenas sobre los ecosistemas. Dudo que las poblaciones locales formen parte del equipo de colaboración o sean meras receptoras de los resultados."
- "Capacitar a la población local para que sea más práctica y participe en lugar de ser meros ayudantes y trabajadores contratados".
- "No me queda claro el proceso de recogida de datos ni la relación entre los científicos de Estados Unidos y las comunidades de América Latina y África".

PANGEA ha hecho grandes esfuerzos desde el principio para implicar a las comunidades locales e indígenas, los científicos, el personal gubernamental y muchos otros miembros de las comunidades de los trópicos. El proceso de coproducción de conocimientos comenzó durante la determinación del alcance de PANGEA y la redacción del Libro Blanco, que se ha llevado a cabo en colaboración con líderes indígenas de la Alianza Global de Comunidades Territoriales (GATC). Si PANGEA es seleccionado, la coproducción con los pueblos indígenas y las comunidades locales comenzará inmediatamente y se mantendrá durante todo el proceso. El enfoque de PANGEA sobre la ciencia equitativa, el desarrollo de capacidades y la formación se enfrentará directamente al problema de las campañas de sobrevuelo y la ciencia paracaidista. Basándonos en los éxitos de LBA, creemos que PANGEA puede publicar 100 artículos de científicos africanos como primeros autores, contribuyendo a cerrar la brecha del Índice Paracaidista en África Central (Culotta et al., 2024). Estos científicos africanos continuarán el legado de PANGEA, en colaboración con colegas internacionales de todos los trópicos, mucho después de que finalice el proyecto. La sección 8 del Libro Blanco explica nuestro enfoque de la participación comunitaria. La sección 10.1.5 explica la composición del equipo científico. La sección 10.2 analiza las oportunidades de cofinanciación, ya que la NASA se limita a financiar instituciones estadounidenses. La sección 10.3 discute el enfoque PANGEA de Ciencia Abierta que facilitará la transparencia y la cooperación.

La mayoría de los encuestados respondieron con entusiasmo que PANGEA fomentará asociaciones significativas con las partes interesadas (por ejemplo, comunidades locales y gobiernos). Uno de los encuestados subrayó: "Sí lo hará, porque PANGEA ofrecerá información a las comunidades locales que ayudará en la toma de decisiones [sic]".

Separación de ecosistemas terrestres y acuáticos:

- "Ver los ecosistemas terrestres separados de los acuáticos puede dar una visión sesgada de fenómenos como el cambio climático y el impacto sobre los humanos en los bosques tropicales debido a su interconexión"

Los sistemas terrestres y acuáticos no están separados en la concepción de PANGEA. Quizá la forma más fácil de demostrarlo sea la ausencia de secciones específicas dedicadas a cuestiones científicas terrestres y acuáticas. Están entrelazadas. Los paisajes de PANGEA contendrán entornos terrestres y acuáticos. Además, en nuestras preguntas científicas 1 y 3 vinculamos implícitamente los medios terrestre y acuático a través de los flujos laterales. En otro ejemplo, en la pregunta 21 vinculamos las alteraciones y el crecimiento de los bosques con los recursos de agua dulce.

Participación de científicos internacionales:

- "Por lo que he leído, es claro y comprensible. Lo que no me queda claro es cómo podemos (los no estadounidenses) presentar proyectos a la NASA".

La NASA sólo puede apoyar la investigación en instituciones estadounidenses. Sin embargo, al igual que en LBA, trataremos de asociar los estudios de la NASA con socios locales que puedan acceder a financiación local. Además, buscaremos activamente la cofinanciación de organizaciones privadas que actualmente son muy activas en la financiación de la investigación medioambiental (Sección 10.2).

Compromiso de los gobiernos extranjeros:

- "La realización de campañas de investigación sobre el terreno no presenta dificultades, salvo la relación entre gobiernos".

Se trata de un reto para toda la investigación internacional. La NASA cuenta con abundante experiencia gracias a sus numerosas campañas científicas sobre el terreno y aerotransportadas. Véanse la Sección 6.2.4 y el Recuadro 2.

Necesidad de mejorar la claridad de los elementos científicos:

- "Objetivo 1: Caracterizar y cuantificar las respuestas heterogéneas de los bosques tropicales a los cambios antropogénicos. ¿Qué hay de la respuesta de los bosques tropicales a las perturbaciones naturales y climáticas (por ejemplo, tifones/huracanes, sequías, inundaciones, corrimientos de tierras, etc.)?".

La sección 2.5 sobre la dinámica de las perturbaciones se ha revisado sustancialmente. Ahora tratamos no sólo las perturbaciones antropogénicas, sino también las naturales a través de los mecanismos enumerados en el comentario. Además, las secciones 2.3 y 3.3.2 abordan las inundaciones.

- "El estudio PANGEA debe mejorar la integración de las interacciones Naturaleza-Sociedad. Hay que tener más en cuenta las ciencias sociales y humanas"

El Libro Blanco revisado incluye secciones sustancialmente revisadas que describen las preguntas clave para el estudio de los Sistemas Socio-Ecológicos (SES) (Sección 2.4). Este tema científico de PANGEA investigará las interacciones y retroalimentaciones entre los sistemas sociales y ecológicos relacionados con la producción de alimentos y la

seguridad alimentaria, las prácticas culturales, los medios de vida, las estrategias de gestión y la resiliencia de los sistemas tropicales.

- "Estamos en el siglo de la inteligencia artificial, que está repercutiendo en todos los ámbitos de la vida e incluso en la forma de abordar las cuestiones de investigación actuales y futuras. Creo que este aspecto debe definirse claramente en el informe".

En la sección 6.3.1 revisada del Libro Blanco, afrontamos esta cuestión directamente. Por ejemplo, PANGEA aprovechará los modelos de inteligencia artificial y aprendizaje automático (IA/AM) para la síntesis de datos debido a su solidez a la hora de tratar las no linealidades y las interacciones entre procesos multifactoriales y predictores. La IA/ML puede utilizarse además para emular modelos basados en procesos y explorar de forma más eficiente el espacio paramétrico de los modelos o realizar previsiones a corto/largo plazo.

Falta de elementos experimentales en el ámbito PANGEA:

- "La sección 3 no incluye experimentos de desviación de precipitaciones, fertilización con CO₂ o temperatura, mientras que Q8, Q9, Q19 y Q23 dependen de la experimentación para abordar estas cuestiones".

La respuesta de PANGEA al Programa de Ecología Terrestre de la NASA no contempla explícitamente los experimentos en grandes ecosistemas. Estos son valiosos y pueden ser cofinanciados por otras agencias o donantes privados, como fue el caso del experimento de sequía Seca-Floresta realizado en el Bosque Nacional de Tapajos, Brasil, apoyado por fondos de la NSF como parte de LBA.

Exclusiones del ámbito de PANGEA:

- "Nos parece que los bosques tropicales del sudeste asiático parecen estar excluidos del estudio PANGEA, y sin embargo estamos hablando de ecosistemas forestales tropicales y de mejorar nuestra comprensión de su funcionamiento. Quizá aquí entran en juego cuestiones presupuestarias, estratégicas o geopolíticas, pero creemos que tener en cuenta todas las regiones forestales tropicales nos permitiría obtener resultados más holísticos y realizar una modelización que afecte a todos los ecosistemas forestales tropicales."
- "Los trópicos secos quedan fuera, pero son tan potencialmente importantes para el futuro del ciclo del carbono terrestre como los trópicos húmedos, y sin embargo están menos estudiados y peor comprendidos".

Las limitaciones de recursos no nos permitirían realizar campañas de campo en todas las regiones tropicales. Véase la sección 1.4 sobre el dominio PANGEA. Incluimos un dominio ampliado de bosques húmedos pantropicales, el área más amplia de interés científico, donde pueden llevarse a cabo proyectos adicionales a través de asociaciones, y donde se realizarán análisis por satélite y modelización.

No afirmamos que los trópicos secos carezcan de importancia, pero hemos defendido la importancia de los bosques húmedos en los ciclos globales del carbono y el agua. Es poco probable que ningún otro bioma tropical pueda tener tanta importancia para el carbono como los bosques húmedos. Los bosques húmedos tienen un mayor almacenamiento de carbono y mayores flujos de carbono que otros biomas tropicales.

En la siguiente sección respondemos a todos los comentarios de los encuestados organizados por las preguntas de la encuesta (P1-P13). Las respuestas a la encuesta se muestran en letra normal. [Las respuestas de PANGEA aparecen en azul](#). No hemos respondido a las preguntas en las que la respuesta era un simple "sí" o "no". En general, las respuestas están organizadas por orden de recepción. El orden no se corresponde con el de las respuestas que figuran al principio de este documento. En algunos casos, las respuestas se reordenaron para poder dar una respuesta única a comentarios similares.

Q1. ¿Cuáles son los puntos fuertes del estudio PANGEA?

1. Creo que el esfuerzo de colaboración de PANGEA es una iniciativa destacada que puede apoyar las estrategias de conservación del planeta y que además integrará a científicos de todo el mundo en un esfuerzo común por proteger la biodiversidad.
2. *Ciclos biogeoquímicos, biodiversidad, interacciones y retroalimentaciones climáticas, sistemas socioecológicos y dinámica de las perturbaciones.* [Ciclos biogeoquímicos, biodiversidad, interacciones y retroalimentaciones climáticas, sistemas socioecológicos y dinámica de las perturbaciones].
3. El estudio está bien organizado y es multidisciplinar, y recoge los estudios necesarios para colmar las lagunas existentes en estos ecosistemas altamente vulnerables a escala mundial.
4. PANGEA utilizará nuevas herramientas para estudiar los bosques tropicales.
5. *C'est sur la collecte des données digitalisées* [Se trata de la recogida de datos digitalizados].
6. Es una integración de distintas áreas; es un estudio multidisciplinar.
7. El principal punto fuerte del estudio de PANGEA es que la iniciativa se centra en un ámbito en el que existen muchas lagunas de conocimiento y en el que los gobiernos africanos carecen de medios financieros y técnicos para trabajar.
8. Me pareció excepcional la atención prestada a los bosques africanos; PANGEA abordará incertidumbres absolutamente críticas sobre el papel del continente africano en el sistema terrestre, sin excluir el papel central que desempeña la selva amazónica.
9. Uno de los principales puntos fuertes del estudio de alcance de PANGEA reside en su exhaustivo enfoque para abordar las lagunas en nuestra comprensión de los bosques tropicales. El estudio pone de relieve el problema de la representación inadecuada en las campañas de campo, que conduce a la representación errónea de las propiedades físicas en la dinámica medioambiental. PANGEA pretende hacer frente a este reto poniendo en marcha una campaña multiescala para describir los procesos biogeoquímicos en los bosques tropicales, lo que constituye otro punto fuerte significativo. Los autores han considerado

cuidadosamente las fuentes de datos existentes y han diseñado un plan para priorizar y optimizar la recogida de datos, haciendo un uso eficiente del tiempo y los recursos. Además, PANGEA se basa en la experiencia de la anterior campaña de Ecología Terrestre de la NASA, el Experimento Biosfera-Atmósfera a Gran Escala en la Amazonía (LBA), ofreciendo la oportunidad de mejorar los modelos globales de la NASA mediante la recopilación de datos espaciotemporales más completos sobre la dinámica global.

10. La claridad de las preguntas de investigación. El estado actual de los conocimientos sobre los temas a explorar. Los socios implicados en las distintas regiones de estudio. Las perspectivas de formación y educación de la próxima generación de científicos.
11. Los temas científicos son exhaustivos y tocan los aspectos más importantes de la dinámica de los ecosistemas tropicales y sus implicaciones climáticas y socioecológicas. Las lagunas de conocimiento y las preguntas se identifican claramente con la aportación de la comunidad.
12. PANGEA fue perspicaz al optar por colmar las lagunas de campañas anteriores e incluir el tratamiento de datos casi inexistentes para algunos bosques tropicales. El uso de satélites se está convirtiendo en esencial para la mayoría de los estudios científicos medioambientales y la toma de decisiones, y por lo tanto, su precisión en estas aplicaciones de investigación se ha vuelto primordial. Se sabe que incluso la representación de modelos sobre bosques, debido a la diferencia en los procesos convectivos, presenta gran dificultad en las parametrizaciones, generando respuestas con desviaciones estándar muy grandes. Campañas ejecutadas de forma subóptima y la falta de datos específicos complican aún más muchos de los estudios existentes. Analizar y comparar bosques que presentan comportamientos diferentes será de gran valor para la comunidad científica en el avance de los estudios sobre el futuro de nuestro planeta. La propuesta parece acertada al brindar una oportunidad a la nueva generación de científicos y proponer la creación de una base de datos abierta. Me alegró enormemente saber que esta propuesta abre potencialmente las puertas más allá del mundo académico y las instituciones espaciales, a los responsables de la toma de decisiones, las comunidades y cualquier otra persona interesada en ayudar.
13. La base científica, el amplio alcance con áreas de interés claras, el plan de uso de satélites bien desarrollado, el plan de modelización bien desarrollado, la inclusión de muchas comunidades locales y el plan de compromiso bien desarrollado, el plan de aplicación y el plan de capacitación y educación.
14. Se centra en aumentar la observación y comprensión de algunos de los ecosistemas más desconocidos pero vulnerables. PANGEA aborda una laguna y un reto bien conocidos de la investigación en ciencias de la tierra: la falta de datos y conocimientos sobre los trópicos.
15. La inclusión de un enfoque primario en los sistemas tropicales de África es un punto fuerte importante. El variado equipo asociado al proyecto es impresionante, sobre todo por la diversidad y complementariedad de las competencias de sus miembros. Se presenta una sólida comprensión de las ventajas y desventajas a escala cruzada de los diversos enfoques de teledetección presentados. Conociendo el trabajo de muchos de los miembros del equipo, no me sorprende en absoluto, sino que me entusiasma lo bien que se exponen y abordan estas cuestiones. La incorporación de múltiples fuentes de datos de teledetección

puede ser complicada y este documento detalla cómo abordarla en el contexto de las cuestiones científicas de una manera minuciosa y reflexiva que muestra un gran potencial para el éxito de este componente del proyecto. Me gusta mucho el marco óptimo, de referencia y de umbral que se utiliza en todo el documento. Las tablas uno y cuatro son de las más completas de este tipo (y fáciles de leer) que he visto nunca. Por lo que veo, se tiene muy en cuenta la colaboración con los socios locales, que es imprescindible para este tipo de ciencia.

16. PANGEA recoge un programa de investigación extraordinariamente ambicioso, aunque factible, que abordará uno de los mayores retos a los que nos enfrentamos hoy en día: comprender las pautas, los procesos y la heterogeneidad que rigen los bosques tropicales en todo el mundo.
17. Pude ver los puntos fuertes del estudio a dos niveles:
 - a. La primera es la de haber conseguido reunir a una vasta comunidad científica de varios horizontes, por no decir de todos los horizontes de la tierra. Todos los científicos de los países tropicales y de otras regiones del mundo parecen estar representados, lo que garantiza que se tengan en cuenta la mayoría de los puntos de vista para abordar las grandes cuestiones que plantean retos para una comprensión adecuada del funcionamiento de los ecosistemas tropicales.
 - b. El segundo punto fuerte del estudio es que tiene en cuenta los problemas clave a los que se enfrenta la humanidad y que están directamente relacionados con el funcionamiento de los ecosistemas forestales tropicales: este es un punto fuerte del estudio exploratorio PANGEA. En efecto, el cambio climático (que engloba muchas otras cuestiones tenidas en cuenta en el estudio, como la deforestación, el cambio de uso del suelo, las sequías, el ciclo del carbono, etc.) y la biodiversidad figuran entre los principales problemas que plantean grandes retos a la humanidad y a la vida en el planeta Tierra.
18. PANGEA fue perspicaz al optar por colmar las lagunas de campañas anteriores e incluir el tratamiento de datos casi inexistentes para algunos bosques tropicales. El uso de satélites se está convirtiendo en esencial para la mayoría de los estudios científicos medioambientales y la toma de decisiones, y por lo tanto, su precisión en estas aplicaciones de investigación se ha vuelto primordial. Se sabe que incluso la representación de modelos sobre bosques, debido a la diferencia en los procesos convectivos, presenta gran dificultad en las parametrizaciones, generando respuestas con desviaciones estándar muy grandes. Campañas ejecutadas de forma subóptima y la falta de datos específicos complican aún más muchos de los estudios existentes. Analizar y comparar bosques que presentan comportamientos diferentes será de gran valor para la comunidad científica en el avance de los estudios sobre el futuro de nuestro planeta. La propuesta parece acertada al brindar una oportunidad a la nueva generación de científicos y proponer la creación de una base de datos abierta. Me alegró enormemente saber que esta propuesta abre potencialmente las puertas más allá del mundo académico y las instituciones espaciales, a los responsables de la toma de decisiones, las comunidades y cualquier otra persona interesada en ayudar.

19. Se trata del concepto desarrollado en torno a las mediciones esenciales óptimas, de referencia y de umbral necesarias para alcanzar los objetivos definidos; el enfoque de inclusividad y, por último, la participación de científicos locales, que garantizará la sostenibilidad del estudio tras dicha campaña.
20. Creo que el proyecto tiene muchos puntos fuertes, entre los que podría citar unos objetivos bien desarrollados que pretenden tanto avanzar en el conocimiento como mejorar los métodos para entender los bosques tropicales, un equipo amplio y competente, y una serie de organizaciones asociadas que ayudarán a poner en práctica estas ideas.
21. Participación de la comunidad, perspectiva transcontinental y énfasis en el papel de las floras arbóreas divergentes en la variabilidad intercontinental de la función de los ecosistemas.
22. Se trata de un trabajo de gran envergadura que contará con la ayuda y ejecución de varios grupos de trabajo, así como de nativos de las zonas que se van a investigar. Tras leerlo detenidamente, el proyecto parece bien enlazado. A medida que se desarrolle la investigación, pueden ser necesarias mejoras específicas, pero en general la propuesta está muy bien estructurada.

Agradecemos los comentarios anteriores, pero por lo demás no tenemos ninguna respuesta directa a los mismos.

Q2. ¿Qué aspectos del estudio PANGEA deben mejorarse?

- Se muestra como un proyecto de colaboración entre científicos. También incluye los conocimientos autóctonos y locales sobre los ecosistemas. Dudo que las poblaciones locales formen parte del equipo de colaboración o sean meras receptoras de los resultados.

PANGEA ha hecho grandes esfuerzos desde el principio para implicar a las comunidades locales e indígenas. El proceso de coproducción de conocimientos comenzó durante la determinación del alcance de PANGEA y la redacción del libro blanco, que se ha llevado a cabo en colaboración con líderes indígenas de la Alianza Global de Comunidades Territoriales (GATC). Si PANGEA es seleccionado, la coproducción con los pueblos indígenas y las comunidades locales comenzará inmediatamente y se mantendrá a lo largo de todo el proceso.

- La implicación de las mujeres en las actividades de captura de carbono.

PANGEA ha hecho un gran esfuerzo para incluir a las mujeres en todas las actividades de alcance. En nuestro informe de alcance no abordamos específicamente las actividades de las mujeres en la captura de carbono. Esa es una de las muchas preocupaciones específicas que pueden surgir en los proyectos de investigación. Nuestro Libro Blanco, aunque exhaustivo, sigue estando limitado en espacio.

- *Sur le plan local national régional international et mondial [Sobre el plan local, nacional, regional, internacional y mundial]*

- Ser más coherente y específico con respecto a la alineación del desarrollo de capacidades con el plan de acción del gobierno africano, página 15 / 61.
- En la República Democrática del Congo, por ejemplo

PANGEA participó ampliamente en África, Sudamérica y Asia, como se detalla en el Apéndice C del Libro Blanco.

- ¿Cómo promover la integración interdisciplinaria y cómo se integrará a la población local en el proyecto para que participe activamente? ¿Cómo mejorar la formación, la educación y la ciencia?

El Libro Blanco fue elaborado por un equipo muy diverso, como se detalla en el Apéndice C. En particular, reconocemos la importancia del equipo diverso para la mejora de la formación y la educación. El enfoque de PANGEA sobre la ciencia equitativa, el desarrollo de capacidades y la formación se enfrentará directamente a la cuestión de las campañas de sobrevuelo y la ciencia de los paracaidistas. Basándonos en los éxitos de LBA, creemos que PANGEA puede publicar 100 artículos de primeros autores de científicos de África, contribuyendo a cerrar la brecha del Índice Paracaidista en África Central (Culotta et al., 2024). Estos científicos africanos continuarán el legado de PANGEA, en colaboración con colegas internacionales de todos los trópicos, mucho después de que finalice el proyecto.

- Más interés por las interacciones Naturaleza-Sociedades

El Libro Blanco revisado incluye secciones sustancialmente revisadas que describen las cuestiones clave para el estudio de los sistemas socioecológicos (SES) (Sección 2.4). Este tema científico de PANGEA investigará las interacciones y retroalimentaciones entre los sistemas sociales y ecológicos relacionados con la producción de alimentos y la seguridad alimentaria, las prácticas culturales, los medios de vida, las estrategias de gestión y la resiliencia de los sistemas tropicales.

- Sección 3.1.1 Existencias y flujos de carbono: Creo que esta sección no representa una grave limitación de los enfoques actuales para el seguimiento de los ecosistemas terrestres en los trópicos. El ciclo del carbono en estos ecosistemas está aproximadamente equilibrado, pero dadas las grandes existencias y los grandes flujos (GPP, Respiración y quema de biomasa), ligeros cambios en el equilibrio de estos procesos podrían tener grandes consecuencias en el balance global de carbono. Ni siquiera unas mediciones perfectas de CO₂ pueden proporcionar mucha información útil sobre los procesos del ciclo del carbono, aunque la capacidad de predicción de nuestros modelos del Sistema Tierra se basa en su capacidad para modelizar la GPP y la respiración. En los trópicos, estos modelos de procesos están poco limitados (si es que lo están) por los actuales sistemas de seguimiento. A diferencia de los ecosistemas templados que muestran grandes variaciones estacionales en el intercambio neto de CO₂, los ecosistemas tropicales muestran poca variación estacional porque la GPP y la respiración tienden a ser casi iguales durante todo el año. Por lo tanto, el CO₂ atmosférico es casi constante en los trópicos, a pesar de la presencia de enormes flujos brutos.

Además, es difícil separar las tendencias regionales del "ruido" del ciclo del carbono debido a las diferencias diarias en la nubosidad o al efecto rectificador diurno (Denning et al., 1995) sobre la concentración de CO₂.

- Existe una posible solución: el sulfuro de carbonilo (OCS). Este gas rastrea la GPP, mientras que el CO₂ rastrea la NEE. Esto se debe a que el OCS es absorbido por las hojas, pero los ecosistemas terrestres no liberan OCS (o lo hacen en cantidades muy pequeñas). Hace varios años propusimos que el OCS podría proporcionar una nueva ventana al ciclo del carbono, especialmente en los trópicos (Berry et al., 2013). Las mediciones realizadas por los satélites MIPAS (Stinecipher et al., 2022) y TES (Wang et al., 2023) mostraron una disminución significativa de la concentración de OCS en la troposfera superior. En los últimos dos años, el grupo de Luciana Gatti en el INPE ha realizado más de 800 mediciones en matriz de OCS (junto con otros gases GEI) a partir de perfiles aéreos realizados sobre la cuenca del Amazonas. Como era de esperar, estas mediciones muestran gradientes mucho mayores (10-100 veces) en la concentración relativa de OCS que en la de CO₂. El OCS es, por tanto, una mejor base para realizar inversiones atmosféricas y puede proporcionar información directa sobre la GPP y la respiración. Las mediciones por satélite, los perfiles aéreos y, posiblemente, la espectrometría FT-IR de observación solar (Hannigan et al., 2021) son enfoques prometedores para crear un programa de seguimiento del ciclo del carbono basado en el OCS en los trópicos.

Referencias:

- Berry J, Wolf A, Campbell JE, Baker I, Blake N, Blake D, Denning AS, Kawa SR, Montzka SA, Seibt U, Stimler K. A coupled model of the global cycles of carbonyl sulfide and CO₂: Una posible nueva ventana al ciclo del carbono. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2013 Jun; 118(2):842-52. doi:10.1002/jgrg.20068
- Denning AS, Fung IY, Randall D. Latitudinal gradient of atmospheric CO₂ due to seasonal exchange with land biota. *Nature*. 1995 Jul 20;376(6537):240-3.
- Hannigan JW, Ortega I, Shams SB, Blumenstock T, Campbell JE, Conway S, Flood V, Garcia O, Griffith D, Grutter M, Hase F. Global atmospheric OCS trend analysis from 22 NDACC stations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2022 Feb 27; 127(4). doi:10.1029/2021JD035764
- Stinecipher JR, Cameron-Smith P, Kuai L, Glatthor N, Höpfner M, Baker I, Beer C, Bowman K, Lee M, Miller SM, Parazoo N. Remotely sensed carbonyl sulfide constrains model estimates of Amazon primary productivity. *Geophysical Research Letters*. 2022 Mayo 16; 49(9). doi:0.1029/2021GL096802
- Wang X, Jiang X, Li KF, Liang MC, Kuai L, Tan L, Yung YL. Variations of Carbonyl sulfide during the dry/wet seasons over the Amazon. *Geophysical Research Letters*. 2023 Mar 16;50(5):e2022GL101717.

El comentario plantea una cuestión crítica en el estudio de los bosques tropicales que también hemos afrontado en nuestro Libro Blanco. Para responder mejor a la cuestión específica de la utilización de la variación de los coeficientes de mezcla atmosférica del

sulfuro de carbonilo (COS) para limitar la GPP, hemos incluido la importancia potencial de esta medida en la Sección 2.2.

- Un aspecto que podría mejorarse en el estudio PANGEA es la falta de una estrategia clara para ampliar espacialmente los resultados. Aunque esto podría quedar fuera del alcance actual del estudio o ser prematuro, dado que aún se trata de una propuesta, es importante tener en cuenta cómo se comunicarán los resultados al público en general. Un factor clave en el éxito de proyectos globales como MODIS ha sido su capacidad para destilar la complejidad del mundo en unos pocos impulsores primarios. Por ejemplo, el producto MODIS LAI clasifica las copas de los árboles en función de seis tipos de biomas, ofreciendo una visión global simplificada pero eficaz para los no expertos. Sin embargo, estos modelos suelen clasificar o representar erróneamente los biomas debido a la insuficiencia de datos, lo que subraya la importancia de los resultados de PANGEA para colmar esas lagunas.

Las lecciones de MODIS son muy pertinentes. PANGEA proporciona un marco para escalar e integrar mediciones aerotransportadas y satelitales con observaciones de campo in situ, mediciones de torres de flujo por covarianza de Foucault y modelos para avanzar en la comprensión científica y las capacidades de teledetección en áreas temáticas que abordan directamente los objetivos del Área de Enfoque del Ciclo del Carbono y los Ecosistemas de la NASA, en alineación con las Áreas de Enfoque del Ciclo del Agua y la Energía y la Variabilidad y el Cambio Climáticos. PANGEA establecerá una red de campañas coordinadas de campo y aerotransportadas distribuidas a través de ecosistemas forestales tropicales específicos para cubrir lagunas de datos y permitir el escalado entre conjuntos de datos de campo y de teledetección, así como la modelización a escala regional y pantropical. Como se señala en el comentario, se desarrollarán enfoques de escalado específicos como parte del Plan Experimental Conciso y a través de las propuestas y actividades del Equipo Científico.

- En cuanto a la dinámica del carbono, veo tres áreas clave que necesitan mejoras:
 - Falta de mediciones aéreas de gases traza para informar sobre el balance de carbono a escala de cuenca
 - Falta de un plan concreto para cuantificar los componentes del flujo de carbono a escala de cuenca, es decir, la fotosíntesis, la respiración y las emisiones de los incendios.
 - Falta de concentración en la estación húmeda
- Estas áreas que faltan son críticas para el objetivo declarado de PANGEA de "Restringir la incertidumbre del modelo de las predicciones futuras del flujo de carbono tropical" (línea 312, página 10).
- Actualmente, el componente científico aerotransportado de PANGEA se centra exclusivamente en observaciones de teledetección aerotransportada (Sección 6.2.3, página 64) sin mencionar las observaciones de gases traza (por ejemplo, CO₂, CO y CH₄) para informar la cuantificación del flujo de carbono a escala continental. Sin estas

mediciones, es poco probable que reduzcamos la gran incertidumbre existente en el balance neto de carbono a escala de cuenca y en los componentes del flujo de carbono o que transformemos la comprensión de la dinámica del carbono a escala continental sobre los trópicos. Cabe señalar que algunas inversiones atmosféricas globales ya asimilan las concentraciones medias de CO₂ observadas por satélite (por ejemplo, OCO-2 MIP). Estas inversiones presentan mayores incertidumbres en los trópicos que en las latitudes medias, debido a la frecuente nubosidad en la estación húmeda, a la menor estacionalidad y a la menor señal de los flujos netos de carbono, así como a la falta de redes de torres in situ y de observaciones aéreas. Si PANGEA recurre exclusivamente a las concentraciones medias de CO₂ observadas por satélite para limitar el balance de carbono de la Amazonía y el África tropical, no se producirá ningún avance en comparación con el estado actual de la cuestión, lo que en mi opinión constituye una oportunidad perdida.

- También me gustaría señalar que las mediciones de gases traza aerotransportados han desempeñado un papel clave en anteriores campañas de campo de la NASA, como las mediciones de perfiles verticales de Manaos durante LBA (<https://doi.org/10.3334/ORNLDAA/1175>) y las mediciones de gases traza aerotransportados CARVE y Arctic-CAP durante ABoVE (Sweeney et al., 2022). Estas mediciones de gases traza ayudan a identificar grandes emisiones de metano en la Amazonía oriental (Miller et al., 2007) y la Alaska boreal (Chang et al., 2014) y revelan patrones de fotosíntesis y respiración a escala biológica, que difieren de las simulaciones de modelos de la biosfera terrestre (Commane et al., 2017; Hu et al., 2021). Los retos que plantean las observaciones de gases de efecto invernadero por satélite en los trópicos (Frankenberg et al., 2024) deberían motivar más observaciones de gases traza desde el aire para complementar la visión desde los satélites. Es cierto que PANGEA no tiene por qué repetir lo que han hecho LBA y ABoVE, pero dada la escasez de mediciones in situ de gases traza procedentes de la Amazonía y el África tropical, sería negligente no tener en cuenta los valores únicos de las mediciones aerotransportadas de gases traza para la investigación del ciclo del carbono.
- También puede ser útil para PANGEA identificar instituciones locales que colaboren en la recogida de mediciones de gases traza en el aire. Por ejemplo, gran parte de los avances recientes en la comprensión del balance de carbono de la Amazonía se basa en las mediciones de gases traza en el aire recogidas por el grupo de Luciana Gatti en el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Brasil (Gatti et al., 2014, 2021, 2023). Esto significa que puede que PANGEA no tenga que empezar desde cero para realizar dichas mediciones; ya existen socios locales en los que apoyarse. Aprovechar las asociaciones locales parece fundamental para facilitar las mediciones de gases traza en el aire, que requieren mucho trabajo y son clave para comprender la dinámica del carbono a escala de cuenca.

Una de las barreras para el uso efectivo de los datos actuales de abundancia total de la columna por satélite para gases traza es la falta de datos efectivos de calibración y

validación en los trópicos (Sección 3.1.1). El comentario aboga por mediciones aéreas adicionales de gases traza que reconocemos en la Sección 3.1.1.

- Por otra parte, tampoco se ha indicado cómo contribuirán las campañas de teledetección aérea y las observaciones por satélite a resolver el problema de la separación de la fotosíntesis y la respiración en el balance neto de carbono. Cuantificar por separado la fotosíntesis y la respiración es importante porque responden de forma diferente al clima y esta cuestión ha sido el núcleo de la incertidumbre de los modelos en las proyecciones futuras del ciclo del carbono en los trópicos. Las mediciones de la concentración y el flujo de CO₂ no pueden restringir de forma única la fotosíntesis y la respiración al mismo tiempo. Aunque el libro blanco de PANGEA cita la fluorescencia de clorofila inducida por el sol (SIF) como un indicador indirecto de la fotosíntesis, la SIF no puede restringir la magnitud de la asimilación fotosintética del carbono porque todos los modelos actuales basados en la SIF se basan en relaciones estadísticas a nivel de sitio entre la SIF y la fotosíntesis. Se necesitan observaciones simultáneas de una serie de gases traza del ciclo del carbono, incluidos los isótopos del carbono y del oxígeno (13C-CO₂ y 18O-CO₂), el sulfuro de carbonilo y el monóxido de carbono, para restringir completamente los principales componentes del flujo de carbono e informar sobre los procesos del ciclo del carbono en los modelos. Ha habido ejemplos exitosos de uso de mediciones de gases traza CARVE para restringir por separado la fotosíntesis y la respiración en el dominio ABoVE (Hu et al., 2021; Kuai et al., 2022), por lo que esto no es imposible.

Como se indica en la respuesta a (9), hemos considerado el sulfuro de carbonilo. Además, hemos incluido el CO, el COS y los isótopos entre las posibles mediciones para resolver las cuestiones relativas a la partición del carbono.

- Mi último punto para esta pregunta se refiere a la estación húmeda. Me desconcierta que PANGEA limite las mediciones al "inicio de la estación seca" y al "final de la estación seca" sin considerar mediciones continuas a lo largo de las estaciones seca y húmeda (líneas 477-484, página 15). En primer lugar, no tendremos un conocimiento preciso del balance de carbono en una región tropical si tenemos lagunas de medición la mitad del tiempo. En segundo lugar, la limitada visión de la dinámica del carbono en la estación húmeda desde los satélites de gases de efecto invernadero (Frankenberg et al., 2024) debería requerir más y no menos mediciones en la estación húmeda. En tercer lugar, las perturbaciones de la estación húmeda, como el derribo de árboles por el viento, son vías importantes de pérdida de biomasa aérea. Si bien es cierto que la estación húmeda plantea problemas logísticos, dejarla completamente al margen es, una vez más, una oportunidad perdida.

La terminología de "inicio de la estación seca" y "final de la estación seca" era confusa, así que la hemos cambiado. El objetivo de la temporización de la campaña es capturar el bosque cuando está fisiológicamente bien regado (final de la estación húmeda) y en el momento en que sufre más estrés hídrico (final de la estación seca). Con el fin de equilibrar los costes y beneficios de las misiones aerotransportadas para las observaciones de teledetección de superficie mediante sensores ópticos, creemos que es

prudente evitar el pico de la estación húmeda. Sin embargo, hemos subrayado la importancia de las mediciones continuas en los emplazamientos de campo para cubrir la gama de condiciones estacionales. Además, defendemos el potencial de las mediciones con drones para proporcionar también cobertura estacional en zonas limitadas.

Referencias

- Chang, R. Y.-W., Miller, C. E., Dinardo, S. J., Karion, A., Sweeney, C., Daube, B. C., Henderson, J. M., Mountain, M. E., Eluszkiewicz, J., Miller, J. B., Bruhwiler, L. M. P., & Wofsy, S. C. (2014). Emisiones de metano de Alaska en 2012 a partir de observaciones aéreas CARVE. Actas de la Academia Nacional de Ciencias, 111(47), 16694-16699. <https://doi.org/10.1073/pnas.1412953111>
- Commane, R., Lindaas, J., Benmergui, J., Luus, K. A., Chang, R. Y.-W., Daube, B. C., Euskirchen, E. S., Henderson, J. M., Karion, A., Miller, J. B., Miller, S. M., Parazoo, N. C., Randerson, J. T., Sweeney, C., Tans, P., Thoning, K., Veraverbeke, S., Miller, C. E., & Wofsy, S. C. (2017). Fuentes de dióxido de carbono de Alaska impulsadas por el aumento de la respiración de principios de invierno de la tundra ártica. Actas de la Academia Nacional de Ciencias, 114(21), 5361-5366. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618567114>
- Frankenberg, C., Bar-On, Y. M., Yin, Y., Wennberg, P. O., Jacob, D. J., & Michalak, A. M. (2024). Sequía de datos en los trópicos húmedos: How to Overcome the Cloud Barrier in Greenhouse Gas Remote Sensing. *Geophysical Research Letters*, 51(8), e2024GL108791. <https://doi.org/10.1029/2024GL108791>
- Gatti, L. V., Gloor, M., Miller, J. B., Doughty, C. E., Malhi, Y., Domingues, L. G., Basso, L. S., Martinewski, A., Correia, C. S. C., Borges, V. F., Freitas, S., Braz, R., Anderson, L. O., Rocha, H., Grace, J., Phillips, O. L., & Lloyd, J. (2014). Sensibilidad a la sequía del balance de carbono amazónico revelada por mediciones atmosféricas. *Nature*, 506(7486), 76-80. <https://doi.org/10.1038/nature12957>
- Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L. G., Tejada, G., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A. H., Corrêa, S. M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C. S. C., Crispim, S. P., & Neves, R. A. L. (2021). La Amazonia como fuente de carbono vinculada a la deforestación y al cambio climático. *Nature*, 595(7867), 388-393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Gatti, L. V., Cunha, C. L., Marani, L., Cassol, H. L. G., Messias, C. G., Arai, E., Denning, A. S., Soler, L. S., Almeida, C., Setzer, A., Domingues, L. G., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Correia, C. S. C., Tejada, G., Neves, R. A. L., Rajao, R., Nunes, F., ... Machado, G. B. M. (2023). Increased Amazon carbon emissions mainly from decline in law enforcement. *Nature*, 621(7978), 318-323. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06390-0>
- Hu, L., Montzka, S. A., Kaushik, A., Andrews, A. E., Sweeney, C., Miller, J., Baker, I. T., Denning, S., Campbell, E., Shiga, Y. P., Tans, P., Siso, M. C., Crotwell, M., McKain,

K., Thoning, K., Hall, B., Vimont, I., Elkins, J. W., Whelan, M. E., & Suntharalingam, P. (2021). COS-derived GPP relationships with temperature and light help explain high-latitude atmospheric CO₂ seasonal cycle amplification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(33), e2103423118.
<https://doi.org/10.1073/pnas.2103423118>

Kuai, L., Parazoo, N. C., Shi, M., Miller, C. E., Baker, I., Bloom, A. A., Bowman, K., Lee, M., Zeng, Z., Commane, R., Montzka, S. A., Berry, J., Sweeney, C., Miller, J. B., & Yung, Y. L. (2022). Quantifying Northern High Latitude Gross Primary Productivity (GPP) Using Carbonyl Sulfide (OCS). *Global Biogeochemical Cycles*, 36(9).
<https://doi.org/10.1029/2021GB007216>

Miller, J. B., Gatti, L. V., d'Amelio, M. T. S., Crotwell, A. M., Dlugokencky, E. J., Bakwin, P., Artaxo, P., & Tans, P. P. (2007). Airborne measurements indicate large methane emissions from the eastern Amazon basin. *Geophysical Research Letters*, 34(10), 2006GL029213. <https://doi.org/10.1029/2006GL029213>

Sweeney, C., Chatterjee, A., Wolter, S., McKain, K., Bogue, R., Conley, S., Newberger, T., Hu, L., Ott, L., Poulter, B., Schiferl, L., Weir, B., Zhang, Z., & Miller, C. E. (2022). Using atmospheric trace gas vertical profiles to evaluate model fluxes: A case study of Arctic-CAP observations and GEOS simulations for the ABoVE domain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(9), 6347-6364.
<https://doi.org/10.5194/acp-22-6347-2022>

- No me quedó claro hasta qué punto se estudiarían las zonas de transición del bosque tropical al subtropical como sustitutos de las condiciones futuras o el impacto de los cambios en la superficie terrestre sobre la función del bosque tropical. La delimitación del bosque tropical en la Figura 6 es clara, pero si PANGEA significa "pantropical", y dado el papel preponderante de la deforestación tropical en todos los sistemas de estudio, no me quedó claro cómo podrían integrarse los sistemas de sabana/cerrado, deforestados, agrícolas o de pastizales para mejorar nuestra comprensión del papel único de los propios bosques tropicales. Los bosques del continente marítimo y del sudeste asiático proporcionan un contexto crítico para otros sistemas de bosques tropicales, pero también comprenden la necesidad de mantener el alcance dentro de lo razonable, y estos sistemas tropicales se integrarán en el estudio.

Como indica el comentario, la gama potencial de estudios PANGEA es muy amplia. En el borrador del Libro Blanco, utilizamos vagamente el término "trópicos". Sin embargo, nuestra propuesta de estudio se centra en los bosques húmedos tropicales. Esto se aclara ahora en la sección 1.4.

- Se trata de un trabajo de gran envergadura que contará con la ayuda y ejecución de varios grupos de trabajo, así como de nativos de las zonas que se van a investigar. Tras leerlo detenidamente, el proyecto parece bien enlazado. A medida que se desarrolle la investigación, pueden ser necesarias mejoras específicas, pero en general la propuesta está muy bien estructurada.

- Una cosa que me viene a la mente es que el proyecto es bastante ambicioso en cuanto al aiento de preguntas científicas que pretende abordar.

Estamos de acuerdo en que el alcance es grande, y por eso hemos contado con la colaboración desde el principio de los trabajos de delimitación del alcance. También estamos explorando activamente la cofinanciación (sección 10.2).

- La participación de universidades locales y centros de investigación/laboratorios nacionales. De los sitios de estudio (equipados con eddy covariance) que se mencionan, parece que esas torres de la CE son las que los IPs son de los EE.UU., sin embargo, podría haber otros. Otro punto de interés que podría mejorarse es considerar México. Existen al menos dos sitios de CE en el área de interés de PANGEA:
 - El Palmar en Yucatán (ref: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JG005629>) La Orduña en Veracruz (ref: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JG004911>) Calakmul en Campeche (en construcción, pero debería entrar en funcionamiento en 2025),
 - Otros sitios de estudio en operación en bosques secos tropicales en Sonora, el límite superior de distribución incluye: Álamos en Sonora (<https://ameriflux.lbl.gov/sites/siteinfo/MX-Aog>).
 - Dicho esto, creo que implicar a los actores locales (es decir, MexFlux) en el libro blanco será valioso, ya que se les reconocerá, y podría mejorar las colaboraciones.

Estos son comentarios valiosos que serán considerados si somos seleccionados para desarrollar un plan operativo especialmente con respecto a los investigadores activos en MexFlux y los sitios de bosques húmedos. Hacemos notar que los bosques secos están fuera del alcance de PANGEA.

- Debilidad del enfoque de datos abiertos casi en tiempo real: La puesta en común de datos abiertos en el contexto de la investigación científica del sistema terrestre sólo es útil si significa un intercambio libre y sin restricciones de datos de observación en tiempo real. Cualquier otro tipo de intercambio de datos que quede restringido únicamente a los miembros de PANGEA o que requiera un largo periodo de tiempo para el intercambio de datos no será capaz de proporcionar los beneficios reclamados en esta propuesta. La NASA es muy consciente de los beneficios de compartir datos abiertos en tiempo real, ya que gracias a ello hemos sido capaces de revolucionar la predicción meteorológica y aprovechar plenamente el poder de la teledetección para la predicción del tiempo. Los avances en la predicción meteorológica no podrían haberse logrado sin un compromiso global para compartir datos meteorológicos en tiempo real (véase la Resolución sobre la Política Unificada de Datos de la Organización Meteorológica Mundial). El mismo principio se aplica a la información procesable sobre el clima y el ciclo del carbono en los trópicos (oportuna, rutinaria). PANGEA debe mostrar una propuesta más explícita de cambio de paradigma sobre el intercambio de datos "reales" y no temer esta discusión. Sin un intercambio de datos libre y sin restricciones en tiempo real como principio básico

de PANAGEA, su potencial para transformar la investigación en los trópicos mediante el aprovechamiento de la misión de la NASA seguirá siendo ilusorio.

Hay aplicaciones en las que los datos deben estar disponibles en tiempo real o casi real, como las previsiones meteorológicas. Sin embargo, esto no es válido para todos los análisis. Es difícil argumentar a favor de los datos en tiempo casi real cuando el objeto de estudio es la variabilidad interanual o interdecenal del flujo de carbono de los ecosistemas. PANGEA está comprometida con los principios de la Ciencia Abierta de la NASA y entregará los datos abiertamente tan pronto como sea posible, con limitaciones razonables de costes. Se minimizarán los retrasos en el intercambio de datos, pero no es posible aplicar un criterio de tiempo casi real o tiempo real para todos los datos.

- Enfoque "ingenuo" de los retos de trabajar en los trópicos: La propuesta aborda los retos de la observación de los trópicos, pero lo hace de forma débil e ingenua sobre cómo PANGEA abordará esos retos. Hay una razón por la que la observación terrestre de los bosques tropicales ha seguido siendo limitada. PANGEA parece entender estas razones pero no transmite cómo se superarán esos retos. Afirmar en la Sección 7.6 que PANGEA utilizará "MOUs" para superar las dificultades de las campañas de observación en los trópicos parece una comprensión ingenua de la magnitud de los retos allí. La propuesta necesita un enfoque mucho más sólido y una definición de las medidas críticas que PANGEA implementará para superar las interrupciones físicas, operativas y socioeconómicas, que son muy probables en los lugares donde PANGEA operará. La implicación de instituciones gubernamentales reales (no sólo instituciones de investigación) de los ámbitos centrales de PANGEA parece bastante débil. Sin un compromiso claro por parte de los países y sus gobiernos, conseguir redes de observación funcionales y continuas en lugares como la cuenca del Congo o el Amazonas parece un programa de alto riesgo que la NASA podría no estar dispuesta a financiar si no se implementan las garantías adecuadas en una fase temprana de la concepción del programa.

La NASA tiene una amplia experiencia en cooperación científica internacional. La NASA fue uno de los principales participantes en LBA, que tuvo un enorme éxito en el descubrimiento científico, en el fortalecimiento de la ciencia brasileña a través del desarrollo de recursos humanos, y en la construcción de confianza y relaciones a largo plazo entre los investigadores que persisten hasta el día de hoy. Centrarse en una frase relativa a los MOU (necesarios para las campañas aéreas) ignora tanto la historia de la investigación de la NASA en los bosques tropicales como el proceso que PANGEA llevó a cabo para construir un diálogo inclusivo (véase la Sección 8 sobre el compromiso de la comunidad). Hay que admitir que las operaciones en países tropicales con una capacidad de gobierno y una infraestructura limitadas suponen un reto. No negamos esos retos, pero es posible que el autor del comentario no conozca los éxitos anteriores de la NASA y sus socios, lo que hace plausible la probabilidad de éxito de PANGEA.

- El camino hacia la acción: Está claro que PANAGEA es una propuesta de investigación. Sin embargo, la sección "De las ciencias de la Tierra a la acción" y el tercer pilar de

PANGEA sobre el camino a la acción parecen débiles y fuera de contacto con los procesos multilaterales actuales más relevantes para la acción global sobre el cambio climático y las observaciones de la Tierra. La descripción de las organizaciones relevantes en las secciones 7 (Tabla 5) y 8 parece un tanto aleatoria. No parece reflejar el resultado de un ejercicio de revisión sistemática para comprender el panorama mundial de las organizaciones que trabajan en la mejora de las observaciones de la Tierra en los trópicos. Están ausentes organizaciones clave de las Naciones Unidas como la Organización Meteorológica Mundial (que actualmente lidera el desarrollo de la Vigilancia Mundial de los Gases de Efecto Invernadero) y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (actor clave para la gestión de la tierra y las inversiones en el uso de la tierra en los trópicos). La CMNUCC apenas se menciona (se menciona en secciones de poca relevancia para lo que hace esta organización) a pesar de ser la organización más crucial que necesita los resultados científicos de PANGEA para informar los compromisos globales sobre la mitigación del clima y nuestro presupuesto de carbono.

El comentario es excelente. El borrador de la sección "De la ciencia de la Tierra a la acción" era demasiado general. Esta sección (Sección 9) se ha modificado sustancialmente. Ahora aborda con más detalle una estrategia más holística.

- De antemano, no hay problemas evidentes aquí, así que considere estos puntos de menor importancia. En la sección en la que se describen los ciclos biogeoquímicos, el único ciclo realmente considerado es el del carbono, centrándose en el CO₂ y el CH₄ principalmente. En la siguiente sección, sin embargo, se presenta una imagen cartografiada de uno de los artículos de Dana Chadwick que muestra concentraciones cartografiadas de Ca, etc. en el dosel (tomadas de imágenes hiperespectrales, creo que correlacionadas con el contenido de nutrientes de las hojas). Hay espacio aquí para posiblemente incorporar ciclos de N y P que puedan añadirse a este proyecto-- particularmente dada la transferencia que ocurre entre el movimiento atmosférico de P (polvo del Sahara creo) que es soplado hacia las Américas. Sin embargo, desconozco el impacto directo en el Amazonas, ya que es más importante para la región de Yucatán, y la transferencia desde África llega mucho más al norte de las regiones boscosas de África. Sin embargo, hay alguna manera de considerar la biogeoquímica adicional más allá del C, reconociendo que requeriría un muestreo terrestre mucho mayor y que los enfoques de teledetección para escalar esas estimaciones son limitados o propensos a un gran error.

Esta observación sobre el borrador del Libro Blanco es correcta. Y hemos tomado medidas para incluir el debate sobre otros ciclos biogeoquímicos en el documento revisado, con especial atención al nitrógeno y al fósforo.

- La sección de perturbaciones presenta una dicotomía entre las perturbaciones naturales y las inducidas por el hombre. Consideremos el papel que desempeña la sequía en el aumento de la posibilidad de que se produzcan incendios provocados por el hombre (por ejemplo, la sequía seca las regiones forestales, lo que aumenta la probabilidad de que la gente queme esa zona para desbrozarla simplemente porque sus posibilidades de

éxito son mayores). esto se ha observado en el Amazonas, aunque se me escapa una referencia inmediata. Esta sección no tiene en cuenta necesariamente la dinámica de las perturbaciones. Pero tal vez sea porque en África no se conocen tan bien esas dinámicas, lo que sería una ventaja para este proyecto, ¡tal vez lo averigüemos! - Los datos de ICESat-2 podrían utilizarse para añadir datos estructurales adicionales de los bosques de la región. Aunque los veo en la Tabla 2, sé que están en el "radar".

Las perturbaciones naturales y las provocadas directamente por el hombre se separan para mayor claridad expositiva. Sin embargo, las interacciones entre clima e incendios son bien conocidas. Por ejemplo, las interacciones de las altas temperaturas, la sequía y los incendios son un tema importante en el debate de la ciencia PANGEA (por ejemplo, P26).

- Esto está fuera del alcance del estudio PANGEA dado el alcance de la convocatoria de la NASA, pero llegar a los procesos subterráneos -nutrientes, dinámica del carbono, biomasa vegetal y asignación de NPP a las raíces, enzimas, exudados y simbiontes- es importante para comprender los procesos que regulan los bosques tropicales. Menciono esto no como una crítica a PANGEA, sino como un comentario sobre el alcance de la convocatoria de la NASA en general.

Agradecemos que el autor del comentario reconozca que la NASA también tiene limitaciones.

- Nos parece que los bosques tropicales del sudeste asiático parecen estar excluidos del estudio PANGEA, y sin embargo estamos hablando de ecosistemas forestales tropicales y de mejorar nuestra comprensión de su funcionamiento. Quizá aquí entran en juego cuestiones presupuestarias, estratégicas o geopolíticas, pero creemos que tener en cuenta todas las regiones forestales tropicales nos permitiría obtener resultados más holísticos y realizar una modelización que afecte a todos los ecosistemas forestales tropicales.
- Los trópicos secos quedan fuera, pero son tan potencialmente importantes para el futuro del ciclo del carbono terrestre como los trópicos húmedos, y sin embargo están menos estudiados y menos comprendidos.

La limitación de recursos no nos permitiría realizar campañas de campo en todas las regiones tropicales. Véase la sección 1.4 sobre el dominio PANGEA. Incluimos un dominio ampliado de bosques húmedos pantropicales, el área más amplia de interés científico, donde pueden llevarse a cabo proyectos adicionales a través de asociaciones, y donde se hará hincapié en los análisis por satélite y modelización. No sabemos con certeza qué zonas incluye el autor del comentario en los trópicos secos, pero hemos defendido la importancia de los bosques húmedos. Parece poco probable, por ejemplo, que otros biomas tropicales puedan tener tanta importancia para el carbono como los bosques húmedos.

- Por favor, considere la identificación de los impulsores que deben completarse a la mayor las lagunas identificadas (ver líneas 426-427) página 55 / 61

Ni los números de página ni los números de línea parecen coherentes con el texto del comentario. No hemos podido responder a este comentario.

Q3. ¿En qué medida eran claros y comprensibles la estructura general y el contenido del informe del estudio PANGEA? Proporcione ejemplos concretos de secciones/conceptos poco claros. Cite los números de página/línea cuando proceda.

- No me queda claro el proceso de recogida de datos y la relación entre los científicos de Estados Unidos y las comunidades de América Latina y África.
- Por lo que he leído, es claro y comprensible. Lo que no me queda claro es cómo podemos (los no estadounidenses) presentar proyectos a la NASA.

PANGEA es un proyecto de colaboración en el que participantes de Estados Unidos trabajarán junto con participantes de países tropicales como socios en igualdad de condiciones. La NASA sólo puede apoyar la investigación en instituciones estadounidenses. Sin embargo, al igual que en LBA, trataremos de asociar los estudios de la NASA con socios locales que puedan acceder a financiación local. Además, buscaremos activamente la cofinanciación de organizaciones privadas que actualmente son muy activas en la financiación de la investigación medioambiental (Sección 10.2).

- Objetivo 1: Caracterizar y cuantificar las respuestas heterogéneas de los bosques tropicales a los cambios antropogénicos. ¿Qué ocurre con la respuesta de los bosques tropicales a las perturbaciones naturales y climáticas (p. ej., tifones/huracanes, sequías, inundaciones, corrimientos de tierras, etc.)?

La sección 2.5 sobre la dinámica de las perturbaciones se ha revisado sustancialmente. Ahora tratamos no sólo las perturbaciones antropogénicas, sino también las naturales a través de los mecanismos enumerados.

- La estructura y el contenido del informe del estudio de PANGEA son muy claros. Por ejemplo en la página 96, línea 1954-1956, entendemos claramente que PANGEA Elucidará patrones de cambios recientes (5-30 años) y en curso en bosques tropicales, paisajes, dinámicas y retroalimentaciones, así como sus variaciones geográficas, con un enfoque medioambiental. Se hace hincapié en las comparaciones entre las Américas y África.
- *C'est la prise en compte de la dynamique social des communautés locales a la base. [Es tener en cuenta la dinámica social de las comunidades locales en la base].*

No hay respuesta a estos comentarios.

- Un aspecto del informe que parece poco claro es el resultado esperado en relación con la "Cartografía y cuantificación de las predicciones de flujo de metano" del estudio sobre Estabilidad de la retención de carbono y flujos de metano (página 108). Mientras que el resto del proyecto parece centrarse en análisis en tiempo presente, la inclusión de un análisis de predicción parece fuera de alcance. Dado que PANGEA recogerá datos hasta el final de la campaña, el tiempo disponible para llevar a cabo dicho análisis de previsión parece limitado.

El Libro Blanco se ha revisado sustancialmente y las proyecciones futuras no quedan fuera de su ámbito de aplicación (Sección 3.3). Por ejemplo, la cuestión de la estabilidad del secuestro de carbono es fundamental para una de nuestras preguntas científicas sobre proyecciones (por ejemplo, P25. En un clima cambiante, ¿qué tipos de bosques funcionalmente distintos son más vulnerables a convertirse en fuentes netas de carbono a la atmósfera en un clima cambiante, qué tipos de bosques son resistentes y por qué?).

- En mi opinión, no hay ningún malentendido particular sobre la estructura general y el contenido. Sigo muchas comunicaciones sobre este informe del estudio de alcance de PANGEA.
- Este informe es exhaustivo y está bien organizado. La introducción expone claramente por qué esta campaña es necesaria y oportuna. Las lagunas de conocimiento y las preguntas están bien articuladas y servirán de hoja de ruta para futuras investigaciones. El informe también identifica las misiones por satélite y los productos de datos que son esenciales para responder a las preguntas de investigación de la campaña PANGEA.
- Los calendarios me parecieron claros y se abordó bien la inestabilidad política (2425), y en el recuadro 1 se expuso un plan avanzado bien razonado para poner en marcha PANGEA con socios internacionales. Estoy un poco menos familiarizado con los estudios de alcance que no pretenden describir detalles específicos a nivel de sitio y creo que el plan, tal como está escrito, está bien razonado y es flexible para todas las diferentes oportunidades que presentará un proyecto financiado.

No hay respuesta a estos comentarios.

- En general, el proyecto se presenta con bastante claridad, pero conviene comprobar las definiciones de algunas siglas según su primera aparición en el texto. (Por ejemplo, la definición de productividad primaria bruta GPP aparece en la Figura 3, pero este acrónimo se utiliza previamente en la Figura 1). Mi sugerencia es que las definiciones de todos los acrónimos, incluso los que resultan sencillos para la gente del campo, se inserten en el texto donde se utilicen por primera vez en cada página en la que se mencionen para facilitar su lectura a personas de otros campos.

Todos los acrónimos se definen ahora cuando se mencionan por primera vez, y hemos incluido una lista de definiciones de acrónimos (Sección 14).

- La estructura general estaba muy bien elaborada y el contenido era claro en general. Un par de cuestiones que he observado al leer el documento son las siguientes 1) las observaciones del flujo de metano y la justificación parece ser una adición de última hora. Es una adición importante, pero al no incluir Pangala et al. 2017 en la línea 119, la sección sobre flujos de metano en 1321-1335 debería incluirse en la Sección 2.1.

El autor del comentario está en lo cierto y, desde entonces, la sección se ha redactado de nuevo y se ha integrado más a fondo (Secciones 2.1. y 3.1.1).

- La sección 2.4 sobre sistemas socioecológicos es muy diferente a las demás secciones 2.x. Tiene más declaraciones sobre lo que hará PANGEA (1061-1069; 1090-1093 1161-1163), esta sección también se beneficiaría del estudio de Levis et al. 2017 (Science 355, 925-931) sobre

la influencia de los pueblos precolombinos en la abundancia y distribución de los árboles. Más adelante se trae a colación el concepto de "bosques culturales", para el que Levis et al. serían muy apropiados. En 2.4 el párrafo 1095-1115 tiene grandes bloques de referencias, que estarían mejor separadas por las diferentes fuerzas o impactos a los que se refieren.

La sección 2.4 se ha revisado a fondo para que sea coherente con las demás secciones 2.x. La perspectiva de Levis y sus colegas es muy importante y citamos su reciente (2024) revisión que resume gran parte de su trabajo anterior, incluyendo los estudios de las influencias precolombinas en la abundancia y distribución de los árboles.

- En la discusión sobre el impacto de los grandes mamíferos en la distribución de nutrientes (940) incluir Doughty et al. 2016 PNAS en las refs.

La importancia de la megafauna se analiza en las secciones 2.2 y 3.2.1. Citamos el documento anterior sobre el impacto de la megafauna de Doughty et al. (2013).

- en Dinámica de las perturbaciones, línea 1198 la comprensión más profunda de los conductores no está, que yo sepa, en la Sección 2.4. Línea 1229 no estoy seguro de dónde viene la afirmación entre paréntesis. Línea 1261 los ciclones tropicales tienen el mayor efecto en los sistemas forestales expuestos al océano/mar. Sugeriría fusionar este párrafo con el que empieza en la línea 1227.

Las perturbaciones se tratan ahora en el apartado 2.5, que se ha revisado considerablemente. La comprensión de las perturbaciones depende, en parte, de los sistemas socioecológicos analizados en el apartado 2.4.

- En la línea 1315 incluir Saleska et al. 2003, Science como referencia para el cambio de intensidad del sumidero de carbono. Línea 1402 hablando de covarianza de Foucault, sería bueno tener un mapa de ubicaciones de CE y ubicaciones de GeoTree. La sección 3 no incluye experimentos de desviación de precipitaciones, fertilización con CO₂ o temperatura, mientras que Q8, Q9, Q19 y !23 dependen de la experimentación para abordar estas cuestiones. Un lugar en Perú donde el bosque limita con una fuente termal son lugares potencialmente interesantes (Kullberg et al. 2023, New Phytologist) en los que centrarse para determinar el impacto del aumento de la temperatura en las especies arbóreas y su resiliencia térmica.

Los lugares y ubicaciones potenciales forman parte de los paisajes PANGEA que incluyen estudios de covarianza de Foucault e inventarios forestales, como se muestra en la tabla de la Sección 6.2.2.

La respuesta de PANGEA al Programa de Ecología Terrestre de la NASA no contempla explícitamente los experimentos en grandes ecosistemas. Estos son valiosos y pueden ser cofinanciados por otras agencias o donantes privados, como fue el caso del experimento de sequía Seca-Floresta realizado en el Bosque Nacional de Tapajos, Brasil, apoyado por fondos de la NSF como parte de LBA.

- Por favor, líneas 1168-1169 en la frase "Las actividades de PANGEA... necesitan gobernar... eficazmente"; ¿querría decir "gestionar" en lugar de "gobernar"?

Utilizamos la palabra "gobernar" para distinguir las actividades de los responsables de la toma de decisiones.

- El proyecto está muy bien redactado y estructurado.
- Mi primera sugerencia general es destacar que el proyecto se basa en el conocimiento existente para hacerlo avanzar. Así, en lugar de tratar de colmar lagunas de conocimiento, yo utilizaría algo como "hacer avanzar el conocimiento (o la comprensión científica)".

La existencia de algunos conocimientos sobre los bosques tropicales no excluye la existencia de lagunas en esos conocimientos. Mantendremos la redacción actual.

- Las dos primeras preguntas parecen descriptivas. Sugiero encontrar un factor relacional (por ejemplo, analizar la relación entre X e Y), como se hace en la pregunta 3.

Las preguntas se elaboraron mediante un proceso exhaustivo en el que participaron amplios grupos de trabajo. Aunque el comentario es válido, no queremos introducir cambios en las preguntas a menos que sean poco claras o conduzcan a estudios ineficaces. No creemos que sea necesario cambiar Q1 o Q2.

- La palabra "Antropoceno" aparece por primera vez en la pregunta 2. Si considera pertinente mantenerla, le sugiero que introduzca y explique el concepto antes (teniendo en cuenta que existe un debate bastante acalorado sobre lo que realmente significa).

El debate científico relacionado con el Antropoceno es un asunto restringido principalmente a los estratigráficos. Inicialmente utilizamos la palabra en su contexto coloquial como el momento en que el sistema terrestre está dominado por los seres humanos. Hay poco debate sobre esta dominación humana. Sin embargo, en el libro blanco ya no utilizamos el término "Antropoceno".

- Los objetivos 1-3 no parecen alinearse directamente con las preguntas 1-3.

Ahora hay 5 objetivos, 3 preguntas transdisciplinares que desglosan la pregunta general y muchas subpreguntas temáticamente específicas. No esperamos que se alineen directamente, ya que algunos de los objetivos están orientados a la ciencia y otros a las aplicaciones y la formación.

- P1) ¿Sería útil especificar las interacciones socioecológicas? Además, la pregunta parece un poco amplia, ya que aborda muchas variables diferentes.

Véase el apartado 2.4 para más información sobre las interacciones socioecológicas.

- P3) No me queda claro si estamos hablando de variaciones entre diferentes bosques o de variaciones en el tiempo en el mismo bosque. Quizá se trate de ambas cosas, pero sugeriría dejarlo claro.

La pregunta se ha modificado para mayor claridad.

- P6) Sugiero dividir esta pregunta en dos: aunque tiene mucho sentido, parece un poco larga y difícil de seguir.

Tenemos muchas preguntas. Como esta pregunta "tiene mucho sentido", hemos preferido no dividirla.

- P9) Sugiero i) especificar los continentes tropicales de los que se habla; ii) dividir la pregunta en dos diferentes pero interrelacionadas.

Como se ha indicado anteriormente, tenemos muchas preguntas y preferimos no dividirlas más. No vemos ninguna ventaja en especificar los continentes en esta pregunta.

- P17) La pregunta parece descriptiva. Yo sugeriría algo como "¿En qué medida y cómo las diferentes actividades humanas y prácticas de gestión apoyan la resiliencia del sumidero de carbono tropical?".

Consideramos que la nueva redacción sugerida para esta pregunta es en gran medida equivalente a la pregunta desarrollada a través del proceso de nuestro grupo de trabajo. Mantenemos la redacción original.

Q4. ¿En qué medida aborda el estudio PANGEA las preguntas u objetivos científicos clave?

- Se evidencia un buen planteamiento de preguntas y objetivos a alcanzar. [Se evidencia un buen planteamiento de preguntas y objetivos a alcanzar].
- Recogida, tratamiento y análisis de datos. C'est sur la collecte le traitement et l'analyse des données. [Se trata de la recogida, el tratamiento y el análisis de los datos].
- El estudio de alcance de PANGEA hizo un gran trabajo al abordar las preguntas científicas clave. Las preguntas científicas estaban presentes siempre que se pensaba en variables ecológicas y geofísicas relevantes para la campaña (págs. 60 a 62), sugerencias de métodos para responder a las preguntas de investigación (págs. 76 a 77) y aplicaciones de la investigación (págs. 107 a 115).
- Al día y para las próximas generaciones de científicos y no científicos.
- La visión para abordar las cuestiones científicas es impresionante.
- Desde mi punto de vista (física del Clima), PANGEA cubre la mayoría de los temas principales. Un tema que sugeriría tratar es el transporte a larga distancia de nutrientes importantes para el bosque y cómo cambiará con el cambio climático. Otro tema importante es el bioaerosol; es importante en la formación de nubes (hielo), la biodiversidad, el transporte vertical y el transporte a larga distancia.

El transporte de nutrientes a gran distancia es importante sobre todo a muy largo plazo. Los bioaerosoles son fascinantes e importantes para la formación de nubes. Ambos temas pertenecen a categorías de investigación relacionadas con PANGEA pero que no forman parte de nuestros estudios principales. Intentaremos colaborar con grupos que tengan puntos fuertes en estas áreas, como el consorcio INPA- Max Planck ATTO.

- En general, el estudio de alcance aborda bien las preguntas clave y los objetivos, aunque se beneficiaría de la inclusión de lugares experimentales en los trópicos para vincularlos a las observaciones por satélite.

La respuesta de PANGEA al Programa de Ecología Terrestre de la NASA no contempla explícitamente los experimentos en grandes ecosistemas. Estos son valiosos y pueden ser cofinanciados por otras agencias o donantes privados, como fue el caso del experimento de sequía Seca-Floresta realizado en el Bosque Nacional de Tapajos, Brasil, apoyado por fondos de la NSF como parte de LBA.

- El objetivo general del estudio exploratorio PANGEA es mejorar nuestra comprensión del funcionamiento de los ecosistemas forestales tropicales, basándose en los estudios y experimentos actuales para colmar las lagunas de datos, sobre todo en las regiones tropicales de África. Para lograrlo, PANGEA tiene previsto recoger mediciones sobre el terreno, en particular en los lugares candidatos de África, financiar estudios de doctorado y de máster sobre temas relacionados con el funcionamiento de los ecosistemas tropicales para confirmar las hipótesis planteadas, crear importantes asociaciones con los gobiernos de los países tropicales y las comunidades locales, y beneficiarse del apoyo financiero y logístico de la prestigiosa NASA, factores todos ellos que creemos que ayudarán al proyecto PANGEA a alcanzar su objetivo. Sin embargo, la exclusión de las regiones tropicales del sudeste asiático es un problema que hará imposible realizar proyecciones globales para todas las regiones forestales tropicales. Esto supone un obstáculo para el proyecto PANGEA.

La limitación de recursos no nos permitiría realizar campañas de campo en todas las regiones tropicales. Véase la sección 1.4 sobre el dominio PANGEA. Incluimos un dominio ampliado de bosques húmedos pantropicales, el área más amplia de interés científico, donde pueden llevarse a cabo proyectos adicionales a través de asociaciones, y donde se realizarán análisis por satélite y modelización.

Q5. ¿Fueron adecuadas las metodologías y herramientas propuestas (por ejemplo, teledetección, análisis de datos) para abordar los objetivos del estudio PANGEA?

- *Si, muy adecuadas para el estudio PANGEA.* [Sí, muy adecuadas para el estudio PANGEA.]
- La recogida de datos rutinaria en aviones locales, y la integración con redes globales como ACTRIS, promueven las propuestas de ARM-DOE para ayudar a resolver temas específicos de PANGEA...

Se trata de sugerencias bienvenidas que parecen apropiadas para las propuestas de los investigadores. ACTRIS está activo en Europa y puede que no lo esté en el ámbito de PANGEA. El uso de las instalaciones ARM del DOE puede ser apropiado para algunas investigaciones. Se necesitarían propuestas separadas al DOE.

- Hay una revisión exhaustiva de las metodologías (Cuadros 1 y 4) que los autores utilizaron para mostrar la cantidad de recursos que tenemos hoy en día y que no se han aplicado en los bosques tropicales. PANGEA hace un buen alegato al señalar que estas metodologías no son absolutas y que los investigadores deben ampliar los límites de su comprensión de la ciencia.

[No hay respuesta a este comentario.](#)

- El plan de observación era completo, pero hay un par de distinciones sobre los satélites geoestacionarios que necesitan algo más de descripción. Me gusta la inclusión de las observaciones de los satélites geoestacionarios, que están bien preparados para observar los ecosistemas tropicales, ya que se sitúan por encima del ecuador en órbita geoestacionaria y realizan observaciones subdiarias en escalas temporales de minutos a decenas de minutos, que nos ayudan a informarnos sobre los procesos subdiarios, mientras que las mediciones frecuentes hacen más posible encontrar períodos libres de nubes. Los ABI de la serie GOES-R, especialmente GOES-16 y GOES-19, se sitúan por encima de Sudamérica, con excelentes vistas del Amazonas, pero el Advanced Himawari Imager (AHI) se encuentra en la serie Himawari 8/9 por encima del Continente Marítimo, con vistas principalmente de Asia Oriental, Australasia y sus alrededores. Los generadores de imágenes de las series Fengyun-4 y GEO-KOMPSAT-2 también observan Asia Oriental. Hay un pequeño vacío en la cobertura geoestacionaria sobre el extremo oriental de África, y el MTG-I1 aún no ha sido encargado a METEOSAT-12, a pesar de que lleva volando casi dos años y será absolutamente crítico para la observación de África. Tal y como estaba escrito, se indicó que el AHI observaba el Amazonas (esto debe corregirse). La iniciativa GeoNEX de la NASA ha sido fundamental para sintetizar las observaciones terrestres desde satélites geoestacionarios, y no estaba claro si se integraría su experiencia (lo que yo recomendaría encarecidamente; tampoco sé si los equipos de la NASA pueden incluirse explícitamente en los proyectos de alcance de la NASA). También es importante señalar que GOES-R puede utilizarse para inferir la GPP y la respiración de los ecosistemas mediante modelos, al igual que ocurre con otras estimaciones de flujo de carbono basadas en satélites. Destacar aún más su capacidad para inferir la radiación de onda corta descendente subdiaria y la temperatura de la superficie terrestre podría ayudar realmente a explicar cómo crean una plataforma de observación en tiempo real única para los procesos críticos del sistema terrestre.

[Agradecemos el comentario detallado sobre las observaciones geoestacionarias, pero dada la gran variedad de plataformas de satélites y sensores que tratamos en el Libro Blanco, no podemos aprovechar toda esta información en el documento. Agradecemos que se haya señalado el error relativo al IHA, que ya ha sido corregido.](#)

- Sí, en general las metodologías parecen apropiadas, aunque creo que el estudio PANGEA deja fuera los lugares experimentales para investigar más a fondo los impactos de los impulsores del cambio climático, como la sequía y el enriquecimiento de dióxido de carbono, y los lugares de cambio de uso del suelo, como los lugares TMFO (véase la sección de respuesta de las partes interesadas/comunidades). El alcance científico habla

de los impactos del cambio climático y me pregunto si éstos pueden abordarse plenamente sólo con estudios observacionales.

La respuesta de PANGEA al Programa de Ecología Terrestre de la NASA no contempla explícitamente los experimentos en grandes ecosistemas. Estos son valiosos y pueden ser cofinanciados por otras agencias o donantes privados, como fue el caso del experimento de sequía Seca-Floresta realizado en el Bosque Nacional de Tapajos, Brasil, apoyado por fondos de la NSF como parte de LBA.

- El estudio de alcance parece suficientemente exhaustivo. Sin embargo, las observaciones de métodos y mediciones/variables parecen quedarse cortas en algunas áreas relacionadas con el aumento de la comprensión de las fuentes y sumideros naturales en los trópicos. Por ejemplo, el uso del fraccionamiento isotópico como restricción para la modelización descendente y ascendente está ausente en las necesidades y métodos de observación propuestos (sólo se menciona ligeramente en la Tabla 4). Existen pruebas fehacientes de que la recogida sistemática de datos isotópicos es un método eficaz para dividir las fuentes de emisiones. Por ello, las mediciones de isótopos estables en el hemisferio norte se han convertido en un componente clave de las redes de observación. Dadas las limitaciones y costes de la recogida y análisis de estos datos en los trópicos, la propuesta debería mencionarlo explícitamente como una de las áreas de observación que PANGEA tratará de reforzar.

Estamos de acuerdo en que los métodos isotópicos pueden proporcionar fuertes restricciones para la partición de los procesos de los ecosistemas. Éstos figuran entre los métodos para análisis integradores en la Sección 6.3.

- Me gustaría sugerirle que considere algunos períodos específicos del año (período de transición, de seco a húmedo y viceversa) para las actividades descritas en la línea 2112-2113. Debido a sus peculiares características atmosféricas. Estos períodos en África Occidental, especialmente en el norte de Benín son los que tienen mucha

El Libro Blanco apunta a períodos de campaña intensiva al principio y al final de las estaciones secas, que pueden incluir transiciones. Esto variará según la región y, por tanto, afectará al calendario de la campaña.

Q6. ¿Ha logrado el estudio PANGEA identificar los principales retos o incertidumbres de la campaña de campo propuesta?

- *Muy de acuerdo ya que las propuestas se han recogido de manera participativa en muchas reuniones.*
- Sí, supongo que sí, pero varios países, cada uno con procedimientos administrativos específicos como licencias para mediciones, aviones, etc. podría ser un reto.
- Sí, el estudio identificó eficazmente los principales retos e incertidumbres, sobre todo en la sección 7, que trata de la Viabilidad técnica y logística. Los autores abordaron varios

problemas potenciales, como la complejidad de gestionar un equipo numeroso, y presentaron soluciones para evitar cuellos de botella en la comunicación racionalizando la estructura organizativa de la campaña. También se reconocieron otros retos, como la posible falta de compromiso de la comunidad o los problemas de financiación internacional, y se sugirieron como soluciones estrategias como los planes de compromiso y el aprovechamiento de las redes para obtener financiación alternativa.

- Como ya se ha señalado, las notas relativas a la inestabilidad política me han parecido bien razonadas.
- La campaña de campo propuesta aborda de lleno los problemas del cambio climático y la biodiversidad, ambos relacionados con la deforestación, el cambio de uso del suelo, los incendios, las sequías, etc. El cambio climático, cuyas repercusiones provocan numerosas pérdidas de vidas humanas e infraestructuras, está relacionado con el flujo de carbono contenido en el CO₂ y el CH₄, entre otros.
- El principal reto identificado por PANGEA está relacionado con la incertidumbre de la calidad de la respuesta de las regiones forestales tropicales al cambio climático, que a su vez está vinculado en gran medida a los flujos de carbono en la atmósfera. Lo cierto es que la diversidad de los paisajes forestales tropicales y las amenazas antropogénicas a las que se enfrentan conducen inevitablemente a una heterogeneidad en la respuesta y la vulnerabilidad de estos paisajes a las amenazas antropogénicas. Así pues, comprender el flujo de carbono atmosférico y sus tendencias actuales y futuras será importante para entender mejor el problema del cambio climático, que es el mayor reto al que se enfrenta la humanidad en la actualidad. Así pues, la campaña PANGEA contribuye a identificar el mayor reto contemporáneo al que se enfrenta la humanidad.

[A través de nuestras extensas consultas, adquirimos mucha sabiduría y perspectiva en relación con los retos y las incertidumbres.](#)

Q7. ¿Cómo calificaría la pertinencia del diseño del estudio propuesto para avanzar en nuestra comprensión de los ecosistemas terrestres?

- *El diseño aborda puntos específicos para comprender el funcionamiento y dinámica de los ecosistemas. [El diseño aborda puntos específicos para comprender el funcionamiento y dinámica de los ecosistemas].*
- PANGEA es necesario porque las campañas de campo en los bosques tropicales permitirían a los científicos estudiar el estado natural de los biomas tropicales y cómo influyen en él las actividades humanas:
 - Comprender el estado natural, por ejemplo, cómo se forman, crecen y viajan las partículas de aerosol dentro de los trópicos, por ejemplo, el polvo de África a Sudamérica;
 - La medición del impacto humano, como la contaminación y la deforestación, se desplazó por la atmósfera desde las latitudes templadas hasta los trópicos;

- Identificación de zonas críticas consideradas puntos de inflexión para las emisiones terrestres.
- Medición y validación de variables terrestres como el índice de área foliar (LAI) y la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida (FAPAR), que son variables de forzamiento esenciales para diferentes modelos.
- El equipo ha realizado un excelente trabajo, destacando el enorme papel de los ecosistemas tropicales en el sistema terrestre y centrándose en los ciclos biogeoquímicos e hidrológicos acoplados, los sistemas de detección más avanzados y las cuestiones críticas que trascienden los límites disciplinarios y geográficos.
- Yo consideraría que la relevancia de esta propuesta es alta, basándome en los enfoques utilizados y en la importancia de las regiones tropicales para el ciclo global del C (y, por supuesto, en cómo estas zonas se ven amenazadas por el cambio climático).

[No hay respuesta a estos comentarios.](#)

- La relevancia del diseño del estudio es muy importante para nuestra comprensión de los ecosistemas terrestres. Sin embargo, creo que el alcance del estudio es demasiado observacional y podría beneficiarse de sitios experimentales o identificar sitios que tengan condiciones muy específicas, como el experimento de "calentamiento natural" de las aguas termales.

[Ya hemos respondido anteriormente a comentarios similares sobre experimentos artificiales o "naturales".](#)

- El objetivo de PANGEA, que consiste en comprender mejor el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, es bueno y loable; la consecución de este objetivo permitirá probablemente elaborar políticas adecuadas para hacer frente a problemas como el cambio climático y la pérdida de biodiversidad. PANGEA se ha diseñado estratégicamente a partir de un conjunto de hipótesis vinculadas, en particular, a la heterogeneidad de la respuesta y la vulnerabilidad de las regiones tropicales a las amenazas antropogénicas. PANGEA prevé la verificación de estas hipótesis mediante la coordinación de datos de campo, aéreos y satelitales. Creemos que esto es relevante para alcanzar los objetivos de PANGEA. Lo más interesante de PANGEA es que ha prestado especial atención a los bosques tropicales africanos, dando prioridad a las mediciones terrestres y aéreas debido a las grandes lagunas de datos y conocimientos en esta región tropical. Aunque se trata de una buena orientación para el proyecto PANGEA, sigue siendo parcial debido a la exclusión de los bosques tropicales del sudeste asiático, cuya inclusión en el estudio habría permitido obtener datos globales y realizar proyecciones más globales para todas las regiones forestales tropicales. ¿En qué medida considera viable la ejecución técnica y logística propuesta para la campaña de campo? La ejecución técnica y logística de la campaña de campo propuesta parece factible por dos razones:

- La primera es que en el estudio participan científicos de las distintas ciencias humanas y sociales de todos los ámbitos y, en particular, de los paisajes forestales tropicales. Los científicos de las regiones tropicales tienen la ventaja de dominar la realidad de lo que ocurre en términos de perturbaciones climáticas o las consecuencias de estas perturbaciones y amenazas para los equilibrios biogeoquímicos y la biodiversidad local. Esto supone una ventaja a la hora de abordar las preguntas científicas adecuadas y obtener la información correcta a partir de los datos o mediciones recogidos sobre el terreno.
- En segundo lugar, el posible patrocinio de la NASA es una baza importante, tanto desde el punto de vista financiero como, sobre todo, logístico, ya que PANGEA no tendrá dificultades para obtener datos fiables de las observaciones aéreas y por satélite de la NASA. Estos datos también podrían proceder potencialmente de otras organizaciones con capacidad para obtener este tipo de información. Además, PANGEA cuenta con un área de estudio empírica representada por las zonas forestales tropicales, que revisten una importancia capital en la lucha contra el cambio climático y la protección de la diversidad. En términos empíricos, la elección de esta área de estudio es un factor importante en la relevancia del proyecto PANGEA.

Ya hemos comentado anteriormente la inclusión de Asia. Asia no está excluida: Forma parte del ámbito ampliado. PANGEA no busca recursos para campañas en Asia. La asociación con otros patrocinadores podría extender el trabajo de PANGEA a Asia siguiendo temas y enfoques científicos similares.

- Echo de menos los trópicos secos.

Véase la respuesta a este tema más arriba.

Q8. ¿En qué medida considera viable la ejecución técnica y logística propuesta para la campaña sobre el terreno?

- *La implementación permitirá validar información local con las metodologías apropiadas a cada región. [La implementación permitirá validar información local con las metodologías apropiadas a cada región].*
- Teniendo en cuenta el número de personas que participan en esta campaña, su realización es factible. Como ocurre con cualquier otro proyecto, esta campaña de campo podría no estar exenta de tropiezos en el desarrollo, pero sólo significaría que los estudios adicionales de la propuesta podrían no ser prioritarios si no responden directamente a una pregunta de investigación. Por ejemplo, como ya se ha mencionado, el análisis de previsión de flujos de gases podría pasar a un segundo plano, ya que los autores podrían dar prioridad a terminar cualquier proyecto de recogida de datos al final de la campaña.
- La realización del trabajo de campo en zonas remotas entraña un alto grado de complejidad y (como se señala en la propuesta) es aún más preocupante en algunas

partes de África, dada la inestabilidad política y social de la región. Sin embargo, reconociendo esto, creo que dados los socios mencionados, la experiencia del equipo implicado... que con recursos suficientes sería muy factible. Será un reto logístico, aunque creo que la gente implicada y las asociaciones descritas indican un gran potencial de éxito.

- Soy experto en ecología de campo sobre el terreno, así que no puedo opinar sobre los aspectos de teledetección, pero todo parece factible.
- El proyecto es bastante ambicioso, tanto por su alcance como por su extensión geográfica: abarca muchas zonas forestales de distintos países de Brasil y Sudamérica. Sin embargo, los planteamientos técnicos y logísticos están bien fundamentados y tienen un gran potencial de éxito en su aplicación sobre el terreno.

No respondo a estos comentarios, salvo para agradecer los votos de confianza.

- Como filipino del trópico que ha trabajado en la selva amazónica, diría que el equipo del proyecto debe tener en cuenta el aspecto de la seguridad en el despliegue de infraestructuras y equipos. También deben tenerse en cuenta los fenómenos extremos, el terreno y el apoyo de la mano de obra. Una torre de flujo de covarianza de Foucault con la que trabajé, la Amazonia, siempre se enfrenta a fallos en los instrumentos debido a la interferencia/intrusión de la fauna. El suministro de energía (principalmente paneles solares) debido a los días nublados es un problema importante. La seguridad del personal y del equipo es vital.

Todas estas son preocupaciones importantes que no son el tema principal de nuestro documento conceptual pero que serán consideraciones de peso si somos seleccionados para desarrollar un plan de experimento operativo. Observamos que la oficina de proyectos de la NASA cuenta con una amplia experiencia en bosques tropicales y se ha enfrentado a problemas similares a los planteados anteriormente.

- Considero que la propuesta aún está bastante abierta al debate sobre su aplicación, pero este primer paso del banco de pruebas es muy importante para dar un impulso. Espero que la propuesta también esté abierta a los no estadounidenses.

La NASA ha hecho más que un "banco de pruebas" en bosques tropicales a través de su experiencia como parte del LBA liderado por Brasil. Los no estadounidenses son bienvenidos a participar, aunque la NASA tiene limitaciones en la financiación de instituciones fuera de los EE.UU. Estamos buscando activamente cofinanciación, como se indica en la Sección 10.2.

Q9. ¿Existe algún obstáculo o reto potencial que el estudio PANGEA no haya abordado adecuadamente?

- *Si hay barreras, son las culturales y de idioma, ya que en el ámbito de intervención de Pangea existe una gran diversidad cultural y de idiomas que debe abordarse con mucha*

importancia [If there are barriers, they are cultural and language barriers, since in the area of Pangea there is a great cultural and language diversity that must be addressed with great importance].

Durante el proceso de definición del alcance, PANGEA trabajó para romper barreras. Por ejemplo, celebramos reuniones regionales con traducción simultánea. Pusimos a disposición el borrador del Libro Blanco en varios idiomas, incluido el español. Hemos respondido a los comentarios sobre el documento que se facilitaron en español y francés. Nuestro documento del Libro Blanco (incluidas estas respuestas) se traducirá al español, francés, portugués y bahasa indonesia. Nuestra intención es continuar con estas prácticas para minimizar las barreras.

- La cuestión de la seguridad de algún campo de estudio.

La seguridad de los participantes en el proyecto es una prioridad absoluta. La evaluación de la seguridad de los emplazamientos sobre el terreno será responsabilidad de la Oficina de Proyectos. Es posible que deban evitarse los lugares de alto riesgo. Véase la Sección 10.5 para una discusión de los riesgos y su mitigación.

- Un reto potencial que PANGEA puede no haber abordado del todo es la escasa representación de Asia en los grupos de alcance, a pesar de que el estudio se centra en las regiones tropicales. Aunque es posible que esta omisión no obstaculice la consecución de los objetivos individuales del proyecto, podría convertirse en un obstáculo cuando se intente presentar las conclusiones de la campaña a escala mundial.

Debido a las limitaciones de recursos, dedicamos más atención a África y América que a Asia. Sin embargo, hicimos actividades de divulgación en Asia y, si recibimos financiación, seguiremos haciéndolo para evitar el posible obstáculo planteado en este acertado comentario.

- Una laguna de conocimiento clave no abordada en el estudio de alcance es cómo afecta la convección profunda tropical a nuestra visión del ciclo del carbono. Los modelos actuales de transporte atmosférico global varían en la parametrización convectiva, y carecemos de una comprensión clara de las atribuciones erróneas del flujo de carbono causadas por la resolución inadecuada del transporte vertical en los trópicos (Stephens et al., 2007). Los recientes avances en los modelos de resolución de nubes son prometedores para representar con precisión la convección tropical y su impacto en la distribución de los trazadores del ciclo del carbono. Esto puede ayudar a mejorar las estimaciones descendentes del flujo de carbono en los trópicos. Un sistema de modelización/asimilación de datos que incorpore los últimos avances en la representación del transporte atmosférico debería ayudarnos a interpretar con mayor precisión las observaciones de gases traza a través de escalas para una mejor comprensión de la dinámica del carbono tropical.
- El informe señala que "se ha demostrado que los flujos de respiración, emisiones de metano y flujos laterales de carbono son sustanciales en los bosques tropicales" (línea

1319-1321, página 36), pero no ofrece ningún plan concreto para medir el transporte lateral de carbono sobre el terreno. En cambio, se afirma que "la inundación de NISAR y BIOMASS apoyará la cartografía de los humedales de los bosques tropicales y se integrará con las medidas de los flujos de agua superficiales de SWOT, permitiendo mediciones directas de los flujos laterales de carbono de los sistemas tropicales" (línea 1374-1376, página 38). Estoy perplejo sobre cómo se puede conseguir esto, dado que ninguno de los satélites mencionados rastrea el carbono inorgánico disuelto o el carbono orgánico disuelto/particulado. ¿Quizás PACE sería útil? Pero seguirían siendo necesarias mediciones sobre el terreno para rastrear el transporte lateral de carbono y validar los productos y modelos de datos obtenidos por satélite.

Referencia

Stephens, B. B., Gurney, K. R., Tans, P. P., Sweeney, C., Peters, W., Bruhwiler, L., Ciais, P., Ramonet, M., Bousquet, P., Nakazawa, T., Aoki, S., Machida, T., Inoue, G., Vinnichenko, N., Lloyd, J., Jordan, A., Heimann, M., Shibistova, O., Langenfelds, R. L., ... Denning, A. S. (2007). Weak Northern and Strong Tropical Land Carbon Uptake from Vertical Profiles of Atmospheric CO₂. *Science*, 316(5832), 1732-1735. <https://doi.org/10.1126/science.1137004>

La mejora de la comprensión del transporte atmosférico queda fuera del ámbito de PANGEA. Las investigaciones propuestas que utilicen inversiones de modelos estarán sujetas a una revisión por pares que debería identificar los problemas con los modelos de transporte utilizados.

Cuantificar los flujos laterales es un problema de investigación que hemos identificado, pero no hemos encontrado la solución.

- Es probable que haya cuestiones granulares que siempre podrían estudiarse con más detalle, pero creo que el documento de alcance aborda suficientemente las preocupaciones en esta fase.

No hay respuesta a este comentario.

- Es necesario mantener el compromiso con los socios de África y América del Sur; hacerlo bien es un reto

Estamos totalmente de acuerdo. En la Sección 10, donde hablamos de la organización del proyecto, mencionamos una serie de mecanismos para facilitar las interacciones en curso. Hemos aprendido de proyectos anteriores que necesitamos construir relaciones interpersonales sólidas basadas en el trabajo conjunto de igual a igual. Esto siempre es un reto para todos los implicados pero, como aprendimos durante el proyecto LBA, no es un obstáculo.

Q10. ¿Cree que el estudio PANGEA fomentará asociaciones significativas con las partes interesadas (por ejemplo, comunidades locales, gobiernos)?

- Esto no es fácil, pero podría mejorarse con los años si se comprende a las partes interesadas y a las comunidades locales... Las fiestas de Navidad, etc., no integrarán a la población local.

Estamos seguros de que el autor del comentario está ironizando. No hemos mencionado actividades como las fiestas de Navidad. El Libro Blanco contiene una sección completa (Sección 8) sobre el compromiso de la comunidad y reconocemos el reto y presentamos estrategias para afrontarlo. También señalamos otro comentario citado aquí en relación con la confianza obtenida de nuestro borrador del Libro Blanco: "El plan para implicar a las comunidades y gobiernos locales en las primeras fases del plan es fundamental y creo que el plan es muy consciente de todas las dinámicas que pueden surgir una vez financiado el proyecto; hay muchas más entidades en juego que para ABoVE. "

- Sí, PANGEA puede fomentar asociaciones significativas con las partes interesadas. Pero como ya he dicho, será importante conseguir el compromiso y la implicación del gobierno desde el principio. Lo mismo con el sector privado que trabaja en el sector forestal, por ejemplo.

Estamos de acuerdo con el comentario. Aportamos pruebas de que hemos iniciado el proceso de compromiso en nuestros apéndices, incluidas las cartas de apoyo (apéndice A) y los apéndices B y C, que detallan las actividades de divulgación que realizamos con gobiernos y otras instituciones.

- Al tratarse de una campaña internacional, PANGEA reforzará las relaciones con los gobiernos locales y las ONG en función de los temas.
- Sí. Trabajan mucho más con las comunidades que con las autoridades estatales.
- Creo que sí. Las regiones tropicales necesitan todo el apoyo que podamos prestarles, dado que el apoyo sería duradero y no de boquilla. Creo que este documento de alcance lo aborda suficientemente. No obstante, animo al equipo a seguir evitando la "ciencia del helicóptero" en la vanguardia de su trabajo (como han hecho aquí).
- PANGEA impresiona por la forma en que formará asociaciones eficaces con las partes interesadas.
- Sí, creo que el proyecto ya ha conseguido reunir a un grupo de entidades muy comprometidas. También creo que, a medida que avance el proyecto, se interesará mucha más gente. Este problema de la conservación de los bosques se está convirtiendo en una preocupación universal y la tendencia es que las asociaciones no harán sino aumentar.
- Sí, porque si PANGEA recibe financiación aportará soluciones a algunos de los retos a los que se enfrentan las partes interesadas y los gobiernos. Por ejemplo, aquí en Benín, en la Reserva Forestal de Lama (sur de Benín), un mosaico de bosques naturales, degradados y

plantaciones de Teck gestionados por la agencia nacional de la madera y los bosques, están buscando la manera de combatir eficazmente los incendios forestales en la estación seca. Éstos consumen muchas poblaciones de árboles y probablemente afectan a la productividad de sus plantaciones y, por tanto, a sus economías. Así pues, el estudio del alcance de PANGEA fomentará sin duda una asociación significativa con las partes interesadas.

Agradecemos estos comentarios y no tenemos ninguna respuesta directa.

- Idealmente, pero tal y como está ahora, la propuesta es muy vaga a la hora de demostrar cómo funcionarán las asociaciones sostenibles a largo plazo para el funcionamiento y mantenimiento de las redes de observación. Garantizar el funcionamiento continuo de la red con el intercambio de datos en tiempo real es una tarea ingente en los trópicos que requiere el apoyo y el compromiso de todos los niveles de gobierno nacionales, no sólo de las comunidades de investigación. El despliegue de expertos, comunicaciones y tecnología en los dominios de PANGEA requiere la coordinación de varios actores sobre el terreno, pero la propuesta parece centrarse intensamente en las instituciones de investigación, que tienen un campo de acción limitado para abordar los retos legales, políticos y socioeconómicos a los que se enfrentarán las campañas sobre el terreno.

El Libro Blanco presenta un plan conceptual y no un plan operativo. Muchas de las cuestiones aquí planteadas son operativas. Esto puede explicar la caracterización del plan como "vago". A través de su largo historial de campañas, incluidas LBA y ABoVE, la oficina de proyectos de la NASA ha demostrado su éxito en los despliegues sobre el terreno, la recogida y el intercambio de datos.

- Todo depende de lo que haga PANGEA para alcanzar este objetivo. Para que estas asociaciones puedan ponerse en marcha, deben cumplirse una serie de requisitos previos que, en mi opinión, son esenciales para que el proyecto PANGEA alcance sus objetivos. En efecto, sin el apoyo de las comunidades locales que viven en los lugares candidatos identificados y elegidos por el proyecto PANGEA, y cuyas zonas comunitarias se incluyen en el estudio con fines experimentales, el PANGEA corre el riesgo de ser rechazado por estas poblaciones. Por lo tanto, es necesario e imprescindible que el proyecto PANGEA lleve a cabo acciones dirigidas a estas poblaciones para garantizar su apoyo y aceptación del proyecto PANGEA. Del mismo modo, sin el apoyo de los gobiernos de los países tropicales, en particular los de la cuenca del Congo, PANGEA no podrá alcanzar sus objetivos. Por esta razón, el carácter formal y legal del cumplimiento de la legislación sobre el acceso a los territorios o paisajes candidatos no será suficiente. Será necesario integrar motivaciones e incentivos adicionales dirigidos directamente a estas comunidades locales y a los miembros del gobierno para fomentar el establecimiento de asociaciones significativas con estas dos entidades. Esto garantizará su plena cooperación y apoyo a los objetivos del proyecto PANGEA.

Siempre es importante establecer relaciones con socios gubernamentales y de la comunidad local. Es un comentario valioso.

Q11. ¿Hay otras partes interesadas o comunidades que deberían haber participado en el estudio PANGEA?

- *Las comunidades campesinas y nativas o cualquier otra que este posesionada en el territorio donde se desarrollara el proyecto, ya ellos cuentan con saberes ancestrales. [Las comunidades campesinas y nativas o cualquier otra que este posesionada en el territorio donde se desarrollara el proyecto, ya ellos cuentan con saberes ancestrales].*

PANGEA manifiesta su interés por la integración de los conocimientos indígenas, locales y tradicionales con la teledetección. Véase, por ejemplo, la sección 9.1 del Libro Blanco.

- El proyecto ha abarcado a casi todas las partes interesadas necesarias para el proyecto.
- Claro, pero sólo será posible identificarlo claramente sobre el terreno. Por tanto, el proyecto debería estar abierto a ampliar su alcance.
- El sector privado, especialmente el que trabaja en el ámbito de la silvicultura, la agricultura y la minería, debería participar activamente.
- Será bueno implicar directamente a las comunidades locales (su representante), sin pasar por las autoridades. Para evitar fraudes.
- También podría ser una buena idea incluir a la red de parlamentarios africanos, que a menudo participan en la conservación y gestión sostenible de los ecosistemas forestales de África Central.

No tenemos respuestas concretas a estos comentarios.

- No estoy seguro de si es una opción incluir iniciativas de la NASA en el propio ámbito, pero el equipo GeoNEX, patrocinado por la NASA (<https://www.nasa.gov/nasa-earth-exchange-nex/earth-observations-geonex/data-products/>), ha desempeñado un papel decisivo en la creación y difusión de productos de datos geoestacionarios a través de múltiples satélites.

Hemos reconocido la importancia de las observaciones geoestacionarias (por ejemplo, en la sección 3.1), pero no hemos mencionado específicamente a GeoNEX. Conocemos esas actividades y tienen mucho que aportar a PANGEA.

- Cualquier estudio de esta envergadura tiene que mantener la mente abierta para incluir a otras partes interesadas que puedan presentarse, aunque por el lado de la ciencia creo que parece que se deja de lado a la comunidad científica experimental. Entiendo que la NASA es todo acerca de las observaciones (especialmente de los satélites), pero dejando de lado el enriquecimiento AMAZON FACE CO₂, EsecaFlor experimento sequía, TmFO (Observatorio Forestal Tropical gestionado) para la perturbación del bosque, y Luquillo bosque experimental parece estar fuera de lugar. Las observaciones satelitales enfocadas en estos sitios pueden ayudar a informar las preguntas científicas que el programa está tratando de abordar.

Ya hemos respondido anteriormente a la cuestión de los experimentos con ecosistemas (véase más arriba).

- Creo que sería posible enumerar los socios universitarios de las regiones.
En los Apéndices B, C y D se enumeran muchos de estos socios.
- World Environmental Conservancy (WEC), una fundación privada estadounidense sin ánimo de lucro, estaría encantada de participar en este proyecto. WEC cuenta con muchos brasileños implicados en sus proyectos que forman parte de universidades, institutos y entidades brasileñas que probablemente estarían encantados de prestar el apoyo necesario in situ.

Es una excelente noticia. PANGEA se pondrá en contacto con usted.

- Sugiero incluir los bosques de tierra firme conservados junto a la PA-370 (km 107) (2°53'7.95 "S; 53°57'37.79 "O). Se encuentran en suelos arcillosos y presentan una gran diversidad de árboles de gran tamaño, como la castaña (*Bertholletia excelsa*). Esta zona constituye una nueva frontera agrícola regional. Se trata de un paisaje poco estudiado que forma parte de mi investigación de tesis. La región más amplia de Curuá-Una, en Santarém, presenta características tanto de las antiguas como de las nuevas fronteras, a saber, campos de monocultivo de décadas de duración (antigua frontera) y deforestación en curso para la expansión de monocultivos (nueva frontera) (Coelho et al., 2021; Schielein & Börner, 2018). La región se encuentra en la meseta de Santarém, una extensa zona de tierras altas adyacente a la confluencia de los ríos Tapajós y Amazonas (Barros et al., 2020). Viajando desde Santarém hacia Uruará por la carretera PA-370, se observan marcadas diferencias en el uso de la tierra y la conservación de los bosques entre las zonas anteriores y posteriores a la presa hidroeléctrica de Curuá-Una. Antes de la represa, hay un área de larga ocupación con fines agrícolas (a partir de la década de 1960), con predominio actual de campos de monocultivo en gran escala (soja/maíz). Después de la represa, la ocupación es mucho más reciente (a partir de la década de 2010) y la cobertura forestal es mucho mayor. La presencia de áreas con diferentes tiempos de ocupación permite el análisis temporal del uso de la tierra, lo que podría ser una lente útil para entender la heterogeneidad en la dinámica forestal. Creo que incluir este paisaje proporcionaría i) datos convincentes para comparar con el bien estudiado Bosque Nacional Tapajós (km 67 de la BR-163), y ii) perspectivas útiles para entender los paisajes forestales tropicales. Me he asociado con las comunidades locales de esta región (Asociación de Agricultores Aprocad), una cooperativa de pequeños agricultores (COOPBOA - Cooperativa de Agricultores Familiares de la Comunidad Boa Esperança), y académicos locales de la Universidad Federal de Pará (UFOPA), en Santarém-Dr. Tiago Vieira, Helionora Alves y Diego Amoedo, y de la Universidad Federal del Oeste de Pará (UFPA), en Belém: Valério Gomes, Raquel Santos y Katiane Silva.

Se trata de una excelente sugerencia para la ampliación del paisaje potencial cerca de Santarem. Proporciona un área rica para la comparación con la BR-163.

- En Colombia, sugiero incluir la comunidad de El Caraño (01°44'47,1" N, 075°41'35,9" O), ubicada en la vertiente oriental de la cordillera oriental de los Andes, entre los ecosistemas andino y amazónico en Florencia, Caquetá. Los Andes tropicales se encuentran entre las áreas biológicamente más diversas del mundo en términos de riqueza de especies y endemismo. Los altos índices de biodiversidad se atribuyen frecuentemente a las características y cambios del paisaje a través del tiempo (Moritz et al. 2000; Trénel et al. 2008; Sarkinen et al. 2012). El bosque nublado montano tropical andino es un ecosistema andino tropical que desempeña un papel esencial en los ciclos hídricos locales y regionales (Aldrich et al. 1997; Fahey et al. 2016). Sin embargo, la expansión de la agricultura y la urbanización están causando una gran deforestación en las zonas de TMCF (Etter & Wyngaarden 2000; Armenteras et al. 2003). En consecuencia, este ecosistema se ha visto muy fragmentado (Aldrich et al. 1997; Brummitt & Lughadha 2003; Gotsch et al. 2015). Los bosques nubosos característicos de la región destacan por la elevada presencia de la familia Arecaceae, con 24 géneros y 109 especies de palmeras (Borchsenius & Moraes 2006). También tengo socios en Colombia que podrían contribuir enormemente a este proyecto: Dr. Oscar Perdomo (Profesor Titular de la Universidad de Boyacá) y Edwin Trujillo (Profesor de la Universidad de la Amazonia).

Los ambientes montañosos son indudablemente importantes, pero hemos decidido excluirlos del PANGEA porque cubren áreas muy pequeñas en comparación con las tierras bajas y requieren un muestreo específico y detallado para tener en cuenta la heterogeneidad de las características topográficas y edáficas, lo que, debido a que los recursos son finitos, limitaría el muestreo en otros gradientes a gran escala.

Q12. ¿Existen áreas en las que podría mejorarse el enfoque de la diversidad y la inclusión?

- *Si, en comunidades establecidas en el ámbito del bosque, ya que ellos son lo que hacen uso directo del bosque o ecosistema. [Sí, en comunidades establecidas en el ámbito del bosque, ya que ellos son lo que hacen uso directo del bosque o ecosistema].*
- *Enfoque basado en la dinámica social, la toma en consideración del factor local de las comunidades locales en la base, la implicación de las comunidades locales en la toma de decisiones, la toma en consideración de los aspectos de la protección transversal, la inclusión social, la lucha contra la violencia basada en el Género, l'implication des ONG nationale dans la mise en œuvre des activités , le renforcement des capacités des communautés locales à la base , la formation professionnelle et techniques , l'appui pour la résilience des communautés locales à la base , appui pour le développement économique social et durable , la mobilisation communautaire. [Enfoque basado en la dinámica social, teniendo en cuenta las reivindicaciones locales de las comunidades locales de base, la implicación de las comunidades locales en la toma de decisiones, teniendo en cuenta los aspectos de protección transversal, inclusión social, lucha contra la violencia de género, la implicación de las ONG nacionales en la realización de las actividades, el refuerzo de las capacidades de las comunidades locales de base, la formación profesional y técnica, el*

apoyo a la resiliencia de las comunidades locales de base, el apoyo al desarrollo económico social y sostenible, la movilización comunitaria].

Trabajar con las comunidades locales exigirá asociaciones locales sólidas. Véase la sección 8 del Libro Blanco para conocer nuestra estrategia, que ha sido sustancialmente revisada con respecto al primer borrador.

- El proyecto articulaba muy bien las conexiones con las comunidades indígenas y locales, y sé que esto no entra necesariamente en el ámbito de la NASA, pero conectar los descubrimientos con las comunidades estadounidenses desatendidas puede mejorar aún más los resultados, ayudar a formar a la próxima generación de científicos estadounidenses y mejorar el futuro de la colaboración internacional.

Una de las áreas en las que PANGEA puede conectar con las comunidades desatendidas de EE.UU. es a través del desarrollo de la mano de obra. Esto puede ser posible a través de la participación en los programas de Investigación, Innovación, Sinergias y Educación (RISE) y Oportunidades de Geociencia para el Liderazgo en la Diversidad (GOLD-EN) de la NSF (Sección 7.1).

- Que yo sepa, no. El equipo ha hecho un trabajo notable y utiliza metodologías sólidas y probadas para ser inclusivo.

No hay respuesta a este comentario, salvo que nos gusta mucho.

Q13. ¿Tiene alguna sugerencia o comentario adicional para la campaña de campo PANGEA propuesta?

- *Es una brillante oportunidad para conservar y manejar sosteniblemente los ecosistemas tropicales. [Es una brillante oportunidad para conservar y manejar sosteniblemente los ecosistemas tropicales.]*
- *Nous souhaitons signer une convention cadre de partenariat avec votre institution , travailler avec vous en partenariat consortium, bénéficier de l'assistance techniques , avoir soutien financier, logistique équipement pour la mise en œuvre du projet. [Nous souhaitons signer un accord-cadre de partenariat avec votre institution, travailler avec vous en partenariat consortium, bénéficier de l'assistance technique , avoir soutien financier, équipement logistique pour la mise en œuvre du projet].*
- Mejor comunicación en torno a la campaña.
- Proporcionar mucho tiempo y recursos para el trabajo de campo, en mi opinión; será lo más difícil, sobre todo en África.

No hay respuesta a estos comentarios.

- Si se financia, crear un espacio para colaboraciones/colaboradores externos que ayuden a aumentar y ampliar el trabajo. Desarrollar una infraestructura duradera en las regiones de estudio. Y que sepan también que han elaborado un documento/propuesta de gran alcance. Es un placer leerlo.

Las colaboraciones externas serán una parte importante del éxito de PANGEA (véanse *los apartados 8 y 10.2*). La historia sugiere que, aunque el desarrollo de las infraestructuras es importante, lo es mucho más el de los recursos humanos. Haremos lo posible por fomentar ambas cosas, tal como se describe en el Libro Blanco, pero las personas serán nuestra prioridad.

- Me encantaría que consideraran dos paisajes forestales tropicales situados en Benín como candidatos para este estudio de alcance. Ambos son adecuados y cumplen todos los requisitos del libro blanco (accesibilidad, al menos 100 km²; disponibilidad de torre de flujo; etc.).
 - El primero - Bellefoungou (9.79115 N ; 1.718 E) se establece sobre un bosque claro con una covarianza de remolino de flujos de energía, vapor de agua y dióxido de carbono, mediciones del terreno y meteorológicas, estudio geofísico. Bellefoungou funciona desde 06/2008 hasta hoy, por lo que se dispone de datos de flujo a largo plazo.
 - La segunda, la Reserva Forestal de Lama (6.57360N; 2.10480E). El sitio de covarianza de Foucault se instalará en 2025 sobre un mosaico de bosques naturales, degradados y plantaciones (*Tectona grandis* y *Senna siamea*). La reserva forestal de Lama es mundialmente conocida y estudiada desde hace tiempo. Su superficie total se estima en 16.250 ha y es de fácil acceso. Las perturbaciones antropogénicas combinadas con el cambio climático influyen en las condiciones de crecimiento de este paisaje y modifican los parámetros demográficos como la germinación, el crecimiento de plántulas y brizales y las tasas de mortalidad.

Estos lugares de Benín se incluyen entre los lugares candidatos a estudio en 6.2.2.

G. Temas fuera del ámbito de PANGEA

Aunque PANGEA es ambicioso e integrador, hubo varios temas que los Grupos de Trabajo y la dirección de PANGEA determinaron que quedaban fuera de su alcance. Estos temas se enumeran en el Cuadro G-1.

| Tabla G-1. Puntos, temas y preguntas que se consideraron fuera del alcance del PANGEA | |
|--|---|
| PUNTO/TEMA/PREGUNTA EXCLUIDO | POR QUÉ |
| ¿CÓMO ESTÁN CAMBIANDO LAS RESERVAS DE CARBONO DEL SUELO? | No existe un vínculo directo por teledetección, y la mineralogía importa más que la productividad para controlar las reservas de carbono. Las torres de flujo de covarianza de Foucault no pueden separar la respiración autótrofa de la heterótrofa, y hay demasiada heterogeneidad a escala entre las cámaras del suelo y las torres. |
| ÓXIDO NITROSO (N_2O) | Los bosques tropicales son una importante fuente mundial de N_2O . Sin embargo, debido a la vida troposférica extremadamente larga del N_2O , es difícil cuantificar las fuentes y sumideros regionales y locales utilizando técnicas que dependen del muestreo atmosférico, como la inversión de flujos y la covarianza de Foucault. La falta de estas técnicas descendentes da lugar a restricciones limitadas sobre las fuentes y sumideros regionales y locales de N_2O . Las mediciones de N_2O en los ecosistemas se limitan principalmente a técnicas de cámara. Dado que los flujos de N_2O son muy episódicos y variables espacialmente, el esfuerzo de muestreo necesario para cuantificar adecuadamente las fuentes de N_2O es muy grande. A pesar de la importancia del N_2O , los costes de cuantificar adecuadamente el N_2O son muy elevados en comparación con otros estudios que pueden realizarse como parte de PANGEA. |
| MANGLAres Y BOSQUES MONTAÑOS | Tanto los manglares tropicales como los bosques montanos constituyen áreas de dominio relativamente pequeñas dentro de los trópicos más amplios, aunque ambos son muy relevantes debido a la adaptación única de los organismos a los microambientes y contribuyen de forma importante al ciclo del carbono. Los entornos montañosos y costeros requieren un muestreo específico y detallado para tener en cuenta la heterogeneidad de las características topográficas y edáficas, lo que limitaría el muestreo en otros gradientes a gran escala. Los entornos costeros plantean retos adicionales en cuanto al momento del muestreo (especialmente para el lidar). Sin embargo, existen oportunidades para que PANGEA alinee sus esfuerzos con otras investigaciones sobre manglares tropicales y bosques montanos. |
| ¿CÓMO MEJORAR LA DURACIÓN Y LA FIABILIDAD DE LAS PREVISIONES METEOROLÓGICAS EN LOS TRÓPICOS? ¿CÓMO MEJORAR LAS PREDICIONES SOBRE LA VARIABILIDAD Y EL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS TRÓPICOS? | Se trata de cuestiones científicas importantes, pero se consideraron fuera del alcance de una campaña de campo de ecología terrestre. Sin embargo, los resultados de PANGEA sobre la mejora de la comprensión de los controles de la biosfera sobre los ciclos de la energía, el agua y el carbono contribuirán indirectamente a mejorar las previsiones meteorológicas y las predicciones de la variabilidad climática. |
| FUNCIONAMIENTO DE LAS RAÍCES E INTERACCIONES DE LA FAUNA Y LOS MICROORGANISMOS DEL SUELO CON EL FUNCIONAMIENTO DEL ECOSISTEMA | Estos temas no se incluyeron en el ámbito principal de PANGEA debido a los retos actuales de escalar los procesos subterráneos utilizando la teledetección. Es posible que se incluyan elementos de esta área de investigación a través de proyectos sinérgicos con las actividades actuales y futuras. |

Tabla G-1. Puntos, temas y preguntas que se consideraron fuera del alcance del PANGEA

| PUNTO/TEMA/PREGUNTA EXCLUIDO | POR QUÉ |
|--|--|
| ¿CÓMO SE DISTRIBUYEN VERTICALMENTE LOS NUTRIENTES EN UN DOSEL FORESTAL (POR EJEMPLO, CONCENTRACIÓN, ESTACIONALIDAD, VARIACIÓN CON LOS RECURSOS Y GEOGRAFÍA)? | Recuperar la heterogeneidad vertical de los rasgos foliares requeriría un muestreo de campo mucho más intensivo, lo que limitaría seriamente la capacidad de capturar la variación a través de gradientes en la dinámica de la parte superior del dosel. Sin embargo, se trata de una cuestión importante que puede investigarse a pequeña escala mediante proyectos sinérgicos. |
| ¿QUÉ PROCESOS SUPERFICIALES IMPULSAN EL DESARROLLO CONVECTIVO, LAS PRECIPITACIONES Y LOS FENÓMENOS EXTREMOS EN LOS BOSQUES TROPICALES, Y CÓMO INFLUYE EN ELLOS EL CAMBIO CLIMÁTICO? | Este tema de investigación se aborda parcialmente en P20, pero las mediciones previstas durante PANGEA no serán suficientes para abordar esta cuestión como proyecto independiente. Algunos elementos de esta cuestión pueden abordarse mediante proyectos de colaboración más amplios. |
| ¿CÓMO INFLUYEN EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS FENÓMENOS EXTREMOS EN LAS INTERACCIONES ENTRE NUBES Y AEROSOLES, LA QUÍMICA ATMOSFÉRICA Y LAS REACCIONES TIERRA-ATMÓSFERA ASOCIADAS A LOS BOSQUES TROPICALES? | Las mediciones previstas durante PANGEA no serán suficientes para abordar esta cuestión como proyecto independiente. Algunos elementos de esta cuestión pueden abordarse mediante proyectos de colaboración más amplios. |
| ¿CÓMO INTERACTÚAN LOS FACTORES SOCIOECONÓMICOS, COMO LA TENENCIA DE LA TIERRA, LA ACCESIBILIDAD Y LA POLÍTICA, CON LOS FACTORES BIOFÍSICOS Y CLIMÁTICOS PARA INFLUIR EN LA REGENERACIÓN DE LOS BOSQUES Y LA PRESTACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS? | Esta pregunta proporciona una base importante para comprender por qué están cambiando el uso y la ocupación del suelo. Sin embargo, esta pregunta se basa más en datos sociales, políticos y económicos y no existe un vínculo claro entre esta pregunta y la teledetección. Algunos proyectos financiados por PANGEA pueden optar por abordar esta cuestión utilizando métodos innovadores. También existen oportunidades para alinear las actividades de PANGEA con esfuerzos relacionados para abordar esta cuestión. |
| ¿CUÁLES SON LAS CONEXIONES ENTRE LOS PUNTOS DE INFLEXIÓN SOCIALES Y LOS ECOLÓGICOS EN LOS TRÓPICOS, Y CÓMO VARÍAN SEGÚN LAS DISTINTAS GEOGRAFÍAS TROPICALES? | Aunque es necesario comprender la relación entre cómo influyen las retroalimentaciones sociales y ecológicas en el potencial de los bosques tropicales para alcanzar transiciones críticas, no existe un vínculo directo entre esta cuestión y la teledetección. Algunos proyectos financiados por PANGEA pueden optar por abordar esta cuestión utilizando métodos innovadores. También existen oportunidades para alinear las actividades de PANGEA con esfuerzos relacionados para abordar esta cuestión. |
| CUESTIONES RELEVANTES EN EL ÁMBITO DE PANGEA PERO NO DEFINIDAS DIRECTAMENTE EN EL LIBRO BLANCO | |
| <p>¿HASTA QUÉ PUNTO SON SENSIBLES LAS PROYECCIONES DE LOS MODELOS TERRESTRES A LAS DIFERENTES PARAMETRIZACIONES DE LA DIVERSIDAD FUNCIONAL DE LAS PLANTAS (P. EJ., PARAMETRIZACIONES DE LA DIVERSIDAD PANTROPICAL FRENTA A LA DIVERSIDAD ESPECÍFICA DE UN CONTINENTE; DIVERSIDAD DENTRO DE LAS COMUNIDADES/CÉLULAS DE CUADRÍCULA SIMULADAS)?</p> <p>¿QUÉ RASGOS FUNCIONALES FALTAN EN LAS PARAMETRIZACIONES?</p> | Estas dos cuestiones no se incluyen en las preguntas científicas de PANGEA porque no están directamente relacionadas con las mediciones por teledetección. Sin embargo, cuantificar y restringir la incertidumbre de los parámetros de los modelos será un mecanismo importante por el cual los modelos se integrarán con las observaciones, y la falta de rasgos funcionales que puedan ser medidos por PANGEA se evaluará en consulta con los modeladores durante la elaboración del Plan Experimental Conciso. |
| ¿QUÉ REPERCUSIONES TIENEN LOS EFECTOS DE BORDE EN LA RESISTENCIA Y LA COMPLEJIDAD ESTRUCTURAL DE LOS BOSQUES? | Esta pregunta no figura directamente como pregunta científica clave de PANGEA, pero formará parte de una investigación más amplia de los impactos de múltiples preguntas (por ejemplo, P15, P16, P20). |

Tabla G-1. Puntos, temas y preguntas que se consideraron fuera del alcance del PANGEA

| PUNTO/TEMA/PREGUNTA EXCLUIDO | POR QUÉ |
|---|--|
| ¿CÓMO AFECTAN LAS DIFERENCIAS EN EL LEGADO DE DEFORESTACIÓN Y DEGRADACIÓN ENTRE CONTINENTES A LA RECUPERACIÓN DE LOS BOSQUES Y LA RESTAURACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS CLAVE? | Esta cuestión se basa principalmente en datos históricos, que pueden quedar fuera del ámbito de PANGEA. Sin embargo, esta línea de investigación será fundamental para contextualizar las observaciones en PANGEA y se abordará a través de asociaciones (por ejemplo, MapBiomas). |