



A investigação tropical PAN de bioGeoquímica e Adaptação Ecológica (PANGEA):
Definição do escopo de uma campanha de campo patrocinada pela NASA

Relatório final - dezembro de 2024

Autores principais

* Indica os autores coordenadores

Elsa M. Ordway* (Universidade da Califórnia, Los Angeles [UCLA]), Michael Keller* (Serviço Florestal dos Estados Unidos [USFS], Laboratório de Propulsão a Jato [JPL]), Marcos Longo (Laboratório Nacional Lawrence Berkeley [LBNL]), Robinson Negron-Juarez (LBNL), Yanlei Feng (Instituto de Tecnologia de Massachusetts [MIT]), Hannah Stouter (UCLA), Isaac N. Aguilar Rivera (Instituto de Tecnologia da Califórnia [Caltech]), Ane Alencar (Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia [IPAM]), Adia Bey (NASA Goddard Space Flight Center [GSFC], Universidade de Maryland [UMD]), Renato K. Braghiere (Caltech, JPL), Anabelle Cardoso (Universidade de Buffalo e Universidade da Cidade do Cabo), 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-Gana), Lydie-Stella Koutika (Centro de Pesquisa sobre Produtividade e Sustentabilidade de Plantações Industriais [CRDPI]), Yue Li (UCLA), Junjie Liu (JPL), Ian McCubbin (JPL), Félicien Meunier (Universidade de Ghent), Charles Miller (JPL, Caltech), Helene C. Muller-Landau (Smithsonian Tropical Research Institute [STRI]), Teodyl Nkuintchua (World Resources Institute), Matheus Nunes (UMD), Le Bienfaiteur Sagang Takougoum (UCLA), Maria J. Santos (University of Zurich), Fabian D. Schneider (Universidade de Aarhus), Marc Simard (JPL), Bonaventure Sonké (Universidade de Yaounde I), César Terrer (MIT), Marius von Essen (UCLA), Michelle Y. Wong (Universidade de Yale), Sarah Worden (JPL), Xiangming Xiao (Universidade de Oklahoma [OU]), Virginia Zaunbrecher (UCLA)

Autores colaboradores

Marijn Bauters (Universidade de Ghent), Pascal Boeckx (Universidade de Ghent), Jennifer Bowen (Universidade de Stanford), Iniquilipi Chiari (Aliança Global de Comunidades Territoriais [GATC]), Ovidiu Csillik (Universidade Wake Forest), Gloria Diez (GATC), Marcelo Doroso (GATC), Deborah Delgado Pugley (Pontifícia Universidade Católica do Peru [PUCP]), Wannas Hubau (Universidade de Ghent), Alejandra Echeverri Ochoa (Universidade da Califórnia, Berkeley), Evan Gora (Instituto Cary de Estudos de Ecossistemas), Alison Hoyt (Stanford), Juan Carlos Jintiach (GATC), Victor Maqqe (OU), Clarice Perryman (Stanford), Zoe Pierrat (JPL), Leila Saraiva (GATC), Debjani Singh (Laboratório Nacional de Oak Ridge [ORNL]), Iroro Tanshi (Universidade de Washington & Small Mammal Conservation Organisation [SMACON]), Jill Thompson (UK Centre for Ecology & Hydrology [UKCEH]), Hans Verbeeck (Ghent University)

Prefácio

As Oportunidades de Pesquisa em Ciências Espaciais e da Terra da NASA lançadas em 2022 solicitaram propostas para realizar estudos de escopo para identificar as questões científicas e desenvolver o projeto de estudo inicial e o conceito de implementação para uma nova campanha de campo de Ecologia Terrestre da NASA. Na primavera de 2023, a NASA selecionou dois projetos para financiamento, incluindo um projeto intitulado: "A Scoping Study for the NASA Tropical Terrestrial Ecology Campaign" (Subsídio da NASA 80NSSC23K1019 para a Universidade da Califórnia, Los Angeles). Este relatório contém as recomendações desse estudo de escopo, que apresenta a investigação tropical PAN de bioGeoquímica e Adaptação Ecológica (PANGEA). A NASA delineou dez expectativas a serem identificadas para cada estudo de escopo:

1. As questões e os problemas científicos.
2. O estado atual da ciência.
3. O potencial para um avanço científico importante e significativo.
4. O papel central e crítico do sensoriamento remoto da NASA.
5. Os componentes científicos essenciais do estudo e por que o trabalho em equipe coordenado é necessário para sua implementação.
6. Um projeto de estudo geral que identifique a infraestrutura observacional necessária (por exemplo, observações espaciais, aéreas e/ou de apoio in situ) e analítica (por exemplo, modelos, dados e sistema de informações).
7. A viabilidade do projeto proposto, tanto técnica quanto logística.
8. O envolvimento da comunidade de pesquisa mais ampla para buscar feedback sobre as ideias, avaliar o interesse e promover a diversidade e a inclusão.
9. As habilidades disciplinares necessárias para conduzir o estudo e envolver os possíveis parceiros em suas atividades de planejamento.
10. Uso potencial dos resultados para aplicativos e suporte a decisões.

Este white paper fornece: 1) a justificativa científica; 2) um conceito inicial de projeto de estudo; 3) uma apresentação das questões científicas, metas e objetivos; 4) a justificativa em termos de estado da arte, relevância e avanços esperados; 5) conceitos de implementação; e 6) outras informações para permitir que a NASA avalie totalmente o projeto. Descrevemos o conceito do PANGEA, incluindo os Temas Científicos do PANGEA (Seção 2), as Perguntas Científicas (Seção 3), o avanço científico e técnico decorrente do PANGEA (Seção 4), a função fundamental do sensoriamento remoto da NASA (Seção 5), a estratégia de pesquisa e o projeto de estudo do PANGEA (Seção 6), as prioridades de capacitação e treinamento do PANGEA (Seção 7), a estratégia de envolvimento da comunidade (Seção 8), a capacidade de viabilizar o Earth Action (Seção 9) e a viabilidade técnica e logística (Seção 10).

O PANGEA oferece uma abordagem modular: Selecionamos um Domínio Principal para priorizar medições terrestres e observações aéreas nos trópicos africanos, que têm grandes lacunas de dados e conhecimento, e comparações com as Américas tropicais. As paisagens candidatas no Domínio Principal são identificadas na Seção 6.2.2. Também selecionamos um Domínio Estendido, abrangendo florestas pantropicais em outros lugares, inclusive na Ásia e na Austrália. O Domínio Estendido será o foco do sensoriamento remoto por satélite e das análises de modelagem. Os limites do Domínio Estendido são identificados na Seção 1.4. Durante o processo de definição do escopo, a equipe do

PANGEA se envolveu com uma ampla comunidade de possíveis parceiros em ambos os domínios, solicitando e respondendo aos seus comentários para garantir que, se o PANGEA for selecionado, poderemos colaborar e coordenar de forma eficaz os esforços atuais e futuros (consulte o *Apêndice D*).

O conceito do PANGEA reflete as vozes de muitos e foi desenvolvido em colaboração com mais de 800 pessoas representando mais de 300 organizações de 42 países em 5 continentes. Os workshops foram realizados em Washington DC, Camarões, Peru, Brasil e Tailândia, com aproximadamente 275 participantes presenciais e 298 virtuais. Os participantes do processo de definição de escopo representaram muitas comunidades, inclusive a comunidade acadêmica nos trópicos, bem como nos EUA e na Europa; comunidades indígenas e locais dos trópicos; a comunidade da NASA e outras agências federais dos EUA; agências espaciais internacionais; agências governamentais estrangeiras; organizações da sociedade civil; e setor privado (consulte o *Apêndice C*). O esforço de definição do escopo ressaltou a enorme necessidade do PANGEA e a oportunidade oportuna que ele apresenta para colaborar e coordenar com muitas atividades existentes e futuras descritas neste white paper.

Agradecimentos

A definição do escopo do PANGEA foi, em grande parte, um esforço da comunidade internacional. Ele não seria possível sem as contribuições de um número incontável de pessoas. Somos profundamente gratos a todos que contribuíram com suas ideias, tempo, energia, recursos e financiamento para definir o escopo dessa campanha de campo urgentemente necessária. Especificamente, agradecemos o apoio financeiro e os recursos adicionais, além da NASA, que tornaram possível esse esforço internacional de definição de escopo. Isso inclui o USFS-International Programs, a University of California-Los Angeles (UCLA), a Governors' Climate and Forests Task Force (GCF-TF), a Wildlife Conservation Society (WCS), o International Institute for Tropical Agriculture (IITA), a Alliance Bioversity International e o CIAT, o Center for International Forestry Research and World Agroforestry (CIFOR-ICRAF), Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Universidade de Yaoundé I, Penn State University, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Congo Basin Forest Partnership (CBFP), Congo Basin Institute (CBI), Congo Basin Science Initiative (CBSI) e NASA SERVIR Southeast Asia Hub. Marcos Longo e Robinson Negrón-Juárez receberam apoio como parte do Next Generation Ecosystem Experiments-Tropics, financiado pelo Departamento de Energia dos EUA, Escritório de Ciência, Escritório de Pesquisa Biológica e Ambiental. O LBNL é gerenciado e operado pelos Regentes da Universidade da Califórnia sob o contrato principal número DEAC02-05CH11231.

Muitos funcionários dedicados e esforçados tornaram possíveis os workshops e eventos do PANGEA, trazendo atitudes positivas e de resolução de problemas que orientaram o PANGEA. Entre eles estão 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 e muitos outros.

O PANGEA também é grato aos muitos pesquisadores e profissionais que contribuíram com suas ideias e sugestões para a maratona que está definindo o escopo de uma Campanha de Campo de Ecologia Terrestre da NASA. Em especial, gostaríamos de agradecer a Yaxing Wei, Bruce Wilson e Michele Thornton (ORNL), Dario Papale (Integrated Carbon Observation System [ICOS]), Gilberto Pastorello (AmeriFlux), Luiz Aragão e Bruce Forsberg (LBA), Simon Lewis (Leeds, UCL), Nicolas Barbier (Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento, França [IRD]), Pascal Boeckx, Marijn Bauters, Wannes

Hubau (Ghent), Denis Sonwa (CIFOR-ICRAF → World Resources Institute [WRI]) e Stuart Davies (Smithsonian). Os autores principais são extremamente gratos à Dra. Jill Thompson (UKCEH) por seus comentários completos, abrangentes e perspicazes. Nosso documento está muito melhor graças a seus esforços. Além disso, gostaríamos de agradecer a todos os membros dos seis grupos de trabalho listados abaixo por suas contribuições para discussões, ideias e iterações de muitos elementos deste white paper.

Grupo de Trabalho de Ciclos Biogeoquímicos e Dinâmica de Carbono: Abhishek Chatterjee (JPL), Alfred Ngomanda (Centro Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica do Gabão), Alysson Bery (Instituto da Bacia do Congo), Anne Ola (INRS), Ashley Ballantyne (Universidade de Montana), Asmadi Saad (Universidade de Jambi), Bassil El Masri (Universidade Estadual de Murray), Beisit Luz Puma Vilca (Sylvera), Ben Taylor (Harvard), Bila-Isia Inogwabini (WWF), Carla Restrepo (Universidade de Porto Rico), Chima Iheaturu (Universidade de Berna), Corneille Ewango (Okapi Faunal Reserve), Danielle Potocek (Spark Climate Solutions), David Lagomasino (Universidade da Carolina do Leste), Dheeresh Kumar (Univ. de Delhi), Doug Morton (NASA Goddard), Ekene Rangel, Elhadi Adam (University of the Witwatersrand), Eric Cosio (PUCP), Farrel Boucka (AGEOS), Fernanda Santos (ORNL), Fiona Soper (McGill), Flavia Durgante (Instituto de Tecnologia de Karlsruhe), Francis Manfoumbi (AGEOS), Gerbrand Koren (Universidade de Utrecht), Gillian Galford (Universidade de Vermont), Gislain MOFACK II (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação [FAO]), Gretchen Keppel-Aleks (Universidade de Michigan), Hankui Zhang (SDSU), Hans Verbeeck (Universidade de Ghent), Jim Dalling (UIUC), Jingfeng Xiao (UNH), Joe Mohan (UCI), Joshua Fisher (Universidade Chapman), Kate Nelson (McGill University), Krista Anderson-Teixeira (Smithsonian), Laura Duncanson (University of Maryland), Luis Fernandez NGOULA (University of Yaounde), Marcia Macedo (WHRC), Marijn Bauters (Ghent University), Moses Cho (Universidade de Pretória), Na Chen (MIT), Nate McDowell (PNNL), Patrick Namulisa (Columbia), Nick Parazoo (JPL), NIMPA NGUEMO Christiane Guillaine (Universidade de Bamenda), Nohemi Huanca-Nunez (Yale), Norma Salinas (PUCP), Pascal Boeckx (Ghent University), Paul Arellano (NAU), Paulo Brando (Yale), Petya Campbell (University of Maryland Baltimore County), Robinson Negrón-Juarez (LBNL), Rogelio Corona (UNAM), Rolf Obame (USTM), Ruofei Jia (MIT), Sarah Batterman (Instituto Cary), Sparkle Malone (Yale), Steve Kwatcho Kengdo (UC Berkeley), Tana Wood (Serviço Florestal do USDA), Timothy Filley (Universidade de Oklahoma), Tommaso Jucker (Universidade de Bristol), Trevor Cambren (MIT), Vincent Medjibe (Serviço Florestal do USDA), Wu Sun (Carnegie Science), Yann Nouvellon (CIRAD), Yoseline Angel (NASA Goddard), Zeli Tan (PNNL)

Grupo de Trabalho sobre Estrutura, Função e Diversidade: 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 Yaounde I), David Luther (George Mason Univ.), Tim Mayer (Univ. do Alabama Huntsville), Paul Moorcroft (Harvard), Doug Morton (GSFC), Luis Fernandez Ngoula (Univ. de Yaounde I), Christopher Nytych (Univ. de Porto 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. de Notre Dame), Simon Tamungang (Univ. de Bamenda), Jill Thompson (UKCEH),

Marcelle Johnson (Wageningen), German Vargas (Oregon State Univ.), 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 trabalho sobre feedbacks e interações climáticas: Nate McDowell (PNNL), Chi Chen (Rutgers Univ.), Manuel Lerdau (Univ. of Virginia), Rogelio O. Corona-Núñez (Facultad de Ciencias, UNAM), Joshua Fisher (Chapman), Daniela Francis Cusack (CSU), Eric Davidson (Univ. of 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 (Utrecht Univ.), Jie Hsu (National Taiwan Univ.), 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 (Univ. de Miami), Emmanuel Barde Elisha (ANI Foundation), Evan Gora (Cary Institute), Xiangzhong Luo (Univ. Nacional de Cingapura), Marie Brigitte Makuate (MSRI, Camarões), Landing Mané (OSFAC), Denis Sonwa (WRI), Louis Defo (Univ. de Yaounde I), L. Ruby Leung (PNNL), Yoshiaki Hata (Univ. de Tóquio), 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 (Universidade de Ngaoundere), John Adams Katikomo (EDA), Nyong Princely Awazi (Univ. de Bamenda, Camarões), Martin Arthur Meka Zibi II (Univ. de Dschang), Peke Koukou Léon c'est la vie (ONG), Donald-l'or Nyame Mbia (Univ. de Yaounde I), Nkemnkeng Francoline Jong (Univ. de Bamenda, Camarões), Vanessa Mavila (Fondation Eboko), Olivier Bosela (IFA Yangambi), Akwayopanga Denis (Governo local do distrito de Pakwach), Bakeleki Bohin Jean Marie (IRIC), Carmen Loncthi Fobasso (APDD), Apene Derek Aziwoh (African Environmental Network), Cyrille Bienvenu Bediang (IRIC), Susanna B Hecht (UCLA), Jancy Kelly Bounvou Matoumouna (Wildlife Conservation Society), Jonathan Tahiri Heri (University of Kindu, DRC), Bertrant James Taya Saah (Univ. de Yaounde I), Nzanzu Mulimirwa Philémon (Parlamento Jovem Congolês), Regis Koumba Mouissou (Univ. do Arkansas), Amour Macelvi Matoumouene Goma (LBGE), Paul Martial Tene Tayo (Univ. de Yaounde I), Nanda Silatsa Serge (STA), Alain Okito (PNUMA), Stella Songwe Tikeng (Univ. de Yaounde I), Ncangu Bahindwa Benjamin (Univ. Officielle de Bukavu), Sandjo Phallin Romeal (Instituto Superior de Ciências Ambientais), Timothy Bonebrake (Univ. de 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 Yaounde I), Usongo Patience Abaufei (Univ. de Buea, Camarões), Djourwe Enock (Univ. de Yaounde I), Ravinder Sehgal (SFSU), Donato Ndong Ndong Nzang (UNGE), Nguimalet Cyriaque Rufin (Univ. de Bangui), Hubert Yamvu (Programme National de Santé au Travail), Foupouapegnigni Moihamette (Univ. de Yaounde I), Amadou Bossiomo Mfela (Soldats pour la Nature), Hugues Irengé Nganiza (Pan African Univ.), 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 Carité Vaz (Wilkes Univ.), Armand Okende (ULB), Greg Jongsma (New Brunswick Museum), Joost van Haren (Univ. do Arizona), Rui Cheng (Univ. de Minnesota), Peter Ssimbwa (Muteesa 1 Royal University)

Grupo de Trabalho de 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. de 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. de Michigan), Gillian Galford (Univ. de Vermont), Angélica María Gómez (UNC - Chapel Hill), Burak Güneralp (Texas A&M), Chima Iheaturu (Univ. de Berna), Marciel Jadith Móstinga Rodriguez (UNALM-Peru), Matthais Kunz (GFZ-Potsdam), Mody Lacour (UC-Irvine), Victor Maqqe (OU), Mia Mitchell (LANL), Paulo Murillo (Univ. del Tolima), Florence Palla (OFAC), Johanne Pelletier (CGIAR), Marie Prutzer (Humboldt), Catherine Potvin (McGill), Dina Rasquinha (Univ. of Georgia), Casey Ryan (Univ. of Edinburgh), Asmadi Saad (Jambi Univ.), Evandro Marcos Saidel Ribeiro (USP), Michaela Shope (MSU), Denis Sonwa (WRI), Jocelyne Sze (UAB)

Grupo de Trabalho de Modelagem e Síntese de Dados: Shivani Agarwal (Columbia University), Rachel Albrecht (Universidade de São Paulo, USP), Luciana Alves (UCLA), Andrés Baresch (University of Maryland), Ana Bastos (Leipzig University), Carly Batist (Raiforest Connection), Anthony Bloom (JPL), Damien Bonal (INRAE, Université de Lorraine, AgroParisTech, UMR Silva), Santiago Botia (Max Planck Institute for Biogeochemistry), Na Chen (MIT), Bradley Christoffersen (Universidade do Vale do Rio Grande, Texas), Michael Coe (Centro de Pesquisa Climática Woodwell, WCRC), Matteo Detto (Universidade de Princeton), Hannes De Deurwaeder (Universidade de Princeton), Michael Dietze (Universidade de Boston), Francina Dominguez (Universidade de 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 Pesquisas Espaciais [INPE]), Pierre Gentine (Columbia University), Viola Heinrich (Helmholtz Centre Potsdam), Marina Hirota (Universidade Federal de Santa Catarina), Forrest Hoffman (ORNL), Jennifer Holm (LBNL), Ruofei Jia (MIT), Trevor Keenan (Universidade da Califórnia, Berkeley), Nancy Kiang (NASA GISS), Charles Koven (LBNL), Jennifer Kowalczyk (LBNL), Jeremy Lichstein (Universidade da Flórida), Yanlan Liu (Universidade Estadual de Ohio), Nima Madani (JPL), Landing Mané (Observatório de Satélites Florestais da África Central), Isabelle Maréchaux (INRAE, AMAP), Bassil El Masri (Murray State University), Guilherme Gerhardt Mazzochini (Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ), David Medvigy (Universidade de Notre Dame), Leila Mirzaghali (MIT), Gislain Il Mofack (Universidade de Yaoundé I), Paul Moorcroft (Universidade de Harvard), Neil-Yohan Musadji (Universidade Masuku de Ciência e Tecnologia), Jessica Needham (LBNL), Christiane Guillaine Nimpa Nguemo (Universidade de Bamenda), Rogelio Omar Corona Núñez (Universidade Nacional Autónoma do México, UNAM), Rolf Mabicka Obame (Universidade Masuku de Ciência e Tecnologia), Grace Jopaul Loubota Panzou (Universidade Denis Sassou Nguesso), Gilberto Pastorello (LBNL), Mateus Dantas de Paula (Senckenberg - Leibniz Institution for Biodiversity and Earth System Research), Arthur Prudêncio de Araujo Pereira (Universidade Federal do Ceará), Thomas Pugh (Universidade de Lund), Celso von Randow (INPE), Natalia Restrepo-Coupe (Universidade do Arizona, Cupoazu LLC), Evandro Marcos Saidel Ribeiro (USP), Bianca Fazio Rius (Universidade de Campinas, Centro de Pesquisa em Biodiversidade e Meio Ambiente), Leila Hernandez Rodriguez (LBNL), Iris Roitman (Universidade de Brasília), Sergio Rojas (Instituto Humboldt), Thais Rosan (Universidade de Exeter), Lina María Sánchez-Clavijo (Instituto Humboldt), André Santos (LBNL), Rosa Maria Nascimento dos Santos (Universidade do Estado do 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 (Ghent University), Marco Visser

(Leiden University), Weile Wang (NASA Ames Research Center), Rachel Ward (University of California, Berkeley), Mathew Williams (University of Edinburgh), Chonggang Xu (Laboratório Nacional de Los Alamos, LANL), Xiangtao Xu (Universidade de Cornell), Julia Yang (Universidade da Califórnia, Berkeley), Jevan Yu (MIT), Maurício Rumenos Guidetti Zagatto (USP), Wenli Zhao (Universidade de Columbia)

Grupo de Trabalho de Engajamento Comunitário e Aplicativos de Pesquisa: Yoseline Angel (GSFC), Shivani Argawal (Universidade de Columbia), Kemen Austin (WCS), Carly Batist (Raiforest Connection), Ruksan Bose (IITA), Glenn Bush (Woodwell), Rogelio O. Corona-Núñez (Universidade Nacional Autônoma do México, UNAM), Fanny Djomkam (IITA), Marius Ekué (Bioversity), Matt Hansen (UMD), Simon Hoyte (UCL), Nohemi Huanca-Nunez (Yale), Chima Iheaturu (Univ. de Berna), Yovita Ivanova (Alliance Bioversity & CIAT), Gerbrand Koren (Utrecht University), Matthias Kunz (Helmholtz Centre Potsdam), Patrick Meyfroidt (Université catholique de Louvain), Catherine Nakalembe (UMD), Tatiana Nana (UMD), Christiane Guillaine Nimpa Nguemo (University of Bamenda), Kevin Njabo (Texas A&M), Carl Norlen (USGS), Florence Palla (OFAC), Catherine Potvin (McGill), Danielle Rappaport (UMD), Nick Russo (Harvard), Denis Sonwa (WRI), Hannah Stouter (UCLA), Lucie Félicité Temgoua (Universidade de Dschang), Stella Songwe Tikeng (Univ. de Yaounde I), Beisit Luz Puma Vilca (Silvera)

Índice

1	Introdução e motivação	1
1.1	Visão geral dos temas, perguntas e objetivos de ciências.....	11
1.2	A necessidade urgente do PANGEA.....	14
1.3	Papel das observações de sensoriamento remoto	14
1.4	A necessidade de coleta de dados coordenada e trabalho em equipe	16
1.5	A Campanha de Campo de Ecologia Terrestre e o Domínio de Estudo do PANGEA.....	18
1.6	Ciências da Terra em Ação.....	22
2	Temas científicos do PANGEA	23
2.1	Ciclos biogeoquímicos	24
2.2	Biodiversidade	28
2.3	Interações e feedbacks climáticos	33
2.4	Sistemas socioecológicos.....	36
2.5	Dinâmica de perturbação.....	39
3	Lacunas de conhecimento e dúvidas.....	43
3.1	Padrão	44
3.1.1	Padrão: Estoques e fluxos de carbono.....	44
3.1.2	Padrão: Biodiversidade e composição funcional.....	46
3.1.3	Padrão: Interações terra-atmosfera e limiares	48
3.2	Processo	49
3.2.1	Processo: Interações entre espécies e resiliência	49
3.2.2	Processo: Retroalimentação da função do ecossistema e da perturbação	51
3.2.3	Processo: Dinâmica e gerenciamento da recuperação	52
3.2.4	Processo: Feedbacks do ciclo hidrológico	54
3.3	Projeções.....	55
3.3.1	Projeções: Ciclos de carbono, água, energia e nutrientes.....	55
3.3.2	Projeções: Resiliência florestal heterogênea.....	56
4	Avanço científico e técnico do PANGEA	58
5	Papel crítico do sensoriamento remoto da NASA.....	60
6	Estratégia de pesquisa e desenho do estudo	61
6.1	Abordagem geral do estudo	62
6.1.1	Estratégia de ciência em escala do PANGEA	62
6.1.2	Cronograma teórico do projeto.....	65
6.2	Componentes científicos essenciais	66

6.2.1	Linha de base, limiar e estratégia de descópio	67
6.2.2	Paisagens candidatas	73
6.2.3	Observações de sensoriamento remoto por satélite	75
6.2.4	Observações de sensoriamento remoto aéreo	76
6.2.5	Observações e estudos de campo	78
6.3	Modelagem, síntese de dados e análises integrativas	82
6.3.1	Abordagem de modelagem e integração de dados	82
6.3.2	Coordenação com outras comunidades de modelagem e integração de dados	87
6.3.3	Atividades de modelagem e integração de dados	89
7	Capacitação, treinamento e educação	90
7.1	Desenvolvimento da força de trabalho	90
7.2	Como educar um grupo de alunos de pós-graduação	91
8	Estratégia de envolvimento da comunidade	93
8.1	Co-desenvolvimento e parceiros do PANGEA	95
8.2	Estratégia de engajamento	96
9	Capacitando as Ciências da Terra para a ação	97
9.1	Aplicações dos resultados da pesquisa do PANGEA	98
9.1.1	Estabilidade do sequestro de carbono e fluxos de metano	98
9.1.2	Conservação da biodiversidade	100
9.1.3	Agricultura e meios de subsistência sustentáveis	102
9.2	Processo para capacitar as Ciências da Terra para a ação	104
9.2.1	Envolvimento do usuário	104
9.2.2	Apoio à aplicação da pesquisa do PANGEA	105
10	Viabilidade técnica e logística	108
10.1	Organização e gerenciamento	109
10.1.1	Gerenciamento de programas	109
10.1.2	Escritório de Projetos	109
10.1.3	Definição de ciência	110
10.1.4	Implementação do projeto	110
10.1.5	Equipe científica e liderança científica	111
10.1.6	Habilidades disciplinares necessárias	113
10.2	Oportunidades de cofinanciamento	113
10.3	Ciência aberta - gerenciamento e compartilhamento de dados	114
10.4	Horário 119	
10.5	Avaliação de risco	120
11	Figura Créditos	122

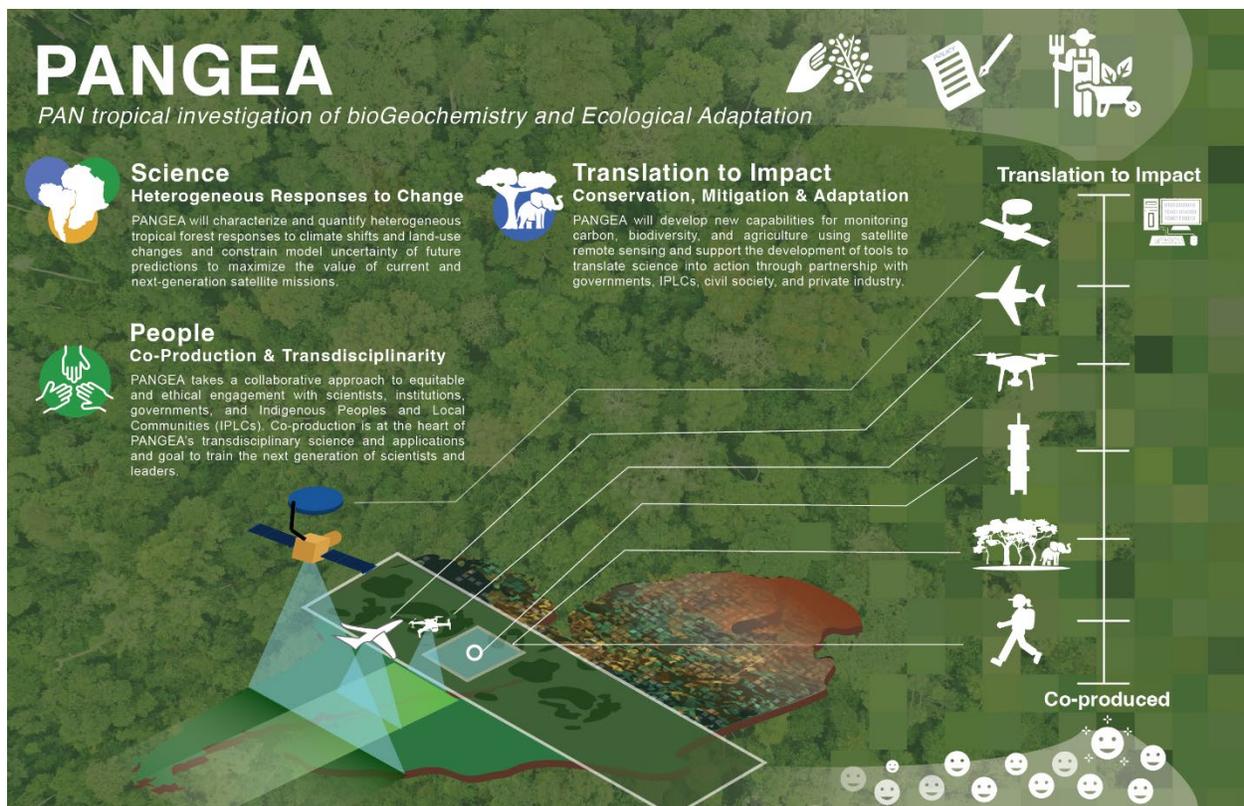
12 Glossário	123
13 Acrônimos e abreviações	126
14 Apêndices.....	136
A. Cartas de apoio	136
B. Parceiros do PANGEA e atividades de engajamento	136
C. Envolvimento durante o estudo de escopo	136
D. Atividades de pesquisa e monitoramento planejadas e em andamento	136
E. Tabela de medições detalhadas do PANGEA	136
F. Respostas ao feedback.....	136
G. Tópicos além do escopo do PANGEA	136

1 Introdução e motivação

O PANGEA é um projeto globalmente colaborativo e globalmente transformador que determinará se as florestas tropicais em diferentes continentes respondem de forma diferente às mudanças climáticas e de uso da terra.

O PANGEA é urgentemente necessário para

1. *Maximizar o valor das missões de satélite atuais e de próxima geração, preenchendo lacunas de dados e integrando percepções ecológicas mecanicistas.*
2. *Preencher lacunas críticas de conhecimento para apoiar as metas globais de clima e biodiversidade com base na compreensão dos processos que controlam a heterogeneidade na vulnerabilidade das florestas tropicais.*
3. *Desenvolver novos recursos para observar, prever e monitorar as respostas das florestas tropicais e, ao mesmo tempo, promover a formação da próxima geração de cientistas e líderes globais.*



As florestas tropicais têm impactos de longo alcance, abrangendo quantidades globalmente significativas de carbono, nutrientes e água, fluxos de carbono e energia e a maior proporção da biodiversidade da Terra. Mais de 75% de cada uma das plantas com flores, anfíbios, mamíferos terrestres, peixes marinhos e de água doce e 91% das aves terrestres da Terra têm uma distribuição que cruza as latitudes tropicais (Barlow et al., 2018). As florestas tropicais armazenam grandes quantidades de carbono nos solos e na biomassa, sendo que as florestas tropicais úmidas representam cerca de 40% da biomassa vegetal global (Xu et al., 2021a). Como o maior sumidouro de carbono entre todas as florestas do mundo (Pan et al., 2024), elas desempenham um papel fundamental na mitigação do aumento do dióxido de carbono atmosférico (CO₂), atuando como

amortecedores essenciais contra as mudanças climáticas. As florestas tropicais também atenuam o aumento das temperaturas globais por meio do resfriamento evaporativo (Bonan, 2008; Artaxo et al., 2022). Além disso, as florestas tropicais interagem com a atmosfera por meio de feedbacks complexos que regulam o clima local e o clima regional e global. Em última análise, as florestas tropicais influenciam todo o sistema terrestre. Por exemplo, o desmatamento da Amazônia ameaça os padrões de precipitação nos EUA, podendo reduzir a precipitação no Centro-Oeste e no Noroeste (Lawrence & Vandecar, 2015) e causando uma redução de 50% na camada de neve de Sierra Nevada, na Califórnia, que sustenta a agricultura e as necessidades de água urbana (Medvigy et al., 2013). Essas mudanças podem alterar a disponibilidade de água, reduzir a produção agrícola e desestabilizar os ecossistemas, colocando em risco a segurança alimentar e a estabilidade social. Além disso, muitas commodities de importância global, como café, óleo de palma, cacau e madeira, são originárias dos trópicos, sustentando os mercados globais e as cadeias de suprimentos e, ao mesmo tempo, contribuindo para as necessidades básicas das famílias dos EUA.

As florestas tropicais estão passando por mudanças rápidas. As regiões de florestas equatoriais logo experimentarão as temperaturas mais altas conhecidas desde o Eoceno, o que, quando combinado com a mudança no uso da terra, levará ao aumento da secura atmosférica e do estresse hídrico (Barkhordarian et al., 2019; Ukkola et al., 2020). As taxas de mortalidade de árvores estão aumentando nos trópicos devido ao aumento da duração e da gravidade da seca e da intensidade das tempestades (Allen et al., 2010, Choat et al., 2012, McDowell et al., 2018, Urquiza-Munoz et al., 2024). O aumento das temperaturas está se aproximando dos limites térmicos hipotéticos para a função das folhas, embora esses limites continuem sendo muito debatidos (Smith et al., 2020, Doughty et al., 2023; Winter e Roelfsema, 2024). Nas últimas décadas, as rápidas mudanças nos sistemas socioecológicos causaram taxas sem precedentes de mudanças antropogênicas no uso da terra (DeFries et al., 2004; Hosonuma et al., 2012; Hansen et al., 2020; Pendrill et al., 2022), que contribuíram diretamente para as mudanças climáticas nos trópicos (Smith et al., 2023). Como resultado, o sudeste da Amazônia está se tornando uma fonte líquida de carbono para a atmosfera (Gatti et al., 2021).

O desmatamento e a degradação tropical foram responsáveis por 22% das emissões antropogênicas anuais de CO₂ de 1990 a 2020 (Pan et al., 2024), embora essas emissões sejam parcialmente compensadas pelo crescimento de florestas tropicais secundárias (Aragão et al., 2014; Rosan et al., 2024). Condições quentes e secas prolongadas aumentam a vulnerabilidade das florestas a incêndios e as florestas já queimadas, por sua vez, tornam-se mais quentes e secas, levando a um feedback positivo que tem sido chamado de "tempestade de incêndios" (Brando et al., 2020a). O desmatamento, a degradação florestal, a exploração direta (por exemplo, caça, colheita) e as mudanças climáticas alteraram drasticamente a dinâmica de distúrbios das florestas tropicais e agora ameaçam muitas espécies tropicais de extinção (Feeley et al., 2012; Barlow et al., 2016; Benítez-López et al., 2017; Alroy 2017; Dirzo et al., 2014). Essa perda de biodiversidade poderia, por sua vez, comprometer a resiliência da estrutura e da função das florestas tropicais, dos ciclos biogeoquímicos e dos sistemas socioecológicos (Bunker et al., 2005; Peres et al., 2016). Mesmo depois de levar em conta a maior diversidade de espécies, as regiões tropicais estão sofrendo defaunação na taxa mais alta do mundo (Dirzo et al., 2014).

Estudos realizados nos últimos 10 anos revelaram que as tendências e a variabilidade interanual da troca líquida de carbono do bioma das florestas tropicais variam acentuadamente entre os continentes (Brienen et al., 2015; Liu et al., 2017; Hubau et al., 2020). De 1985 a 2015, o sumidouro de

carbono das florestas tropicais intactas de terras baixas da África, medido em parcelas de inventário florestal, foi efetivamente constante, enquanto o sumidouro de carbono nas florestas tropicais de terras baixas da Amazônia diminuiu em um terço de 2005 a 2015 em comparação com a década de 1990 (Hubau et al., 2020; Brienen et al., 2015). Sob as condições do El Niño durante 2015-2016, a América tropical, a África e a Ásia tornaram-se temporariamente fontes líquidas de emissões de CO₂ para a atmosfera (Liu et al., 2017). No entanto, essas perdas líquidas de carbono parecem ser sustentadas por mecanismos distintos que indicam diferenças na estabilidade do sumidouro de carbono em diferentes continentes, o que exigirá compreensão e gerenciamento regionalmente específicos para mitigar. As fontes de concentrações atmosféricas de CO₂, conforme observado pelo Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2), Greenhouse Gases Observing SATellite (GOSAT) e Measurements Of Pollution In The Troposphere (MOPPIT), sugerem que, nas Américas tropicais, as taxas fotossintéticas mais baixas levaram à redução da absorção de carbono, o que alterou o balanço de CO₂ para emissões líquidas (**Figura 1**). Na África, o aumento das temperaturas levou a um aumento da respiração, que superou os benefícios de sequestro das florestas tropicais da África Central (Liu et al., 2017). Na Ásia, uma superfície terrestre mais quente e seca resultou em mais emissões de CO₂ provenientes de incêndios (Liu et al., 2017).

Muitas florestas tropicais têm planícies de inundação e são intercaladas com ecossistemas aquáticos e de áreas úmidas, que desempenham um papel fundamental nos orçamentos globais de metano (CH₄), bem como no ciclo de CO₂ (Sjögersten et al., 2014; Peng et al., 2022). Os sistemas tropicais de zonas úmidas e interiores de água doce contribuem com a grande maioria das emissões aquáticas globais naturais de CH₄ e representam cerca de 20% do orçamento global total de CH₄ de ~575 Tg CH₄ yr⁻¹ (Saunois et al., 2020; Peng et al., 2022). As fontes tropicais de CH₄ também são o componente mais incerto do orçamento global de carbono (Saunois et al., 2020, 2024). A expansão do desmatamento e da degradação florestal, combinada com as mudanças no clima, impacta significativamente os fluxos de água de superfície, a descarga dos rios e a qualidade da água. Esses, por sua vez, afetam os ciclos biogeoquímicos; a adequação do habitat para as comunidades de plantas, animais, algas e microrganismos de água doce; os recursos hídricos para os seres humanos; e

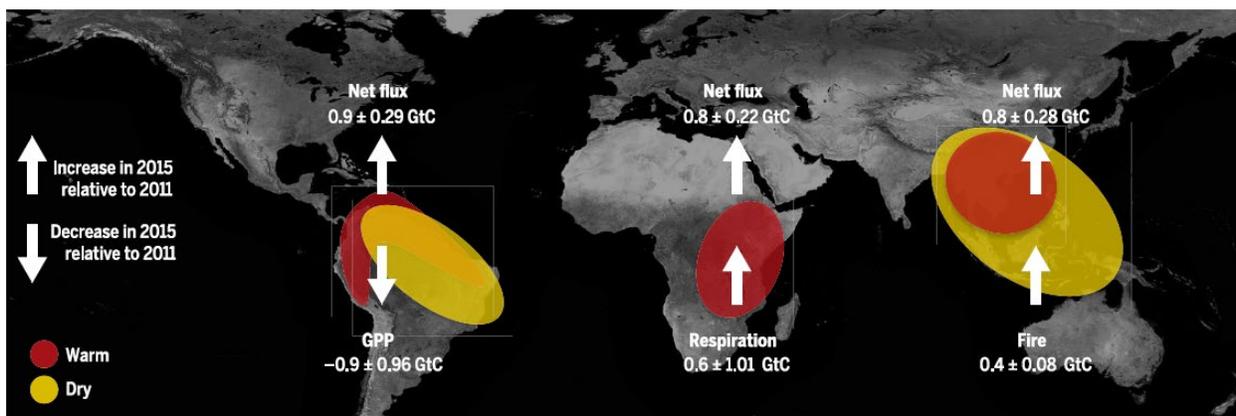


Figura 1. As análises dos dados dos satélites OCO-2, GOSAT e MOPPIT sobre os continentes tropicais revelaram que cada um deles se tornou uma fonte líquida de emissões de carbono para a atmosfera em resposta ao El Niño de 2015. De forma crítica, cada continente apresentou caminhos regionais distintos que exigem melhor compreensão. Adaptado de (Liu et al., 2017).

a produção de energia hidrelétrica (Castello e Macedo, 2016; Guimberteau et al., 2017; Taniwaki et al., 2017; Arias et al., 2020).

Os dados das missões de satélite e das campanhas aéreas da NASA, validados por medições terrestres, desempenham um papel fundamental no avanço da compreensão de como os ecossistemas florestais e a biodiversidade estão respondendo às mudanças ambientais (Cavender-Bares et al., 2022). **Entretanto, antes que os dados de satélite possam ser úteis para análise científica ou uso operacional, as medições terrestres são essenciais para calibrar e validar as observações de satélite. A escassez de medições terrestres e recuperações aerotransportadas em regiões tropicais levou a desafios significativos no aprimoramento dos produtos de satélite e na interpretação das descobertas científicas obtidas com esses produtos.** Por exemplo, os ciclos do carbono e da água nos trópicos dependem muito da dinâmica da umidade do solo; no entanto, observações terrestres recentes revelaram que as recuperações do satélite Soil Moisture Active Passive (SMAP) apresentam fortes vieses nos ecossistemas tropicais (Cho et al., 2024). É importante ressaltar que esses mesmos dados baseados em terra proporcionaram uma oportunidade de melhorar as recuperações de umidade do solo do SMAP em florestas tropicais (Wang et al., 2024). Outro exemplo de escassez de medições nos trópicos é a falta de dados de validação baseados em terra para recuperações de CO₂ baseadas no espaço nos trópicos, especialmente na África tropical, o que levou a um debate contínuo sobre a magnitude das trocas líquidas da biosfera na África tropical (Palmer et al., 2019; Gaubert et al., 2023). Da mesma forma, apesar da necessidade urgente de avaliar a biodiversidade global em escala para avaliar a eficácia dos esforços de conservação da biodiversidade, os recursos de monitoramento da biodiversidade por sensoriamento remoto via satélite estão em sua infância.

A redução dos vieses nas recuperações da umidade do solo e da coluna atmosférica de CO₂ e o avanço de novos recursos de medição diretamente relacionados à biodiversidade (por exemplo, diversidade beta das árvores do dossel) e proxies (por exemplo, redes de diversidade) são essenciais para o avanço da compreensão do ciclo da água, dos fluxos de carbono, da biodiversidade e da dinâmica do ecossistema. A validação de observações de satélite e aerotransportadas com medições terrestres é essencial para o sucesso das missões de observação da Terra da NASA, especialmente com o advento de uma empolgante frota de sensores novos e futuros que têm o potencial de capturar a multidimensionalidade dos sistemas observados (por exemplo, por meio das missões NASA-Indian Space Research Organisation SAR [NISAR] e Surface Biology and Geology [SBG]). O desenvolvimento de produtos de satélite mais precisos, especialmente em regiões tropicais pouco estudadas, apoia diretamente a missão da NASA de aprimorar o monitoramento ambiental global e avançar os modelos de previsão.

As florestas tropicais são as menos investigadas de todos os principais biomas terrestres da Terra.

Os métodos para validar as observações por satélite e aéreas usadas no PANGEA incluem parcelas de inventário florestal, locais de torres de fluxo de Foucault, outras medições de solo e conhecimento ecológico indígena, tradicional e local (IEK, TEK, LEK) que fornecem informações valiosas sobre biodiversidade, dinâmica florestal e funções do ecossistema (por exemplo, ForestPlots.net et al., 2021; Anderson-Teixeira et al., 2014, Davies et al., 2021, Delwiche et al., 2024). No entanto, devido a desafios de acessibilidade e financiamento, a cobertura atual dessas medições nos trópicos, especialmente na África, é esparsa e raramente segue um padrão de amostragem

aleatória ou sistemática necessária para obter poder estatístico e menor viés (Goetz et al., 2015; Bustamante et al., 2016). Consequentemente, a extrapolação de locais limitados de parcelas pode levar a incertezas e vieses significativos (Saatchi et al., 2015; Tejada et al., 2019). A distribuição latitudinal das parcelas de inventário florestal e das torres de fluxo de covariância de Foucault demonstra a sub-representação das florestas tropicais nos esforços de pesquisa global, revelando que o menor número de torres e parcelas é encontrado em regiões de florestas tropicais, apesar de terem a maior produtividade primária bruta e emissões de metano de fontes naturais (Baldocchi, 2020, Schimel et al., 2015) (**Figura 2**). Existe apenas uma torre de fluxo em toda a África Central (Sibret et al., 2022). Além disso, as lacunas gritantes de dados, métodos e conhecimento nos trópicos atualmente limitam os esforços para desenvolver mapas globais de diversidade usando recuperações hiperespectrais (por exemplo, mapas de características funcionais) (Dechant et al., 2024). A ampliação das observações de características estruturais e funcionais e de métricas de função do ecossistema em regiões de florestas tropicais fornecerá dados de calibração e permitirá uma melhoria significativa na caracterização de padrões e processos que impulsionam a dinâmica de florestas tropicais altamente diversificadas. Além dos modelos estatísticos e baseados em processos, as técnicas de inteligência artificial e de aprendizado de máquina cresceram consideravelmente na última década e agora podem ser usadas para dimensionar rigorosamente as medições terrestres para observações aéreas e de satélite em nível regional e global (Aguirre-Gutiérrez et al., 2021; Dalagnol et al., 2022; Lines et al., 2022).

A escassez de dados sobre os impactos da diversidade estrutural e funcional das florestas tropicais nos ciclos de carbono, água e energia limita nossa capacidade de entender o papel das florestas tropicais no sistema terrestre. no sistema da Terra.

As previsões de fluxo de carbono do Modelo do Sistema Terrestre (ESM) têm incerteza três vezes maior nos trópicos do que em outras latitudes (Cavaleri et al., 2015; **Figura 3**). Produtos robustos baseados em sensoriamento remoto que descrevem os ciclos de carbono, água e energia das florestas tropicais, bem como a caracterização aprimorada do processo, são essenciais para compreender as interações e os feedbacks entre as florestas tropicais e o clima e restringir as previsões dos ESMs. As previsões dos ESMs que participam do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP) divergem acentuadamente em magnitude e em conclusões quanto ao fato de a terra ser um sumidouro ou fonte de carbono (Arora et al., 2020; Friedlingstein et al., 2006; Friedlingstein et al., 2014; Negron-Juarez et al., 2015). Embora o desenvolvimento de modelos entre o CMIP - Fase 5 (CMIP5) e o CMIP - Fase 6 (CMIP6) tenha resultado em um grande passo para restringir a incerteza do fluxo de carbono tropical, essas reduções estavam principalmente ligadas à inclusão de limitações de nutrientes nos modelos (Friedlingstein et al., 2023). Tradicionalmente, os ESMs ignoram a maior parte da biodiversidade e representam a vegetação tropical de maneiras simples e agregadas que não capturam as respostas das florestas tropicais à variação climática e às perturbações e contribuem para a falha do modelo (Levine et al., 2016; Yang et al., 2023; Sakchewski et al., 2016; Schmitt et al., 2020).

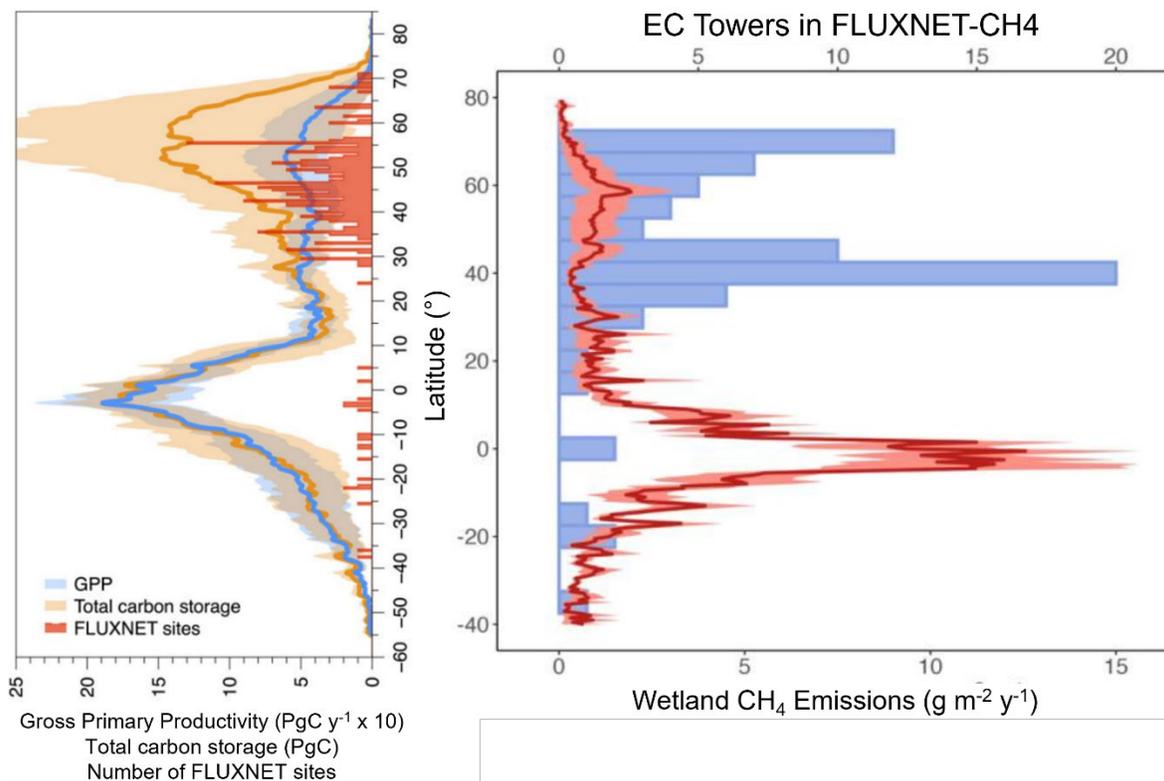


Figura 2. A função florestal refere-se aos papéis ecológicos das florestas, como a regulação do clima, o apoio à biodiversidade, o ciclo de nutrientes e o fornecimento de habitat, que contribuem para a saúde e a estabilidade gerais dos ecossistemas. As funções florestais incluem a produtividade primária bruta (GPP), a produtividade da madeira, a respiração do ecossistema e a evapotranspiração. O painel (a) foi adaptado de Schimel et al. (2015). Painel (b) de Alison Hoyt, Clarice Perryman e Fa Li.

A restrição dessa incerteza exige uma representação aprimorada dos processos ecológicos de diversos ecossistemas (Bonan et al., 2024). As gerações mais recentes de modelos de biosfera terrestre e modelos de demografia da vegetação, como o Ecosystem Demography Model versão 2 (ED2), o Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator (FATES) e o BiomeE, incluem dosséis florestais mais diversos em termos estruturais e funcionais (Fisher et al., 2018; Longo et al., 2019; Koven et al., 2020; Weng et al., 2022). Embora os modelos de demografia da vegetação representem os processos de dinâmica florestal mais diretamente, a complexidade adicional cria dois desafios para simulações regionais e globais. Primeiro, as condições iniciais exigem dados detalhados sobre a estrutura e a composição da floresta, que atualmente só podem ser obtidos para pequenas áreas de interesse a partir de parcelas florestais (Marvin et al., 2014). Segundo, os sistemas de benchmarking de modelos existentes, como o International Land Model Benchmarking (ILAMB; Collier et al., 2018), são insuficientes, pois a geração mais recente de modelos pode prever propriedades agregadas razoáveis (por exemplo, biomassa total acima do solo) por meio de erros de compensação na representação do processo (por exemplo, produtividade e mortalidade excessivamente altas). Avanços recentes em sensoriamento remoto lidar, radar e hiperespectral oferecem uma oportunidade única de coletar dados sobre a estrutura, a composição e a biodiversidade de ecossistemas tropicais em escalas de paisagem e, assim, melhorar a parametrização de modelos, a inicialização, o benchmarking e o desenvolvimento de processos (Schimel et al., 2019; Schimel e Carroll, 2024).

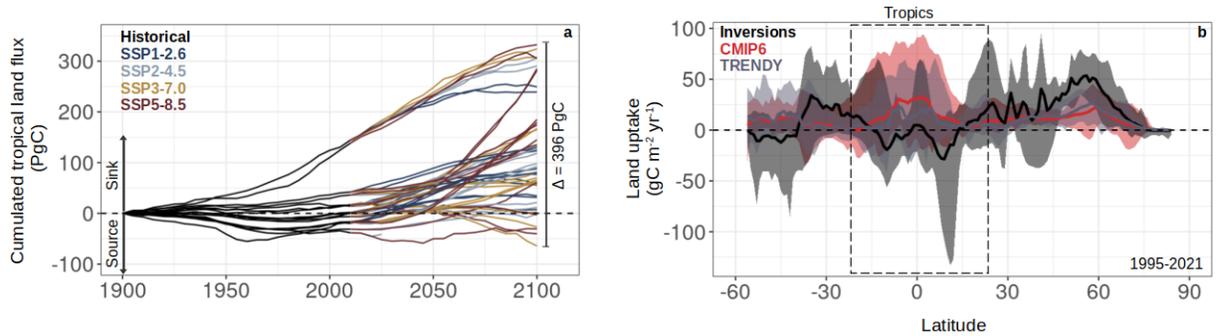


Figura 3. Fluxo de carbono terrestre cumulativo histórico e futuro dos trópicos de acordo com os modelos CMIP6 com vegetação dinâmica e vários cenários de emissão (a). Média zonal da absorção de carbono da terra de acordo com os modelos de inversão (preto), modelos CMIP6 com modelos de vegetação dinâmica e modelos de superfície terrestre TRENDY para o período recente (b). A extensão da região tropical e sua alta incerteza são destacadas com o retângulo tracejado. O painel (a) foi adaptado de Friedlingstein et al., 2014 (atualização do CMIP5 para o CMIP6). O painel (b) foi redesenhado do IPCC AR6 com dados recentes.

Para atender a essas necessidades e em resposta a uma chamada do Programa de Ecologia Terrestre da NASA, apresentamos abaixo o escopo de um projeto de campo de ecologia terrestre, a investigação PAN tropical de bioGeoquímica e Adaptação Ecológica (PANGEA), que promoverá a compreensão dos processos que controlam as mudanças nos biomas de florestas pantropicais e seus feedbacks integrados com o clima da Terra (**Figura 4**).

O PANGEA emprega uma estratégia de ciência em escala, adotando uma abordagem de sistemas integrados que abrange mosaicos de paisagens complexas que vão de florestas a áreas úmidas e turfeiras, e de sistemas agrícolas socioecológicos intactos a perturbados. A transdisciplinaridade e a coprodução colaborativa estão no centro do PANGEA. O PANGEA garantirá a colaboração equitativa e transdisciplinar entre pesquisadores, governos, instituições e Povos Indígenas e Comunidades Locais (IPLCs) para integrar diversos conhecimentos especializados e conhecimentos. Essa abordagem possibilitará uma compreensão mais abrangente do papel das florestas tropicais no sistema terrestre e capacitará soluções localmente orientadas para as mudanças climáticas e a perda de biodiversidade. O projeto aninhado do PANGEA, com uma abordagem de ciência em escala descrita em mais detalhes na *Seção 6.1.1*, promoverá o monitoramento por satélite, o desenvolvimento de produtos de sensoriamento remoto e a assimilação de dados e a avaliação comparativa de vários processos em modelos de ecossistema de última geração, o que pode aumentar significativamente os recursos de previsão de longo prazo. Para garantir medições e análises coordenadas, o PANGEA foi projetado em colaboração com muitas atividades alinhadas atuais e futuras, incluindo campanhas e missões da Agência Espacial Europeia (ESA), o Grupo de Observação da Terra - Árvores (GEO-TREES) e a Iniciativa One Forest Vision (OFVi). As recuperações de sensoriamento remoto suborbital (por exemplo, por drones e aeronaves) são elementos essenciais do PANGEA, necessários para fazer a escala entre as medições terrestres e as observações de satélite de resolução mais grosseira. Nesse sentido, o PANGEA se baseia em projetos aéreos e de campo da NASA muito bem-sucedidos na África e nas Américas, incluindo o SAFARI 2000, o AfriSAR-1 e -2, o Levantamento de Biodiversidade do Cabo (BioSCape) e várias missões Earth Venture Suborbital (EVS).

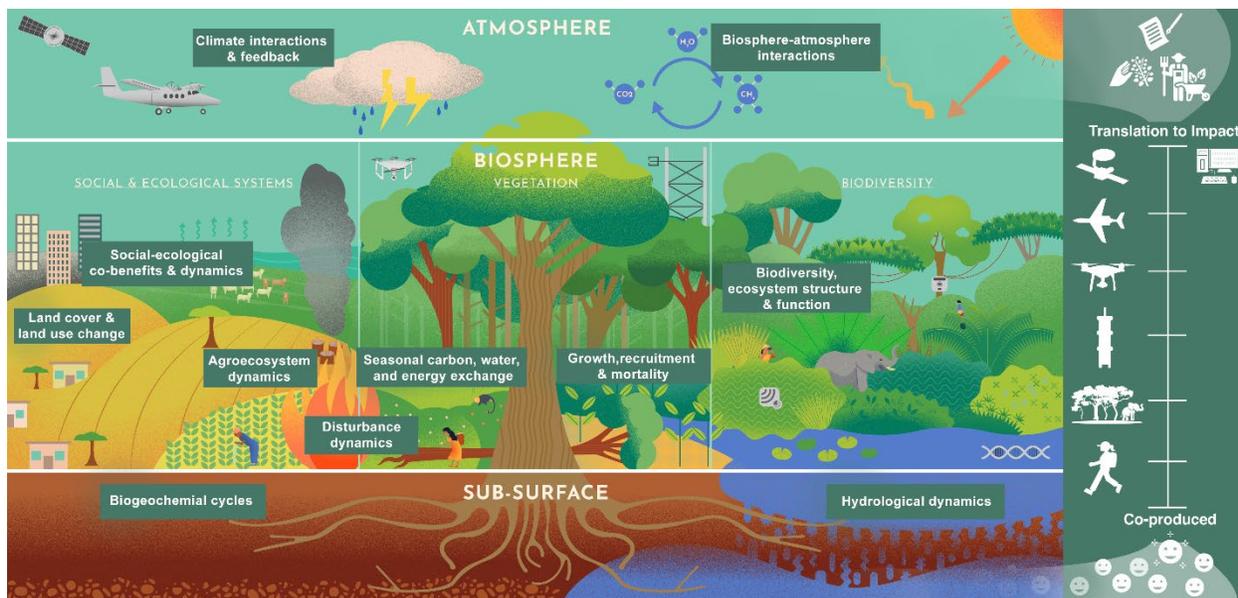


Figura 4. Medições e dimensionamento do PANGEA. O PANGEA adota uma abordagem integrada e transdisciplinar para a ciência e os aplicativos e coletará dados de solo, torres, drones e aeronaves em paisagens de florestas tropicais na África e nas Américas. A modelagem e as análises de sensoriamento remoto por satélite integrarão essas informações para melhorar a compreensão das florestas pantropicais.

Relevância da ação terrestre: A implementação do PANGEA capacitará e permitirá que os tomadores de decisão se beneficiem totalmente das missões atuais e futuras dos satélites de observação da Terra para tomar medidas eficazes e regionalmente adaptadas para mitigar os impactos das mudanças climáticas e de uso da terra e conservar e regenerar biomas de florestas tropicais de importância global. Os objetivos do PANGEA (Seção 1.1) estão diretamente alinhados com os programas Earth Action da NASA, incluindo Clima e Resiliência, Recursos Hídricos, Conservação Ecológica e Agricultura. Para mitigar os impactos das mudanças climáticas e do uso da terra sobre a função e a biodiversidade dos ecossistemas tropicais e para conservar esses biomas de importância global, é preciso agir. Essa ação requer uma melhor compreensão das diversas maneiras pelas quais as florestas tropicais em diferentes continentes estão respondendo às mudanças e requer métodos e tecnologias de ponta para implementar soluções.

O PANGEA desenvolverá a ciência necessária para dimensionar as medições terrestres para os recursos de monitoramento por satélite e para dimensionar o conhecimento e as ações locais para soluções globais. O PANGEA mapeará e quantificará a estabilidade de longo prazo do sequestro de carbono e dos fluxos de metano para melhorar as previsões futuras e apoiar os esforços de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. O PANGEA também avançará nos métodos de mapeamento da biodiversidade e dos processos do ecossistema para desenvolver uma compreensão aprimorada das florestas tropicais, a fim de apoiar a conservação da biodiversidade que abrange a variação da biodiversidade em níveis de genes, espécies, comunidades e ecossistemas. Esses esforços serão realizados por meio de atividades equitativas, colaborativas e desenvolvidas em conjunto com as comunidades indígenas e locais, que entrelaçarão o conhecimento ecológico indígena, tradicional e local (IEK, TEK e LEK) com dados de sensoriamento remoto e outras formas de dados e conhecimento (consulte as Seções 6.2.4, 7.2 e 8 para obter mais detalhes). Além disso, os avanços científicos e

técnicos do PANGEA, orientados por parceiros de ação, apoiarão o desenvolvimento regionalmente adaptado das estratégias de adaptação dos agricultores às mudanças climáticas, o desenvolvimento de sociobioeconomias, a melhoria da rastreabilidade dos produtos agrícolas até sua origem e a criação de alertas de desastres para orientar a resposta rápida. Esses elementos abrangem as Perguntas Científicas do PANGEA (Seção 3) e a *Estratégia de Ciências da Terra para Ação* (Seção 9).

PANGEA irá

- **Responder** a questões científicas urgentes e de relevância global, enfatizando comparações entre as principais formações de florestas tropicais do nosso planeta por meio de análises e interpretações eficazes de observações de sensoriamento remoto (via satélite e aérea) combinadas com medições terrestres e modelagem ambiental e de ecossistemas.
- **Fornecer** informações que contribuam para a conservação e regeneração de florestas tropicais e para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas.
- **Assegurar** colaborações transdisciplinares e a construção de novos relacionamentos entre diversos parceiros, incluindo cientistas dos EUA e de países com florestas tropicais, agências espaciais internacionais, povos indígenas e comunidades locais, tomadores de decisão e comunidades que tomam medidas nos trópicos.
- **Treinar e educar** a próxima geração de cientistas e a força de trabalho mais ampla dos EUA e dos países tropicais onde a pesquisa de campo será baseada.
- **Estabelecer** um legado de dados abertos e ciência aberta para fortalecer parcerias entre cientistas e instituições nos EUA, países tropicais e outros países como base para futuras pesquisas e aplicações.

O PANGEA irá além do LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia) e além da Amazônia, empregando novas tecnologias de satélite e observações indisponíveis durante o LBA, para avançar na ciência e nas capacidades de monitoramento pantropical (Figura 5).

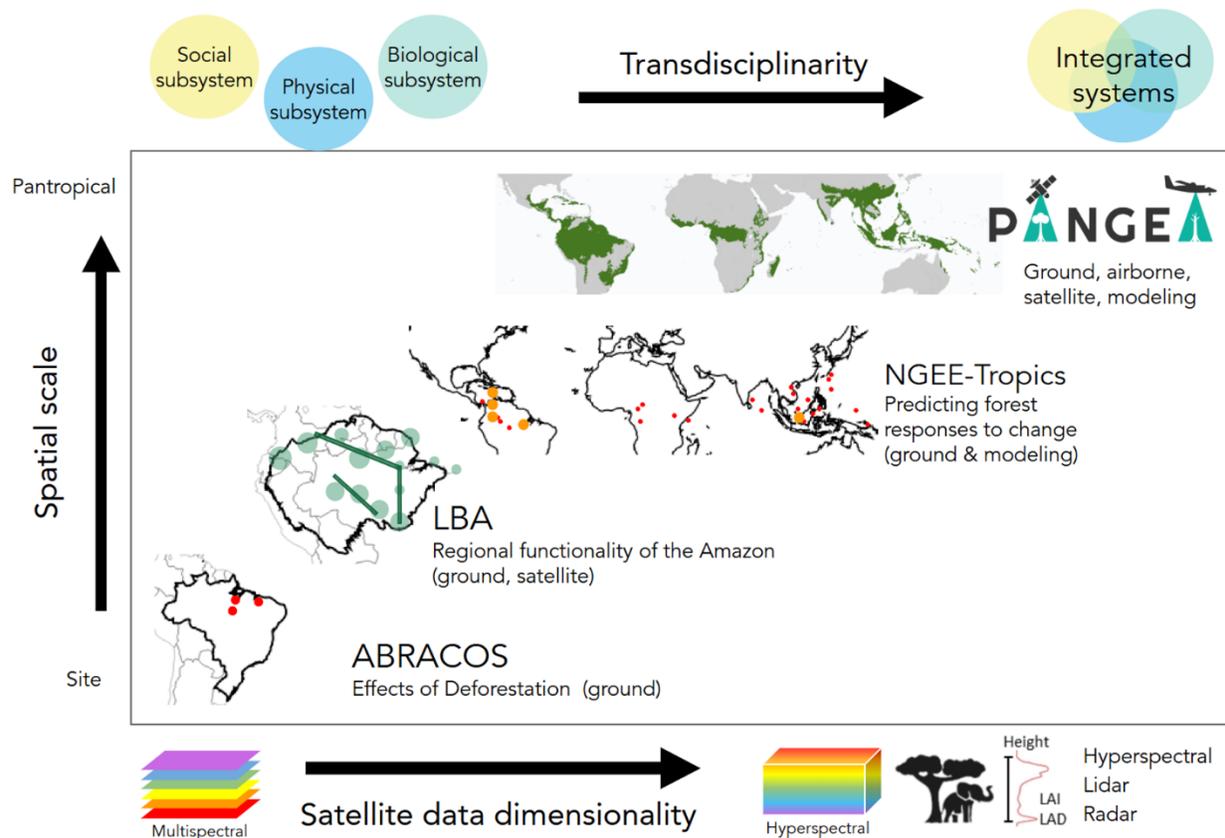


Figura 5. A evolução do PANGEA. O PANGEA se baseia em esforços anteriores que foram mais limitados em termos de escopo geográfico, acesso a dados e/ou transdisciplinaridade, aproveitando a oportunidade rica em dados, modelos, computacionalmente avançada e oportuna de coordenar com atividades pantropicais.

O PANGEA foi desenvolvido com base na contribuição de mais de 800 pessoas, representando mais de 300 organizações de 42 países em 5 continentes, durante o esforço de definição do escopo por meio de atividades de grupos de trabalho, 5 workshops, 10 prefeituras, 18 apresentações em conferências e simpósios e mais de 150 reuniões bilaterais (Figura 6). Os workshops foram realizados em Washington DC, Camarões, Peru, Brasil e Tailândia, com mais de 275 participantes presenciais e 298 virtuais. Os participantes do processo de definição de escopo representaram muitas comunidades, inclusive a comunidade acadêmica nos trópicos, bem como nos EUA e na Europa, comunidades indígenas e locais dos trópicos, a comunidade da NASA e outras agências federais dos EUA, agências espaciais internacionais, agências governamentais estrangeiras, organizações da sociedade civil e setor privado. Esse esforço de delimitação de escopo ressaltou a enorme necessidade do PANGEA e a oportunidade oportuna que ele apresenta para coordenar muitas atividades atuais e futuras, conforme estabelecido neste white paper.

No restante da Seção 1, apresentamos uma visão geral do PANGEA. Em seguida, detalhamos o conceito do PANGEA, incluindo os Temas Científicos do PANGEA (Seção 2), as Lacunas de Conhecimento e as Perguntas Científicas (Seção 3), o avanço científico e técnico decorrente do PANGEA (Seção 4), a função fundamental do sensoriamento remoto da NASA (Seção 5), a estratégia de pesquisa e o projeto de estudo do PANGEA (Seção 6), as prioridades de capacitação, treinamento e educação do PANGEA (Seção 7), a estratégia de envolvimento da comunidade (Seção 8), a

capacidade de viabilizar o Earth Science to Action (Seção 9) e a viabilidade técnica e logística (Seção 10).

1.1 Visão geral dos temas, perguntas e objetivos de ciências

O conhecimento dos ciclos biogeoquímicos das florestas tropicais, da biodiversidade, dos feedbacks e interações climáticas, dos sistemas socioecológicos e da dinâmica de distúrbios é fundamental para prever a resposta das florestas tropicais às mudanças climáticas e de uso da terra. A

compreensão desses fatores também é fundamental para prever o futuro do sistema terrestre e para desenvolver estratégias de conservação e mitigação de mudanças nas florestas e na biodiversidade. Os temas e as perguntas de pesquisa do PANGEA foram desenvolvidos por meio de um processo consultivo inclusivo com contribuições de centenas de cientistas de cinco continentes (consulte a Seção 8.1). Os temas e as perguntas resultantes enfatizam a resolução de incertezas relacionadas a tendências multidecadais e respostas a eventos extremos em cinco áreas temáticas (**Figura 7**):

- **Os ciclos biogeoquímicos** abrangem o movimento e a transformação de elementos essenciais (por exemplo, carbono, nitrogênio e fósforo) na biosfera, na atmosfera, na hidrosfera e na litosfera da Terra. Nas florestas tropicais, esses ciclos são altamente dinâmicos, com rápida renovação de nutrientes e biomassa; no entanto, as florestas tropicais desempenham um papel significativo no armazenamento global de carbono.
- **Biodiversidade** é a variedade de vida na Terra, incluindo sua variação dentro e entre espécies e ecossistemas (diversidade genética, filogenética, taxonômica e funcional). Nas florestas tropicais, a biodiversidade é excepcionalmente alta dentro e entre as florestas, apoiando interações complexas e a função do ecossistema, além de causar heterogeneidade nas respostas e na resistência ao clima.
- **As interações e feedbacks climáticos** são as interações bidirecionais entre os sistemas climáticos e os ecossistemas. As florestas tropicais regulam diretamente os ciclos de carbono, água e energia. As mudanças climáticas (como mudanças de temperatura e precipitação) e as mudanças no uso e na cobertura da terra (como incêndios e degradação florestal) podem alterar a dinâmica do ecossistema florestal, criando ciclos de feedback que afetam a estabilidade climática global.
- **Os sistemas socioecológicos** são sistemas interconectados de seres humanos e natureza, nos quais os componentes ecológicos e sociais interagem e se influenciam mutuamente. Nas florestas tropicais, esses sistemas são moldados pelos meios de subsistência, práticas



Figura 6. PANGEA em números. O esforço de definição do escopo do PANGEA em 2024 envolveu mais de 800 pessoas de mais de 396 instituições durante workshops, prefeituras, conferências e por meio de reuniões bilaterais e atividades de grupos de trabalho.

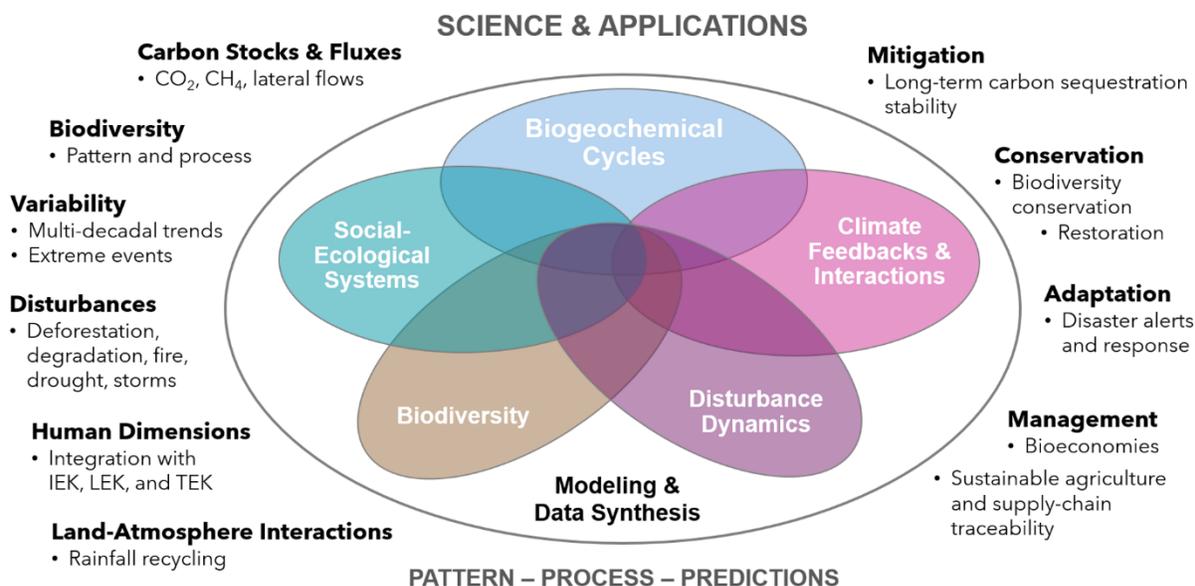


Figura 7. Temas científicos do PANGEA. Os temas científicos e de aplicações do PANGEA enfatizam a resolução de incertezas relacionadas a tendências multidecadais e respostas a eventos extremos em cinco áreas temáticas.

culturais e uso de recursos das comunidades locais e globais, enquanto as mudanças ecológicas afetam o bem-estar social, criando feedbacks complexos entre as atividades humanas e a estabilidade do ecossistema.

- **A dinâmica de distúrbios** varia de acordo com o tipo, a intensidade e a frequência, e envolve eventos naturais ou induzidos pelo homem, como incêndios, tempestades, secas e exploração madeireira, que perturbam os ecossistemas e afetam sua estrutura e função. Nas florestas tropicais, esses distúrbios podem levar a mudanças no ciclo biogeoquímico, na biodiversidade e nos feedbacks do clima e dos sistemas socioecológicos.

Usando esses temas, o PANGEA responderá à pergunta abrangente (**Figura 8**): **Quão vulneráveis ou resilientes são as paisagens florestais tropicais às mudanças climáticas e de uso da terra e quais são os feedbacks das mudanças florestais no ciclo global do carbono e no clima?**

Para abordar essa questão ampla da vulnerabilidade e dos feedbacks das florestas tropicais e informar a conservação das florestas e da biodiversidade e as estratégias de mitigação e adaptação ao clima, o PANGEA precisa responder a três subquestões transdisciplinares:

1. Quais são os **padrões** de mudanças recentes (5 a 30 anos) e contínuas nos estados, na dinâmica e nos feedbacks da paisagem das florestas tropicais e como eles variam geograficamente?
2. Quais **processos** controlam a heterogeneidade na vulnerabilidade das paisagens florestais tropicais às mudanças estruturais e funcionais no Antropoceno?
3. Como as mudanças atuais e **projetadas** para o futuro nas paisagens de florestas tropicais alterarão os feedbacks dos climas locais, regionais e globais e dos sistemas socioecológicos?

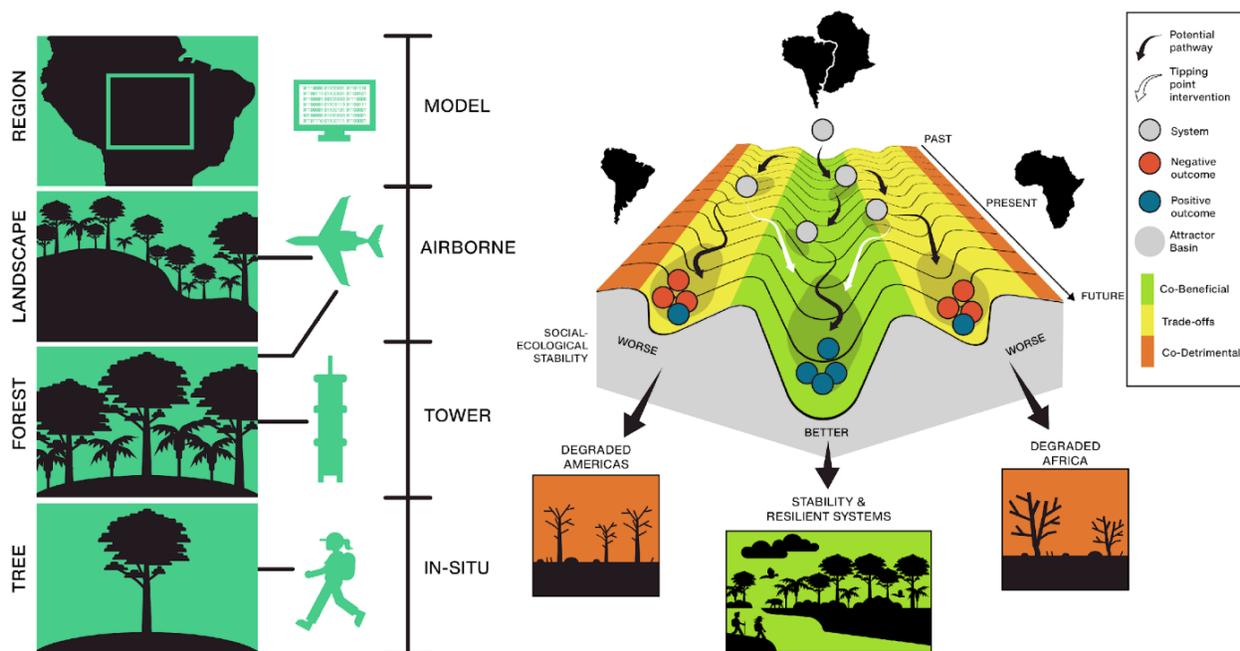


Figura 8. O PANGEA examina o grau de vulnerabilidade ou resiliência das paisagens florestais tropicais e seus feedbacks para o ciclo global de carbono e o clima. A ciência, os aplicativos e as colaborações do PANGEA empregam uma abordagem integrada para preencher a lacuna entre os rápidos avanços da ciência e da tecnologia e a capacidade da sociedade de aproveitá-los para um mundo mais resiliente.

Para abordar as questões acima, estabelecemos cinco **objetivos do PANGEA**:

1. **Caracterizar e quantificar respostas heterogêneas de florestas tropicais** às mudanças climáticas e de uso da terra;
2. **Abordar as necessidades de calibração, validação e desenvolvimento de algoritmos para garantir que as medições possam ser recuperadas com precisão dos conjuntos de dados de sensoriamento remoto por satélite** sobre florestas tropicais, avançando, em última análise, a utilidade global das missões de satélite;
3. **Restringir a incerteza do modelo de previsões de fluxos de carbono tropical e outros ciclos biogeoquímicos, biodiversidade e feedbacks floresta-clima**, melhorando a compreensão do processo e avançando na integração de dados e modelos de sensoriamento remoto.
4. **Desenvolver novos recursos para monitorar o carbono, a biodiversidade e a agricultura usando o sensoriamento remoto por satélite** e apoiar o desenvolvimento de ferramentas para transformar a ciência em ação.
5. **Treinar a próxima geração de cientistas e líderes** para continuar esse trabalho além do PANGEA.

O ideal seria que o PANGEA fosse realizado em todos os trópicos. Na realidade, o PANGEA precisará ter um escopo mais limitado devido às restrições orçamentárias e à priorização do que é possível realizar em um período de 6 a 9 anos. Limitar o PANGEA a um continente tropical, no entanto, impede que o PANGEA faça comparações dentro e entre continentes. Por esses motivos, as pesquisas e atividades do PANGEA priorizarão a investigação das diferenças entre as duas maiores extensões de florestas tropicais da Terra, nas **Américas** e na **África Central**. Ambas dependem fortemente de chuvas

recicladas (Baker e Spracklen, 2022), mas responderam de forma diferente às tendências de secagem decadal (Asefi-Najafabady & Saatchi, 2013; Saatchi et al., 2013) e foram submetidas a regimes contrastantes de uso da terra (Malhi et al., 2013; Berenguer et al., 2021a). Esses continentes também apresentam projeções contrastantes, embora incertas, nas tendências de precipitação (Cook et al., 2020; Dobler et al., 2024). O foco nesses dois continentes, ao mesmo tempo em que integra conjuntos de dados e pesquisas de atividades existentes e complementares nos trópicos, esclarecerá a importância dos estados e processos atuais mais do que o foco em uma única região.

1.2 A necessidade urgente do PANGEA

A implementação do PANGEA é urgentemente necessária por três motivos. Primeiro, estudos sugerem o possível colapso dos ecossistemas florestais tropicais dentro de décadas, o que poderia afetar drasticamente os ciclos globais de carbono e água, exacerbando as mudanças climáticas (Lovejoy e Nobre 2018, Malhi et al., 2009; Boulton et al., 2022; Wunderling et al., 2022). Dada a função essencial desses ecossistemas nos ciclos globais de carbono e água, o colapso dos ecossistemas florestais tropicais teria efeitos potentes em todo o sistema terrestre, exacerbando as tendências atuais das mudanças climáticas (Wunderling et al., 2024). Em segundo lugar, a pesquisa em terra continua escassa e ainda há uma falta de conhecimento para entender adequadamente os dados científicos das missões de satélite, tanto das atuais - por exemplo, **GEDI** (Global Ecosystem Dynamics Investigation), **EMIT** (Earth Surface Mineral dust source Investigation), **OCO-2/3** e **ECOSTRESS** (Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station) - quanto das futuras missões - por exemplo, **NISAR***, **BIOMASS***, **EDGE*** e **SBG***. O PANGEA oferecerá uma oportunidade única de obter medições terrestres e recuperações aéreas com esforços internacionais coordenados e oportunos, para entender os sinais dessas missões e para desenvolver e calibrar métodos de síntese e assimilação de dados, além de impulsionar e avaliar modelos da biosfera terrestre e do sistema socioecológico. Deixar de capitalizar essas missões para coordená-las com medições baseadas em terra perderá uma oportunidade única de reduzir as incertezas em regiões com os maiores estoques de carbono e a maior contribuição para o ciclo de carbono, água, energia e nutrientes entre os ecossistemas terrestres (Schimel et al., 2015; Schimel et al., 2019). Terceiro, o risco de transições críticas em florestas tropicais difere entre os biomas de florestas tropicais (Liu et al., 2017), com exemplos recentes mostrando diferenças acentuadas entre a África e as Américas (Hubau et al., 2020; Bennett et al., 2021; 2023). Estamos apenas começando a entender os mecanismos por trás dessas diferenças, juntamente com a diversidade estrutural e funcional subjacente das florestas tropicais. O PANGEA preencherá lacunas críticas de conhecimento, possibilitando avanços oportunos que apoiam diretamente a Área de Enfoque de Ciclo de Carbono e Ecossistemas da NASA, em alinhamento com as Áreas de Enfoque de Variabilidade e Mudança Climática e Ciclo de Água e Energia, a utilidade de missões, incluindo NISAR e SBG, bem como ferramentas para implementar e avaliar compromissos globais de clima e biodiversidade.

1.3 Papel das observações de sensoriamento remoto

O PANGEA preencherá as lacunas críticas de dados e métodos para avançar o dimensionamento entre várias medições terrestres e observações aéreas e por satélite. Estamos em um momento sem precedentes, rico em dados, modelos e computacionalmente avançado. Nos últimos anos, os recursos espaciais de lidar, radar de micro-ondas, hiperespectral, altímetro e outros recursos de

sensoriamento remoto tornaram-se operacionais em várias escalas. Os sensores de satélite e aerotransportados permitem a obtenção mais direta de concentrações atmosféricas de CO₂ e CH₄, fluxos de águas subterrâneas e superficiais que podem revelar fluxos laterais de carbono e nutrientes, bem como a diversidade estrutural, funcional e, em alguns casos, taxonômica das florestas. Entretanto, nas regiões de florestas tropicais, as medições terrestres são escassas, o que limita a utilidade global das observações por satélite. Poucos países com florestas tropicais têm inventários sistemáticos e regulares de florestas e vida selvagem, torres de fluxo ou dados meteorológicos, especialmente na África tropical. No entanto, mesmo o número limitado de locais de pesquisa e medições terrestres fornecerá informações essenciais sobre processos biogeoquímicos, ecológicos e hidrológicos. A escassez desses dados dificulta a ampliação das medições e análises para regiões regionais, continentais ou pantropicais. O PANGEA realizará a coleta coordenada de dados e avançará nos métodos para dimensionar com mais precisão as medições no solo e em torres, por um lado, e as observações aéreas e espaciais, por outro.

Para aproveitar totalmente as novas observações de satélite de novos sensores, precisamos de dados coordenados de calibração e validação. Atualmente, as principais lacunas de dados e incertezas de processo em florestas tropicais limitam o desenvolvimento de algoritmos e produtos, impedindo que a utilidade global desses sensores de satélite seja totalmente aproveitada.

A constelação de satélites internacionais de observação da Terra em serviço atualmente, os que estão prestes a ser lançados e os que estão nos estágios iniciais de planejamento e implementação oferecem muitas dimensões de informações que não estavam disponíveis anteriormente nem eram amplamente utilizadas em estudos de florestas tropicais. O Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA) (Avisar et al., 2002; Davidson et al.; 2012; Keller et al., 2009), o projeto anterior de floresta tropical da NASA, começou em 1998, antes do lançamento dos satélites EOS Terra e Aqua. Na época, o Landsat era a principal ferramenta para monitorar o desmatamento (Skole e Tucker, 1993) e, durante a primeira década de pesquisa do LBA, foi aplicado para estimar a exploração madeireira (Asner et al., 2005) e os incêndios florestais no sub-bosque (Morton et al., 2011). As informações de sensoriamento remoto nos primeiros modelos ecológicos, como o modelo de biosfera Carnegie-Ames-Stanford (CASA) (Potter et al., 1993), incorporaram originalmente dados de índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) de satélites meteorológicos de órbita polar (AVHRR) calibrados para a produtividade primária líquida. A compreensão desses desafios de correspondência de dados motivou novos vínculos com dados de sensoriamento remoto mais sofisticados. A interpretação dos dados do MODIS levou à observação de que a região amazônica tem um sinal sazonal distinto de aumento de verde e redução de marrom (Huete et al., 2006). O LBA preencheu uma lacuna no conhecimento, desenvolvendo uma compreensão básica da vulnerabilidade da Amazônia às mudanças climáticas. Além disso, o LBA criou uma comunidade de pesquisa autossustentável e vibrante que prosperou no Brasil e ainda influencia toda a América do Sul. O LBA foi limitado pela área focal da Amazônia e pelo tipo e disponibilidade de observações de campo e dados de sensoriamento remoto. O projeto Next Generation Ecosystem Experiment in the Tropics (NGEE-Tropics, <https://ngee-tropics.lbl.gov>), em andamento, concentra-se na previsibilidade dos processos de ecossistemas tropicais em escalas específicas do local, e o aumento da capacidade de ampliar essas percepções para os níveis continental e pantropical continua sendo um desafio fundamental. O PANGEA abordará as limitações dos esforços anteriores, aproveitando dados de sensoriamento remoto mais recentes e futuros para dimensionar os estados e processos do

ecossistema. Essa abordagem abre caminho para uma compreensão mais abrangente e preditiva dos ecossistemas tropicais, desde as escalas locais até as pantropicais. **As novas tecnologias de sensores de satélite estão indo além da avaliação do verde** (consulte a Seção 5) e **estão fornecendo percepções muito mais profundas sobre a função das florestas tropicais para permitir medições mais diretas dos fluxos do ecossistema, da biodiversidade e das respostas às mudanças.**

A compreensão das florestas tropicais em escala requer o sensoriamento remoto por satélite associado a medições terrestres. As lacunas de conhecimento (consulte a Seção 3) que o PANGEA abordará não podem ser respondidas sem observações de satélites pantropicais, análises integrativas e modelos. O avanço efetivo do uso do sensoriamento remoto por satélite exige uma integração cuidadosa, criativa e rigorosa de diferentes formas de dados em escalas espaciais e temporais. A abundância de novos dados de satélite, aliada aos avanços em computação em nuvem, aprendizado de máquina e IA, permitirá uma análise de dados mais robusta do que em projetos anteriores de TE da NASA, como o LBA. Atualmente, há desafios decorrentes da escassez de observações terrestres e incompatibilidades de escala com dados de satélites tropicais que impedem a validação de métricas de sensoriamento remoto e o desenvolvimento de modelos de IA. O PANGEA aborda esses problemas integrando dados de solo, torre, drone, aeronave e satélite com abordagens de escala refinadas em projetos anteriores, como o Experimento de Vulnerabilidade Ártico-Boreal (ABoVE).

1.4 A necessidade de coleta de dados coordenada e trabalho em equipe

Reconhecendo a profunda marca que o colonialismo deixou na pesquisa de florestas tropicais, juntamente com a ciência de paraquedas e de sobrevoo (Culotta et al., 2024), **o PANGEA adota uma abordagem interativa e entrelaçada para garantir o envolvimento equitativo e ético com cientistas, instituições e parceiros de governos e Povos Indígenas e Comunidades Locais (IPLCs).** Várias seções descrevem a abordagem do PANGEA para o envolvimento da comunidade (Seção 8), uma estrutura organizacional inclusiva (Seção 10.1), Earth Science to Action (Seção 9), treinamento e educação (Seção 7), ciência aberta e gerenciamento de dados (Seção 10.3) e acordos internacionais ao realizar campanhas aéreas (Seção 6.2.4). A abordagem do PANGEA baseia-se no reconhecimento de que a ciência do sistema terrestre é inerentemente multifacetada e complexa. O Programa de Ecologia Terrestre da NASA promoveu o modelo de múltiplos investigadores durante décadas de campanhas de campo que abrangem o First ISLSCCP Field Experiment (FIFE), o Boreal Ecosystem-Atmosphere Study (BOREAS), o Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA) e o ABoVE. O PANGEA também promoverá uma estreita colaboração com as principais instituições dos EUA, incluindo **USDA, USFS, DOE, USGS, Smithsonian**, universidades importantes, incluindo **Penn State, Universidade de Oklahoma, UCLA e Universidade de Maryland**, comunidades indígenas, incluindo a **Aliança Global de Comunidades Territoriais (GATC)**, e parceiros internacionais, incluindo mais de 390 instituições, organizações e universidades de países tropicais (**Figura 9**).

Essas parcerias abrangem diversos esforços de pesquisa, integrando conhecimentos especializados de várias disciplinas para abordar lacunas críticas de conhecimento e os vários fatores e processos de interação para a compreensão das florestas tropicais. Muitas variáveis exigem conhecimento especializado, desde a aquisição e o uso de observações de satélite e instrumentos como um espectrômetro de imagem de alto desempenho até a identificação botânica de espécies de árvores ou o conhecimento tradicional das interações entre espécies. Nenhum indivíduo ou pequeno grupo

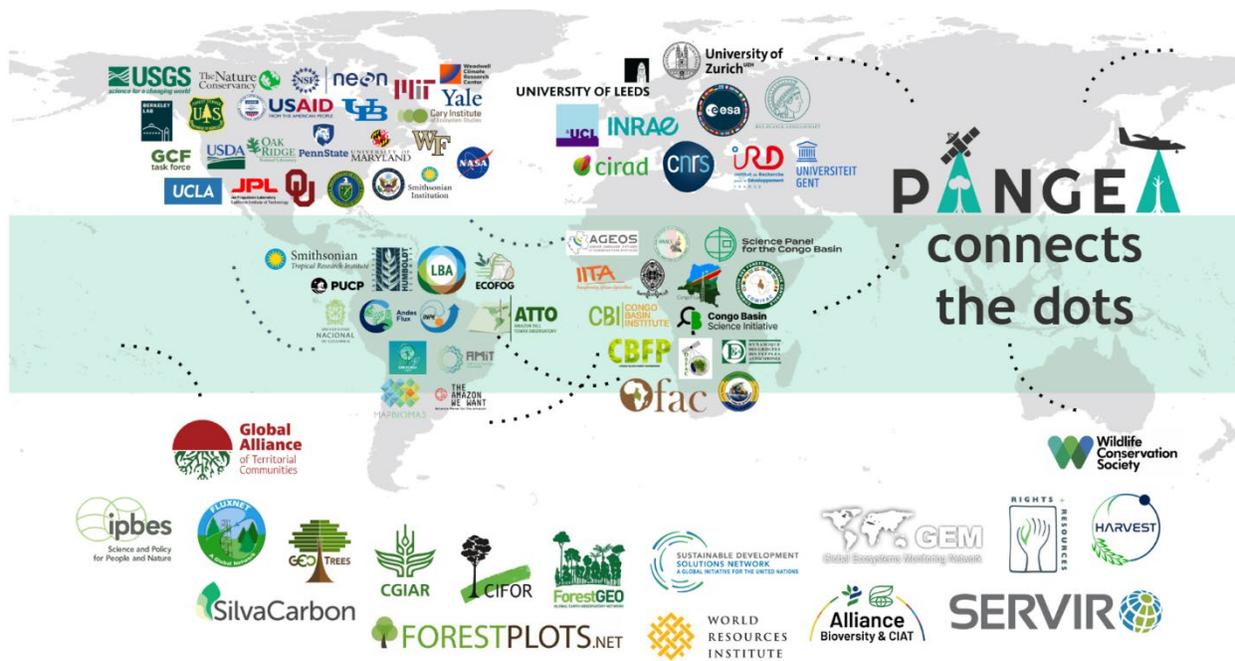


Figura 9. O PANGEA liga os pontos. O PANGEA apresenta uma oportunidade única de obter dados terrestres e aéreos com esforços coordenados e oportunos, para maximizar o valor das missões de satélite atuais e de próxima geração, por meio de parcerias com instituições e organizações em todo o mundo e nos EUA. O PANGEA se coordenará estreitamente com as atividades atuais e futuras para preencher as lacunas de dados, conhecimento e aplicações restantes.



de indivíduos possui todos os conhecimentos e ferramentas exigidos por uma investigação científica do sistema terrestre. Atender às necessidades de análises integrativas dos biomas tropicais requer uma grande equipe de especialistas trabalhando em conjunto. O PANGEA exige uma forte colaboração para garantir que as medições sejam coordenadas no tempo e no espaço para maximizar seu valor na interpretação e na modelagem. Isso só pode ser alcançado por meio de uma equipe cooperativa, coordenada e transdisciplinar. **Para incluir, capacitar e promover grupos historicamente sub-representados nas áreas de ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM) - por exemplo, pessoas que se identificam como negras, indígenas, hispânicas, mulheres ou portadoras de deficiências - o PANGEA priorizará o envolvimento ético e equitativo em todo o processo.**

1.5 A Campanha de Campo de Ecologia Terrestre e o Domínio de Estudo do PANGEA

O PANGEA é um projeto multifásico e plurianual que consiste em sensoriamento remoto aéreo e por satélite, medições no solo e campanhas em escala de paisagem. As atividades do PANGEA medirão um conjunto de variáveis para caracterizar a estrutura, a função, a dinâmica, os fluxos e os sistemas socioecológicos de diversas paisagens florestais nos trópicos. Usando um projeto de campanha modular e flexível, o PANGEA avançará os recursos de sensoriamento remoto por satélite nos trópicos para entender as respostas heterogêneas das florestas tropicais às mudanças climáticas e de uso da terra. O PANGEA adquirirá medições terrestres colocadas em conjunto com dados de sensoriamento remoto aéreo (por exemplo, hiperespectral, lidar, SAR, fluxos de carbono) que foram coletados até agora em apenas alguns locais nos trópicos em diferentes momentos, por diferentes organizações e com métodos diferentes.

O PANGEA incluirá um domínio **principal** e um domínio **estendido**. O domínio principal é onde o componente financiado pela NASA das campanhas de campo coordenadas em terra, torre, drones e aeronaves ocorrerá em várias paisagens grandes (aproximadamente 10.000 km²). A Seção 6.2.2 descreve as paisagens candidatas avaliadas durante o processo de definição do escopo que seriam avaliadas durante a fase de definição científica do PANGEA, antes da seleção final. O domínio estendido abrangerá as florestas úmidas pantropicais e é a área mais ampla de interesse científico, onde projetos adicionais podem ser realizados por meio de parcerias e onde as análises de satélite e modelagem serão enfatizadas. O Quadro 1 descreve uma avaliação preliminar da heterogeneidade em paisagens geográficas importantes no domínio ampliado do PANGEA. O domínio do PANGEA (principal + estendido) abrange os sistemas socioecológicos de florestas tropicais e as paisagens associadas encontradas nos trópicos úmidos e a escala espacial necessária para abordar as questões principais (Seção 3). Tanto o domínio principal quanto o domínio ampliado abrangerão florestas tropicais úmidas, inclusive florestas inundadas, áreas úmidas e turfeiras.

O PANGEA aproveitará o investimento em Ecologia Terrestre da NASA para seus principais recursos. Para levar em conta uma série de cenários de financiamento da NASA para o PANGEA, derivamos os níveis de **Linha de Base, Limiar e Escopo** das **Medições Científicas Essenciais** dos Objetivos Científicos do PANGEA (consulte a Seção 6.2.1 para obter detalhes). As Medições Científicas Essenciais permitirão que o PANGEA (1) compreenda as diferenças nos estoques e fluxos de carbono tropical e as forças que impulsionam a heterogeneidade, (2) resolva os problemas de escala entre os dados de campo e de satélite, avançando na compreensão do processo e nos métodos de escala, e (3) preveja as respostas variáveis do ecossistema da floresta tropical às mudanças climáticas e de uso da terra. Conforme observado acima, o domínio principal do PANGEA abrange florestas tropicais úmidas na África e, dependendo do nível de Medição Científica Essencial, florestas tropicais úmidas nas Américas (**Figura 10**).

Aqui, apresentamos uma visão geral da estratégia e do projeto do estudo, descritos em detalhes na Seção 6. Vamos nos concentrar nas campanhas de paisagem do PANGEA e nas atividades de medição no início e no final das estações secas. No início da estação seca, as medições capturarão a dinâmica do sistema em um período de estresse reduzido, imediatamente após a estação chuvosa intensa. Esse período de tempo permite medições coordenadas em várias escalas que não são possíveis durante o pico da estação chuvosa, quando a cobertura de nuvens limita o sensoriamento remoto óptico nos trópicos. As campanhas de medição no final da estação seca capturam os momentos em que os sistemas socioecológicos tropicais estão mais estressados em termos de água e temperatura. Embora reconheçamos que os dados coletados somente durante a estação seca correm o risco de influenciar a compreensão das florestas tropicais, dadas as fortes diferenças sazonais na dinâmica e nos processos, incluindo o ciclo de carbono, a hidrodinâmica, as interações entre espécies e as atividades de uso da terra (por exemplo, fogo e desmatamento), a necessidade de obter medições terrestres, aéreas e por satélite simultâneas torna essa decisão pragmática. No final da estação úmida, a maioria dos processos que operam durante o pico da estação úmida ainda estará presente. Por esse motivo, o PANGEA ainda será capaz de captar as diferenças sazonais concentrando-se no início e no fim da estação seca. Para atender aos objetivos científicos e de aplicativos do PANGEA, são apresentadas três estratégias possíveis:

- **Linha de base:** As medições do PANGEA abrangem ~3-6 paisagens tropicais africanas e ~3-6 paisagens tropicais americanas que capturam o fim da estação úmida e o fim da estação seca.
- **Limite:** As medições do PANGEA abrangem 2 paisagens tropicais africanas e 2 paisagens tropicais americanas que capturam o fim da estação úmida e o fim da estação seca.

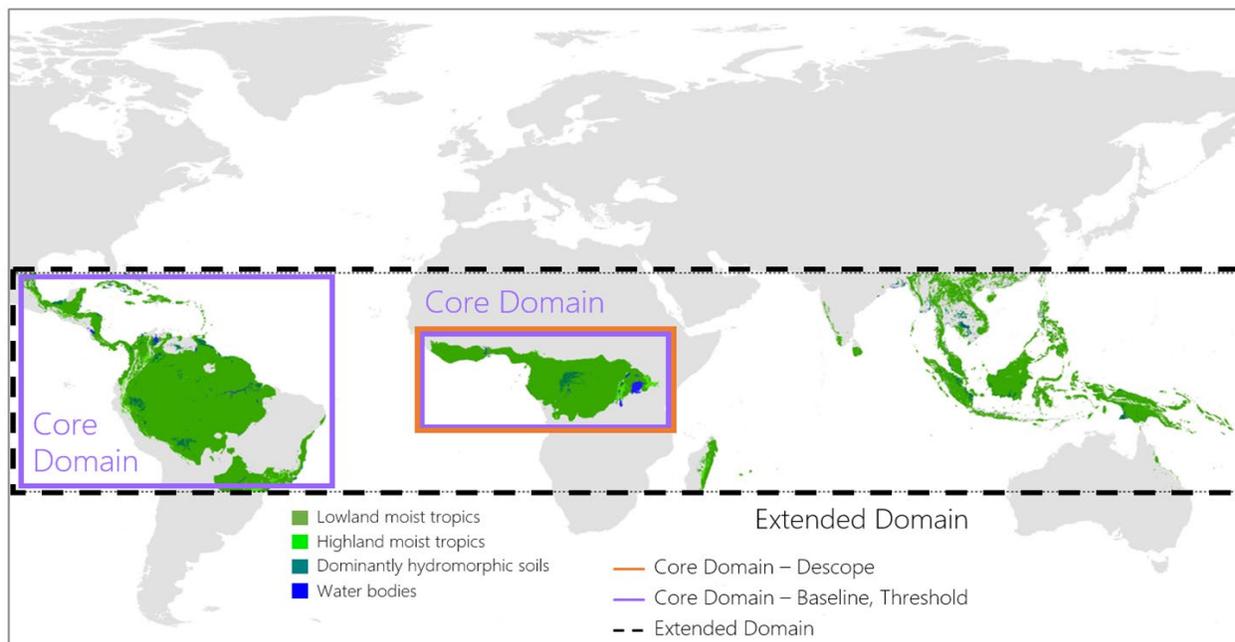


Figura 10. Domínio de estudo do PANGEA. O domínio principal do PANGEA, sob os níveis de Linha de Base e Limiar (linhas roxas sólidas) e Descope (linha laranja sólida) de Medidas Científicas Essenciais, e o domínio estendido (linha preta pontilhada). Os limites foram obtidos das seguintes zonas agroecológicas GAEZv4: trópicos úmidos de terras baixas, trópicos úmidos de terras altas, solos predominantemente hidromórficos e terras com limitações severas de solo/terreno.

- **Descrição:** As medições do PANGEA abrangem duas paisagens tropicais africanas que capturam o fim das estações úmida e seca, que serão comparadas com informações sobre os trópicos americanos coletadas a partir de dados existentes, outros projetos e campanhas liderados por colaboradores, aquisições de dados comerciais e drones implantáveis. Essa opção de descentralização atende parcialmente aos objetivos do PANGEA e, ao mesmo tempo, leva em conta possíveis restrições de financiamento ou incertezas geopolíticas.

As medições de Linha de Base, Limiar e Descope detalhadas na Seção 6.2.1 representam projetos autônomos financiados pela NASA, sem qualquer dependência de fundos que não sejam da NASA ou esforços sinérgicos (**Tabela 1**). As campanhas intensivas dentro dessas estratégias foram concebidas para serem implementadas como módulos autônomos com dependências limitadas, de modo que o cronograma geral e o perfil orçamentário possam ser flexíveis. Dada a urgência e a importância do tópico e o amplo interesse da comunidade, há um grande potencial para aumentar ou até mesmo exceder as contribuições da NASA (consulte a Seção 10.3 para obter mais detalhes). Salvo indicação em contrário, o domínio principal no white paper refere-se àquele definido para o nível de linha de base das medições científicas essenciais.

Tabela 1. Alcanceáveis do PANGEA nas versões Baseline, Threshold e Descope.

REALIZÁVEL	LINHA DE BASE	LIMITE	DESCOPE
VARIABILIDADE ENTRE CONTINENTES	Sim	Sim	Não
VARIABILIDADE NOS CONTINENTES	Sim	Limitada	Limitada
FUNCIONAMENTO DA FLORESTA TROPICAL AO LONGO DE GRADIENTES AMBIENTAIS	Múltiplos gradientes. Comparações intercontinentais.	Gradiente único. Efeitos indiretos por meio de gradientes intercontinentais.	Gradiente único ou co-linear.
CAPACIDADE DE FORNECER DADOS DE CALIBRAÇÃO EM REGIÕES CRÍTICAS	Muito forte	Forte	Moderado
O SUCESSO DEPENDE DE PARCERIAS EXTERNAS E FINANCIAMENTO	Não contingente	Um pouco contingente	Muito contingente
CAPACIDADE DE RESPONDER ÀS PRINCIPAIS PERGUNTAS CIENTÍFICAS DO PANGEA	Totalmente	Principalmente	Parcialmente

A localização dessas áreas primárias de pesquisa dentro do domínio principal será baseada em (1) oportunidades de realizar pesquisas integradas entre temas científicos (Seção 2); (2) ocorrência de variabilidade fundamental com relação à dinâmica biótica, abiótica e de perturbação (**Figura 11**); e (3) existência de pesquisas em andamento ou planejadas financiadas pela NASA, bem como relações e atividades em andamento conduzidas por colaboradores e instituições locais e internacionais. Durante o estudo de escopo, foi realizada uma análise inicial da variabilidade em todo o domínio estendido para avaliar a heterogeneidade espacial (consulte o **Quadro 1**).

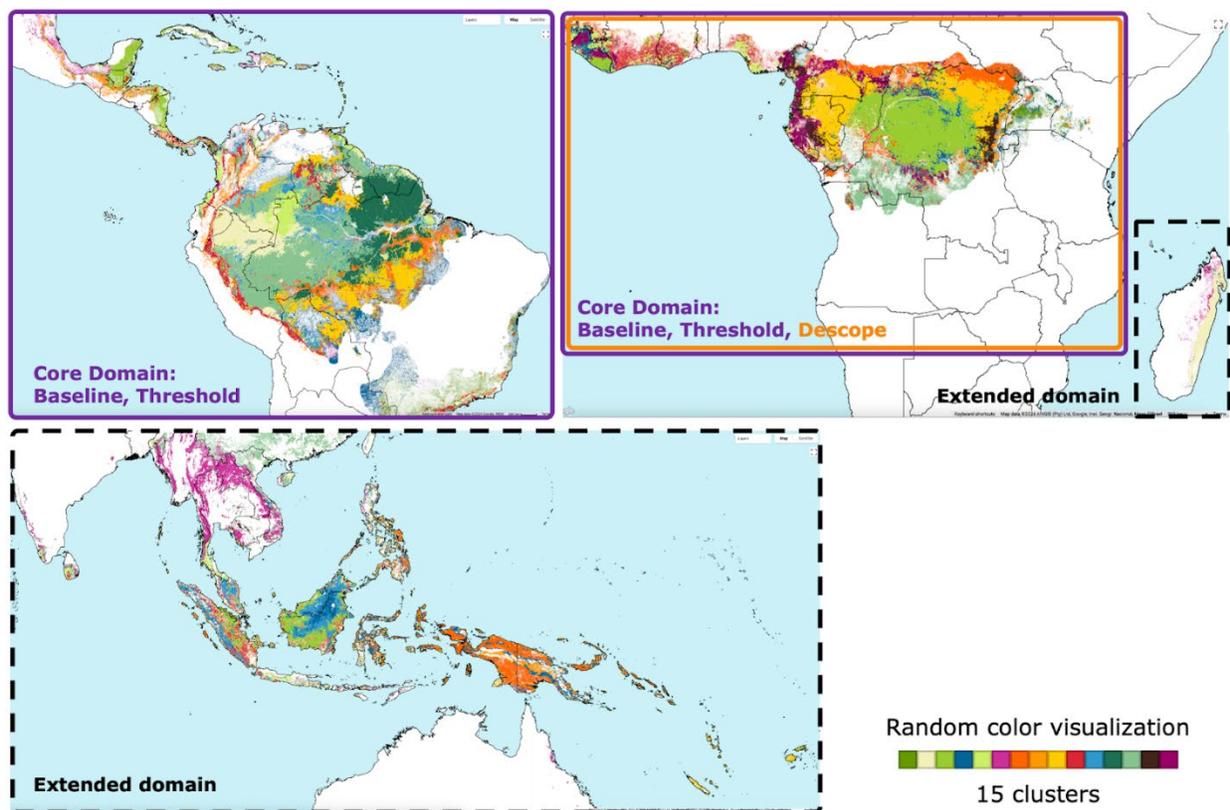


Figura 11. Análise de variabilidade. Resultados de uma análise de variabilidade inicial descrita no Quadro 1. Para cada continente, definimos 15 grupos que descrevem a heterogeneidade da floresta nas paisagens, usando conjuntos de dados de clima, estrutura, composição e função da floresta, biodiversidade, uso da terra, cobertura da terra e histórico de distúrbios. Os grupos de cada continente foram definidos de forma independente e são mostrados em cores aleatórias diferentes. A mesma cor em continentes diferentes não indica correspondência de condições ambientais entre os continentes.

As campanhas aerotransportadas serão um componente importante das aquisições de dados de Linha de Base, Limiar ou Descope em escala de paisagem. Isso incluirá dados de observações de fluxos aéreos para medir os fluxos de CO_2 , CH_4 , calor sensível e calor latente em alta resolução espacial; refletância hiperespectral e lidar de pequeno porte para medir as características das folhas do dossel e a estrutura da vegetação; dados de radar de abertura sintética (SAR) para medir áreas úmidas, sistemas sazonalmente inundados e dinâmica de distúrbios; e lidar de pequeno porte para medir a heterogeneidade vertical e horizontal de alta fidelidade na estrutura do ecossistema e no índice de área da planta. As medições e os conhecimentos baseados em terra são essenciais para (1) validar as observações aéreas e de satélite, (2) descobrir mecanismos ecológicos e (3) avaliar as dependências de escala em ecossistemas tropicais. O PANGEA aborda todas essas três lacunas nas florestas tropicais por meio de parcerias com organizações locais e infraestrutura existente para expandir as observações de campo e avançar na integração de dados e conhecimentos, incluindo dados manuais in situ e TEK (por exemplo, diversidade florística, faunística e filogenética, interações de espécies, dinâmica de distúrbios, atividades de uso da terra); dados automatizados in situ (por exemplo, medições de fluxo de seiva, armadilhas fotográficas, etc.); e dados de campo (por exemplo, medições de fluxo de seiva, armadilhas fotográficas, etc.), medições de fluxo de seiva, armadilhas fotográficas e sensores bioacústicos); fluxo de covariância de Foucault e dados meteorológicos; sensoriamento remoto proximal baseado em torres (por exemplo, SIF, radiação infravermelha térmica,

Quadro 1. Avaliação da heterogeneidade no domínio estendido do PANGEA.

Os ecossistemas de florestas tropicais são heterogêneos, e os padrões de estrutura florestal, composição de espécies e função emergem de interações entre clima, história geológica, solos, topografia, biogeografia, distúrbios naturais, interações bióticas e mudanças no uso e na cobertura da terra. As campanhas de campo do PANGEA serão projetadas para capturar e coletar amostras de florestas que abrangem várias paisagens heterogêneas. Para orientar a seleção de paisagens, a equipe do PANGEA realizou uma análise de agrupamento de ecossistemas de florestas tropicais que levou em conta vários fatores de heterogeneidade (Figura 11). This analysis was based on (1) forest structure from live biomass and net carbon fluxes (Harris et al., 2021) and canopy height (Lang et al, 2023); (2) biodiversity metrics from the species richness for non-plant taxa (e.g., IUCN, 2024); (3) fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) (Li e Xiao, 2019) como indicador da produtividade primária bruta (GPP); (4) temperatura média anual e precipitação total do ERA5 (Hersbach et al, 2020) e déficit hídrico climático de longo prazo (Chave et al., 2014); (5) nitrogênio do solo e teor de argila do SoilGrids2.0 (Poggio et al., 2021); (6) informações topográficas da altura acima da drenagem mais próxima (Donchyts et al., 2016); e (7) um conjunto de dados de modificação humana global (assentamentos, agricultura, transporte, mineração, energia e infraestrutura) (Kennedy et al., 2019). Para garantir que as paisagens fossem consistentes com a história evolutiva, cada continente foi analisado separadamente, resultando em 15 grupos exclusivos para cada região (Américas tropicais, África e Australásia). Essa avaliação inicial não levou em conta a incerteza nos conjuntos de dados e não procurou identificar o número mais parcimonioso de grupos. O PANGEA refinará essa abordagem durante a fase de Definição Científica e combinará esses resultados com a lista de paisagens candidatas (Seção 6.2.2), as regiões que dominam o modelo e a incerteza da síntese de dados (Seção 6.3.1) e a avaliação da viabilidade técnica (Seção 10) para definir as paisagens prioritárias no Plano de Experimento Conciso (Seção 10.5).

VOD e câmeras fenológicas [PhenoCams]); e sensoriamento remoto proximal baseado em drones. Um conjunto de modelos será desenvolvido a partir dos dados e das informações coletadas, bem como de produtos de síntese derivados dos conjuntos de dados adquiridos, que serão usados para inicializar, fornecer condições de limite e modelos baseados em processos de referência (Seção 6.3). O sensoriamento remoto e as medições terrestres do PANGEA para a integração de dados e modelos ajudarão a generalizar os recursos de mapeamento nos trópicos e a modelar os fluxos de carbono, água e energia e suas relações com a biodiversidade para examinar a estabilidade das florestas tropicais sob projeções climáticas futuras.

1.6 Ciências da Terra em Ação

O Sistema Terrestre, com seus sistemas geofísicos, biológicos e sociais interconectados, está passando por um momento particularmente único em sua história. Devemos aproveitar a oportunidade para nos beneficiarmos dos incríveis avanços nas ferramentas modernas, na capacidade de computação (incluindo IA) e nas infraestruturas de pesquisa. Esses avanços ajudarão as pessoas a tomar medidas decisivas para conservar as florestas e a biodiversidade, mitigar e adaptar-se às mudanças climáticas e de uso da terra e melhorar a segurança alimentar e hídrica e a saúde humana. A aceleração das taxas de mudança nos trópicos aumenta a urgência de aplicar as percepções das fronteiras das Ciências da Terra da NASA. Desde o início do programa Earth Science Enterprise Applications em 2001 (Plano Estratégico ESE) até o lançamento da estratégia Earth Science to Action

em 2024 (St Germain, 2024 - [Plano Estratégico ES2A](#)), a NASA inovou uma abordagem de sistemas para facilitar a coleta de observações e previsões da Terra em ferramentas de apoio à decisão e ao gerenciamento para diversos usuários e colaboradores, a fim de promover suas iniciativas locais que fornecem serviços essenciais à sociedade. O Decadal Survey de 2017 nos orienta a "buscar objetivos cada vez mais ambiciosos e soluções inovadoras que aprimorem e acelerem o valor da ciência/aplicações das observações e análises da Terra baseadas no espaço para a nação e para o mundo de uma forma que proporcione grande valor" (Decadal Survey, 2017).

O PANGEA se baseará nos investimentos estratégicos e nas colaborações internacionais para preencher a lacuna entre os rápidos avanços em ciência e tecnologia e a capacidade da sociedade de aproveitá-los para um mundo mais resiliente.

As contribuições do PANGEA para o Earth Science to Action (ES2A) para avançar e integrar o conhecimento das ciências da Terra para capacitar a humanidade a criar um mundo mais resiliente são descritas em detalhes na Seção 9. Em resumo, o PANGEA apóia a estratégia ES2A da NASA ao

- *Investigar os riscos de ultrapassar limites críticos e o potencial de impactos ambientais e sociais em cascata.*
- *Apoio aos esforços para aumentar a resiliência da Terra por meio da avaliação de riscos e contingências e do desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação para responder às mudanças globais.*
- *Desenvolver ferramentas, modelos e sistemas de avaliação eficientes e interativos de ponta a ponta com latências, escalas temporais e espaciais apropriadas e quantificação de incertezas para possibilitar ações baseadas na ciência para comunidades, formuladores de políticas e tomadores de medidas.*

2 Temas científicos do PANGEA

Devido à complexidade inerente dos ecossistemas terrestres tropicais e seus feedbacks com o sistema terrestre, o PANGEA adota uma abordagem integrada e transdisciplinar em cinco temas científicos apresentados na Seção 1.1: Ciclos biogeoquímicos, biodiversidade, interações e feedbacks climáticos, sistemas socioecológicos e dinâmica de distúrbios. A compreensão de padrões e processos e a restrição da incerteza das projeções futuras exigem conhecimentos especializados diversos e colaboração coordenada. O PANGEA une disciplinas e formas de conhecimento para coproduzir ciência que abordará lacunas de conhecimento específicas e apoiará aplicações urgentemente necessárias.

Nesta seção, analisamos o estado atual da ciência por área temática. Na Seção 3, apresentamos as questões científicas integradas do PANGEA em resposta às lacunas de conhecimento relacionadas a padrões, processos e projeções futuras nos temas científicos. A Seção 4 descreve como a abordagem dessas questões produzirá grandes avanços científicos. (Consulte o Apêndice G para ver os tópicos além do escopo do PANGEA).

2.1 Ciclos biogeoquímicos

Esse Tema Científico do PANGEA investigará os padrões de variabilidade espacial e temporal nos estoques e fluxos de carbono, incluindo interações com outros ciclos biogeoquímicos, bem como os processos que controlam mudanças heterogêneas, fornecendo informações que melhorarão as projeções futuras.

Troca líquida de dióxido de carbono na biosfera tropical: O dióxido de carbono atmosférico (CO_2) é um gás de efeito estufa (GHG) que tem um grande impacto no sistema climático global. A biosfera terrestre é um grande sumidouro de CO_2 atmosférico com uma troca líquida da biosfera (NBE) global atual estimada em $3,3 \text{ Pg yr}^{-1}$, compensando ~30% do CO_2 emitido por combustíveis fósseis anualmente (Friedlingstein et al., 2023). O NBE refere-se ao equilíbrio total de CO_2 trocado entre um ecossistema e a atmosfera. Os ecossistemas terrestres tropicais contribuem com até $0,6 \pm 0,4 \text{ PgC por ano}^{-1}$ desse sumidouro (Friedlingstein et al., 2023) e contribuem fortemente para a variabilidade interanual do CO_2 atmosférico global (Friedlingstein et al., 2023). Nas últimas três décadas, o desmatamento tropical anulou cerca de dois terços dos benefícios derivados do sumidouro florestal global ($2,2 \pm 0,5 \text{ Pg C yr}^{-1}$, 1990-2019; Pan et al., 2024). As diferenças na eficácia do sumidouro de carbono da floresta tropical dentro e entre os continentes são evidentes. Pesquisas anteriores indicaram que, de 2001 a 2019, a região amazônica ($5,14$ milhões de km^2) foi um fraco sumidouro líquido de carbono ($-0,03 \text{ Pg C yr}^{-1}$), com absorção bruta ($-0,4 \text{ Pg C yr}^{-1}$) e emissões brutas ($0,3 \text{ Pg C yr}^{-1}$). Isso é quase uma ordem de magnitude maior do que o sumidouro líquido. A biomassa viva da Amazônia brasileira sozinha foi uma fonte líquida de carbono ($0,06 \text{ Pg C yr}^{-1}$; Harris et al., 2021). Em contraste, a menor bacia africana do Congo ($2,98$ milhões de km^2) foi um sumidouro de carbono consideravelmente mais forte ($-0,17 \text{ Pg C ano}^{-1}$) do que as florestas amazônicas, apesar de ter taxas de absorção bruta semelhantes ($-0,3 \text{ Pg C ano}^{-1}$). A magnitude das emissões brutas na Bacia do Congo ($0,14 \text{ Pg C yr}^{-1}$) foi cerca de metade das emissões na Amazônia (Harris et al., 2021).

Entender os mecanismos que impulsionam as diferenças nos fluxos de carbono nas regiões de florestas tropicais para quantificar a distribuição espaço-temporal dos fluxos de carbono e sua função nos ciclos globais de carbono é uma prioridade de pesquisa.

Metano: o metano atmosférico (CH_4) é 25 vezes mais potente como GEE do que o CO_2 e contribui com cerca de 30% do aumento da força radiativa das emissões antropogênicas (Masson-Delmotte et al., 2021). Os trópicos contribuem com aproximadamente 65% do total de emissões globais (antropogênicas + naturais) de CH_4 para a atmosfera ($364 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$) (Saunois et al., 2024). Cerca de 40% do total de emissões de CH_4 dos trópicos são provenientes de fontes de ecossistemas de zonas úmidas, planícies aluviais e interiores de água doce ($151 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$), representando aproximadamente 20% do orçamento global total de CH_4 e são responsáveis pela variabilidade interanual na taxa de crescimento global de CH_4 atmosférico (Feng et al., 2022; Saunois et al., 2024). As taxas de crescimento recentes de CH_4 na atmosfera aumentaram de forma inconsistente com nosso entendimento atual das fontes e sumidouros globais de CH_4 (Turner et al., 2019). O PANGEA explorará o ciclo do CH_4 nos trópicos para desenvolver modelos e entendimentos aprimorados que contribuam para as opções de gerenciamento.

Medições de CO_2 e CH_4 derivadas de satélite: A troca líquida da biosfera (NBE) sobre a América do Sul tropical demonstrou uma recuperação de carbono mais lenta do que o esperado após o El Niño de 2015/2016, possivelmente devido ao aumento da aridez e dos déficits hídricos (Liu et al., 2024a). Os sinais a partir de 2009 indicam um sumidouro de carbono persistente na bacia do Congo que

contrasta com grandes fontes de emissões nas partes ocidental e oriental da África tropical (Palmer et al., 2019). Dado o impacto global do aumento dos GEEs e as incertezas das medições recentes, o PANGEA usará sensores avançados e as medições aprimoradas de CO₂ (XCO₂) e CH₄ (XCH₄) integradas à coluna derivada de satélite usadas em modelos atmosféricos inversos para restringir os orçamentos tropicais de CO₂ e CH₄ (por exemplo, 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). O recente projeto de intercomparação de modelos (MIP) da OCO-2, baseado em 14 modelos, mostrou fontes líquidas de carbono no nordeste da Amazônia e no norte da África tropical, em contraste com sumidouros líquidos de carbono no oeste da Amazônia e na bacia do Congo (Byrne et al., 2023). Emissões de CH₄ de terras úmidas tropicais⁴ estimadas usando recuperações de satélite de XCH₄ de GOSAT e TROPOMI (por exemplo, Parker et al., 2018; Ma et al., 2021; Feng et al., 2022; Yu et al., 2023) sugerem que as emissões de áreas úmidas e aquáticas tropicais foram subestimadas em comparação com os inventários de CH₄ baseados em terra (Yu et al., 2023), embora a prevalência de cobertura de nuvens iniba as recuperações de satélite (Ganesan et al., 2019; Melack et al., 2022). Com o rápido avanço dos recursos de detecção de emissões de fontes pontuais de metano usando dados hiperespectrais agora disponíveis (Hulley et al., 2016; Růžička et al., 2023), o PANGEA investigará a capacidade de detectar emissões naturais de metano usando esses ou outros sensores de maior fidelidade.

Necessidades de validação: Os resultados de inversão do CO₂ baseados em satélite são inconsistentes nos trópicos. Por exemplo, os resultados da inversão atmosférica do GOSAT e do OCO-2 mostraram consistentemente uma fonte de carbono significativa no norte da África tropical (Palmer et al., 2019), impulsionada por liberações de carbono durante a estação seca, quando esses satélites têm uma cobertura mais consistente da região sem nuvens. Por outro lado, um estudo recente combinando quatro instâncias de medições de CO₂ de aeronaves com inversões baseadas em satélite sugeriu que o norte da África tropical está próximo da neutralidade de carbono (Gaubert et al., 2023). Essas descobertas conflitantes ressaltam a necessidade urgente de pesquisas adicionais para resolver essas discrepâncias.

Novas percepções dos satélites: As observações dos satélites OCO-2/3 e GOSAT forneceram novos insights sobre os ciclos sazonais e a variabilidade interanual do ciclo de carbono tropical (Lei et al., 2024; Philip et al., 2022; Liu et al., 2017; 2024; Wang et al., 2023b). É interessante notar que o ciclo sazonal do NBE nos trópicos, conforme inferido pela OCO-2, apresenta uma amplitude muito maior do que a simulada por modelos biogeoquímicos de última geração. Esse resultado sugere que a biosfera terrestre tropical responde às variações climáticas sazonais de forma mais dinâmica do que se entendia anteriormente (Lei et al., 2024; Philip et al., 2020). As observações por satélite também melhoraram muito a compreensão em nível de processo da resposta do ciclo de carbono tropical à variabilidade climática interanual (Liu et al., 2017; 2024; Wang et al., 2023b). Por exemplo, Wang et al. (2023b) mostraram que a variabilidade no armazenamento total de água impulsionou a heterogeneidade espacial da resposta do ciclo de carbono da Amazônia à seca de 2015-2016, enquanto a temperatura desempenhou um papel mais importante na influência da variabilidade do fluxo de carbono em toda a região tropical. Um estudo publicado recentemente (Stinecipher et al., 2022) mostrou que as observações de satélite do sulfeto de carbonila (COS) fornecem uma restrição à GPP regional da Amazônia consistente com outras medidas, sugerindo que a quantificação refinada dos fluxos desse gás nas escalas local e regional pode melhorar as estimativas da GPP (Berry et al., 2013).

Carbono na biomassa vegetal viva: As florestas tropicais armazenam quase 50% do total da biomassa vegetal acima do solo nos ecossistemas terrestres (Santoro et al., 2021). A quantidade e o processamento de carbono na biomassa são determinados pela produtividade primária líquida, que equilibra a absorção de CO₂ e sua emissão pelas plantas e alguns microrganismos (Bonan 2008). Para entender o impacto das mudanças climáticas e de uso da terra nas florestas tropicais, é essencial quantificar a estrutura e a função das florestas tropicais e as interações entre as plantas e o carbono na atmosfera. A biomassa viva e a produtividade variam enormemente no espaço e no tempo nas florestas tropicais (Sullivan et al., 2020; Xu et al., 2021a; Muller-Landau et al., 2021; Wang et al., 2023a, Sagang et al., 2024a). Regiões com alto índice pluviométrico normalmente abrigam florestas densas e perenes com grandes estoques de carbono e estoques de alta produtividade, enquanto áreas com precipitação sazonal ou mais baixa abrigam florestas parcial ou totalmente decíduas com estoques de carbono e produtividade mais baixos e mais variação sazonal nos fluxos de carbono (Malhi et al., 2002; Bonan 2008; Muller-Landau et al., 2021). A temperatura também afeta o ciclo do carbono florestal, tanto diretamente quanto por meio de interações com a disponibilidade de água (Taylor et al., 2017; Muller-Landau et al., 2021). As diferenças entre os trópicos e dentro das regiões tropicais em termos de geomorfologia, clima, composição de espécies e fenologia geram variações nas taxas de fotossíntese, produtividade lenhosa, respiração, mortalidade de árvores e fluxo de carbono nas florestas tropicais (Sullivan et al., 2020; Muller-Landau et al., 2021; Wang et al., 2023a; Townsend et al., 2008; Quesada et al., 2010). A produtividade primária líquida geralmente aumenta com a fertilidade do solo (Quesada et al., 2012), embora não haja relações consistentes entre a fertilidade do solo e a biomassa viva, provavelmente porque a rotatividade aumenta e o tempo de residência da madeira diminui com a fertilidade do solo (Muller Landau et al., 2021). Infelizmente, os estudos sobre a dinâmica da biomassa e do carbono baseados em medições no solo representam uma fração minúscula da área de floresta tropical, um subconjunto pequeno e tendencioso de paisagens tropicais, o que gera dúvidas sobre a generalização dessas descobertas (Malhi et al., 2014; Marvin et al., 2014; Schimel et al., 2019; Hughes et al., 2021; Chapman et al., 2024). Os regimes de distúrbio também desempenham um papel crucial na formação da dinâmica das florestas tropicais, influenciando a mortalidade das árvores, a renovação da biomassa e o ciclo de carbono, detalhados na Seção 2.5.

Áreas úmidas tropicais: Uma grande contribuição para o ciclo global de carbono são as grandes áreas de florestas tropicais que são áreas úmidas permanente ou sazonalmente inundadas, que incluem turfeiras florestadas, pântanos e planícies de inundação (Aselmann e Crutzen, 1989). Por exemplo, as florestas da planície de inundação do rio Amazonas cobrem até 250.000 km², com a maioria das áreas inundadas seis meses por ano (Richey et al., 2002; Goulding et al., 2003). A planície de inundação amazônica representa a maior fonte de emissão natural de CH₄ nos trópicos e rivaliza com as fontes de CH₄ do Ártico (Pangala et al., 2017). Além da significativa fonte ebullitiva de CH₄ do solo inundado, os troncos das árvores da planície de inundação amazônica contribuem com emissões de CH₄ que são estimadas em 200 vezes mais do que as de florestas úmidas temperadas (Pangala et al., 2017). O número de medições e a extensão da cobertura dos fluxos de CH₄ nos trópicos são extremamente limitados em comparação com os das regiões temperadas e boreais (Johnson et al., 2022; Melack et al., 2022; Stanley et al., 2023). As emissões de CH₄ de áreas úmidas de florestas tropicais são controladas pelo clima, hidrologia, cobertura vegetal, dinâmica de distúrbios e práticas de uso da terra (Parker et al., 2018; Ma et al., 2021). A falta de medições de fluxo de carbono em áreas úmidas resultou em emissões de CH₄ de áreas úmidas tropicais e sistemas de águas interiores mal quantificadas (Ganesan et al., 2019; Rosentreter et al., 2021). Os modelos mecanicistas existentes produziram grandes diferenças nas emissões tropicais de CH₄ (Melton et al., 2013; Bloom et al., 2017)

e não capturam a sazonalidade observada de CH₄ em regiões tropicais dominadas por áreas úmidas florestadas (Melack et al., 2022). Grande parte dessa diferença é causada pela falta de medições em escala fina que detalhem os impulsionadores das emissões de áreas úmidas e aquáticas (Melack et al., 2022) e a diferença de três vezes na cobertura de áreas úmidas e extensões de inundação aplicadas em modelos individuais (Peng et al., 2022).

Turfeiras tropicais: As turfeiras tropicais ricas em orgânicos armazenam as maiores e mais densas reservas de carbono que são irrecuperáveis em escalas de tempo de tomada de decisões humanas (Noon et al., 2021). As turfeiras tropicais armazenam aproximadamente 100 Pg C, mas há grandes incertezas quanto à extensão espacial e aos estoques de carbono associados dessas turfeiras. Por exemplo, os extensos estoques de carbono das turfeiras da Bacia do Congo central e da Bacia de Pastaza-Marañón Foreland na Amazônia peruana foram mapeados recentemente e representam mais de um terço do carbono armazenado em solos de turfa tropical (Dargie et al., 2017; Crezee et al., 2022; Lahteenoja et al., 2012). É provável que ainda haja áreas substanciais de turfeiras não documentadas a serem avaliadas (Hastie et al., 2024). A mudança no uso da terra, por meio de desmatamento ou drenagem, e as mudanças climáticas ameaçam a capacidade de sumidouro de carbono das turfeiras tropicais (Page et al., 2022; Wang et al., 2018). No sudeste da Ásia, a extensa drenagem de turfeiras transformou as turfeiras dessa região em uma fonte de CO₂ equivalente às emissões regionais de combustíveis fósseis (Hoyt et al., 2020). Os incêndios cada vez mais extensos e intensos em turfeiras, especialmente na Ásia equatorial e durante os anos de El Niño, também se tornaram uma importante fonte de carbono, outras emissões de gases traço e material particulado para a atmosfera (Page et al., 2009; Yokelson et al., 2022). Como os distúrbios antropogênicos continuam a ameaçar as turfeiras tropicais (Hastie et al., 2022; Page et al., 2022), é necessário um melhor entendimento da distribuição, da densidade do estoque de carbono e das emissões das turfeiras tropicais (Roucoux et al., 2017; Deshmukh et al., 2021).

Ciclo de nutrientes: A projeção da produtividade futura das florestas tropicais depende da compreensão das interações entre a disponibilidade de nutrientes nos solos, a composição funcional das plantas e o impacto do aumento da temperatura, das concentrações de CO₂ e dos eventos extremos. Espera-se que a disponibilidade normalmente baixa de nutrientes no solo de solos tropicais altamente intemperizados restrinja a fertilização com CO₂, já que mais nutrientes são acumulados nos tecidos das plantas (Fleischer e Terrer, 2022). O fósforo provavelmente limitará o potencial de respostas de maior taxa de crescimento florestal ao aumento do CO₂ em cerca de metade (Fleischer et al., 2019; Braghieri et al., 2022). Embora se presuma que o fósforo seja o nutriente mais limitante em florestas tropicais de terras baixas (por exemplo, Cunha et al., 2022), observações recentes revelam a heterogeneidade da limitação de nutrientes em florestas tropicais, incluindo limitação e co-limitação por nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio (Davidson et al., 2004, Wright et al., 2011, Manu et al., 2022). O potássio desempenha uma função essencial na regulação das respostas das plantas à seca (Manu et al., 2024). A mudança no uso da terra pode induzir ainda mais a limitação de nutrientes ao deslocar grandes quantidades de nutrientes (Bauters et al., 2022; 2018; 2021, Kauffman et al., 1995), levando à redistribuição e às perdas locais de nutrientes. O sensoriamento remoto oferece oportunidades para capturar o impacto dos suprimentos de nutrientes disponíveis e as perdas de nutrientes de eventos de perturbação por meio de observações de variações na química foliar, características funcionais e estrutura do dossel em grandes escalas (Townsend et al., 2008, Chadwick e Asner 2016b; 2018, Martins et al., 2018).

2.2 Biodiversidade

Esse tema científico do PANGEA investigará como a biodiversidade tropical varia espacial e temporalmente em escalas local, regional e continental, como a biodiversidade molda a função do ecossistema e responde às mudanças climáticas e antropogênicas, e como isso contribui para a heterogeneidade na resiliência da floresta e retroalimenta o clima global e os sistemas socioecológicos.

Biodiversidade tropical: A biodiversidade é a variabilidade entre todos os organismos vivos e ecossistemas, incluindo a diversidade taxonômica, filogenética, funcional e genética dentro e entre as espécies, bem como dentro e entre os locais. As florestas tropicais são os biomas mais biodiversos da Terra de acordo com todas essas medidas e abrigam mais da metade das espécies descritas na Terra (Lewis et al., 2015; Barlow et al., 2018; Dinerstein et al., 2017; Pillay et al., 2022). O alto número total de espécies encontradas em florestas tropicais (alta diversidade gama) reflete tanto o número extraordinário de espécies dentro dos locais (diversidade alfa) quanto a rotatividade substancial de espécies entre os locais (diversidade beta) (Condit et al., 2002; Basset et al., 2012; Jenkins et al., 2013; Slik et al., 2015). Em pequenas escalas, a variação da composição entre locais na biodiversidade de plantas reflete amplamente a filtragem ambiental e a estocasticidade (Condit et al., 2002; Fyllas et al., 2009; Condit et al., 2013; Asner et al., 2014a; Chadwick e Asner 2018). As histórias evolutivas divergentes de diferentes continentes tropicais resultaram em assembleias de espécies e composições filogenéticas muito diferentes (Slik et al., 2018; **Figura 12**). A alta diversidade taxonômica e filogenética das florestas tropicais é acompanhada por uma alta diversidade funcional, com espécies que apresentam uma ampla gama de estratégias de história de vida, características funcionais e respostas ambientais (Fyllas et al., 2009; Condit et al., 2013; Slot e Winter 2017; Rüger et al., 2018; Homeier et al., 2021; Bialic-Murphy et al., 2024).

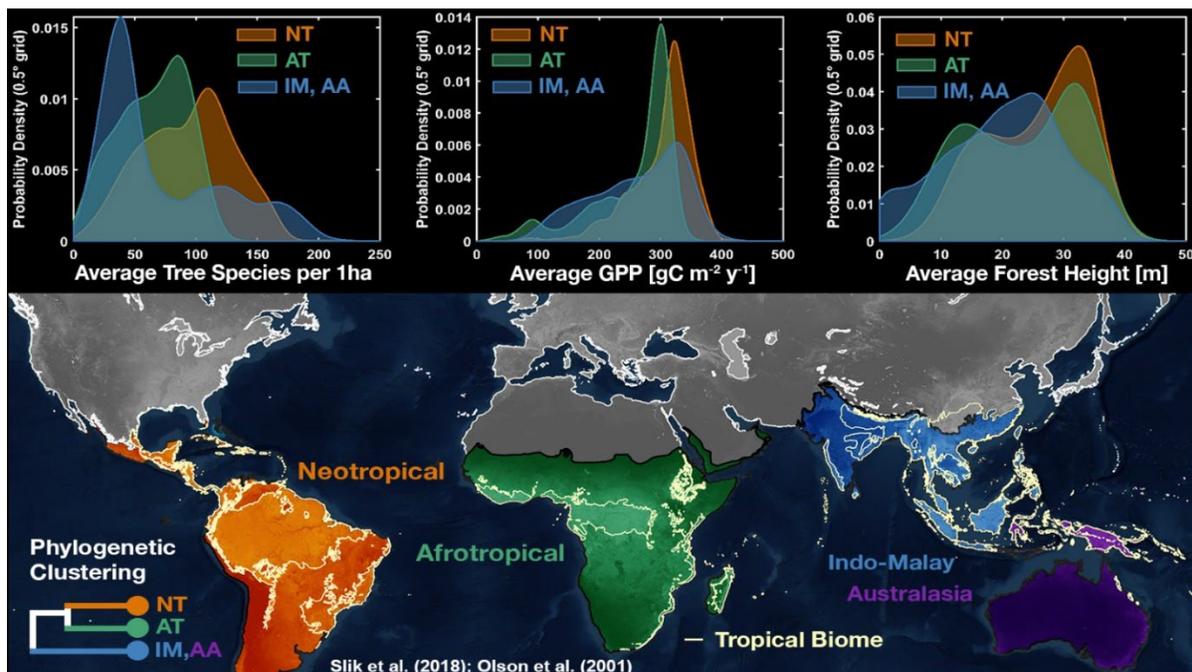


Figura 12. As florestas tropicais variam muito em estrutura (altura), função (GPP) e diversidade dentro e entre as principais regiões florísticas (cores mapeadas), moldando as respostas às mudanças climáticas e de uso da terra. O brilho de cada cor indica o GPP mapeado. Fonte: Cavender-Bares et al. (2022).

Diversidade funcional, estrutural e de espécies: A biodiversidade tropical é extremamente importante para o funcionamento dos ecossistemas tropicais e seus feedbacks para o sistema terrestre (Cardinale et al., 2012; Dirzo et al., 2014; Sakschewski et al., 2016; Berzaghi et al., 2018; Schmitt et al., 2020). As espécies presentes em uma área, bem como suas características e abundâncias, afetam a estrutura, a função, a resiliência e as interações da floresta com o clima local e global e os sistemas socioecológicos (por exemplo, Dirzo et al., 2014; Del-Claro e Dirzo 2021). A grande variação na estrutura e na função do ecossistema entre as florestas tropicais está intimamente ligada à variação na biodiversidade, refletindo não apenas as influências dos fatores ambientais abióticos sobre a biodiversidade, a estrutura e a função, mas também suas interações complexas (Muller-Landau et al., 2021). A espécie e a composição funcional das plantas lenhosas, que compreendem a maior parte da biomassa acima do solo, são particularmente importantes na formação da estrutura e da função da floresta,

que, por sua vez, afeta os microclimas, o habitat e os recursos alimentares para animais e micróbios. A compreensão das interações entre a diversidade funcional, estrutural e de espécies e a dinâmica do ciclo de carbono é fundamental, dadas as incertezas quanto à sobrevivência ou não das florestas tropicais e à manutenção de um sumidouro de carbono ao longo do século XXI (Arora et al., 2020; Brienen et al., 2015; Hubau et al., 2020; Sabatini et al., 2019). A alta biodiversidade funcional gera maior estabilidade e resiliência do ecossistema, o que pode ajudar a mitigar os efeitos negativos das mudanças climáticas (Sakschewski et al., 2016; Longo et al., 2018; Schmitt et al., 2020). A mudança dos regimes climáticos pode reduzir a biodiversidade, o que pode retroalimentar o clima por meio de um menor sequestro de carbono (Thomas et al., 2004; Cavanaugh et al., 2014). Em uma revisão de 258 estudos de comunidades reunidas naturalmente, van der Plas (2019) constatou que, embora a

maioria dos estudos se concentrasse nos efeitos da diversidade taxonômica, as métricas de diversidade funcional eram, em geral, preditores mais fortes do funcionamento do ecossistema. Embora os trópicos abriguem uma imensa diversidade de espécies botânicas, a abundância da maioria das espécies é baixa. Dados de parcelas de inventário florestal revelam que apenas 2% das espécies nas Américas (174 espécies), na África (77 espécies) e no Sudeste Asiático (172 espécies) são responsáveis por 50% das árvores tropicais nesses continentes (Cooper et al., 2024). Caracterizar a diversidade funcional dessas espécies hiperdominantes e suas interações com outros táxons é viável e está dentro do escopo do PANGAEA.

Variabilidade e trade-offs de características de plantas lenhosas: As distribuições de características funcionais de plantas lenhosas são uma manifestação importante da biodiversidade tropical que afeta a estrutura e a função da floresta (Li e Prentice, 2024). As co-variações importantes entre as características incluem a estatura, os eixos rápido-lento do histórico de vida da planta e as estratégias de auto-sustentação versus escalada para alcançar o dossel. A estatura adulta varia de pequenos arbustos a árvores emergentes gigantes acima do dossel principal (Rüger et al., 2018; Maynard et al., 2022). A estrutura vertical da floresta varia de acordo com a função do ecossistema, mesmo quando as métricas integradas verticalmente, como o índice de área foliar (LAI), não variam (**Figura 13**) (Ordway et al., 2022). O eixo rápido-lento refere-se a espécies de plantas com rápida aquisição e processamento de recursos (particularmente em termos de eficiência no uso de nutrientes), crescimento rápido, alta necessidade de recursos, altas taxas de mortalidade e baixa tolerância à sombra, em contraste com espécies

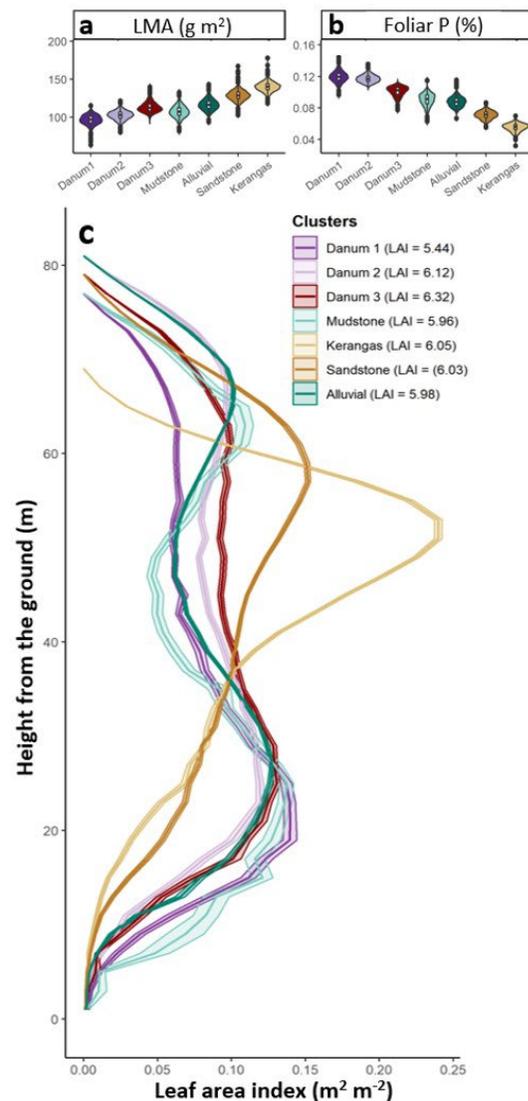


Figura 13. Variação na massa foliar por área (LMA), fósforo foliar (P) e índice de área foliar vertical (LAI) em sete tipos de florestas funcionalmente distintas mapeadas usando dados VSWIR e lidar aéreo em florestas tropicais da Malásia (Ordway et al., 2022).

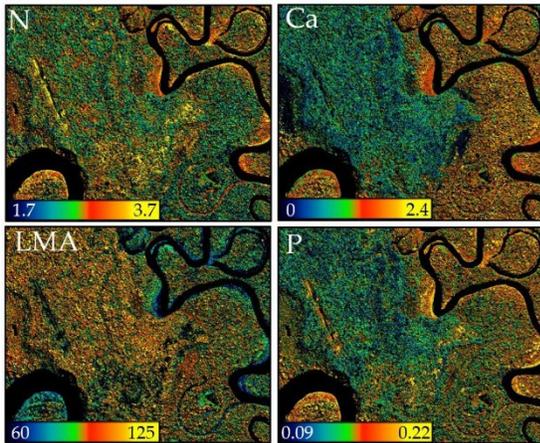


Figura 14. Variação em escala de paisagem em nitrogênio (N), cálcio (Ca), massa foliar por área (LMA) e fósforo (P) na Amazônia peruana. Exemplo de mapas de características criados a partir de dados de espectroscopia de imagem VSWIR de (Chadwick & Asner, 2016). Não existem dados desse tipo para a África Central.

com aquisição e processamento lentos de recursos, crescimento lento, baixa necessidade de recursos, baixas taxas de mortalidade e alta tolerância à sombra (Reich 2014; Rüger et al., 2018). Assim, a variação na composição funcional entre os ecossistemas está relacionada ao status sucessional da floresta, à produtividade da madeira e ao tempo de residência da madeira. Pesquisas anteriores mostraram que as distribuições de características associadas à madeira, às folhas e à reprodução podem ser quase ortogonais entre as espécies de florestas tropicais (Baraloto et al., 2010; Fortunel et al., 2012). No entanto, o eixo rápido-lento ainda abrange a variação nas características das folhas, como a massa foliar por área (LMA) e o conteúdo de nutrientes das folhas (por exemplo, nitrogênio, fósforo e cálcio). O conteúdo de nutrientes da folha e a LMA podem ser capturados com sensoriamento remoto hiperespectral, permitindo a quantificação remota dessa dimensão da composição funcional da planta (**Figura 14**) (Asner et al., 2017; Chadwick e

Asner 2016a). Trabalhos recentes também exploraram a diversidade funcional e as tendências de redundância em florestas tropicais usando imagens multiespectrais (Aguirre-Gutiérrez et al., 2022).

Cipós, palmeiras e bambus: Embora grande parte da pesquisa em florestas tropicais se concentre em árvores, outras formas de vida vegetal, como cipós, palmeiras e bambus, têm um impacto significativo sobre o funcionamento do ecossistema, a sucessão e a resposta a distúrbios. Por exemplo, as lianas (trepadeiras lenhosas) são parasitas estruturais que reduzem o crescimento das árvores e aumentam a mortalidade por competição, alterando assim a estrutura e a função da floresta e os estoques de carbono (van der Heijden et al., 2013; Muller-Landau e Pacala 2020; Estrada-Villegas et al., 2022). A abundância de lianas varia muito entre as florestas tropicais em relação ao clima, ao histórico de distúrbios e a outros fatores (Dewalt et al., 2015), e está aumentando em média (Phillips et al., 2002; Schnitzer e Bongers 2011, Rueda-Trujillo et al., 2024). Pesquisas anteriores sugerem que as lianas podem ser vulneráveis a secas (Nepstad et al., 2007; Meunier et al., 2021) e são favorecidas pelo aumento das taxas de perturbação (Schnitzer e Bongers 2011, Schnitzer et al., 2021), enquanto o aumento do crescimento das árvores tem sido associado ao aumento das concentrações atmosféricas de CO₂ (Phillips et al., 2009, Brienen et al., 2015). As palmeiras são um clado abundante em florestas tropicais úmidas (ter Steege et al., 2013), e várias espécies são cultural e economicamente relevantes (Laureto e Cianciaruso 2017). A distribuição das palmeiras nas florestas tropicais é altamente dependente do clima e das condições edáficas (Emilio et al., 2014; Muscarella et al., 2020). A alta resistência das palmeiras a danos causados pelo vento em tempestades tropicais afeta a recuperação pós-distúrbio das florestas (Uriarte et al., 2019; Zhang et al., 2022). As diferenças intercontinentais na abundância de palmeiras são marcantes, com palmeiras semelhantes a árvores sendo onipresentes nas Américas, enquanto são raras em comparação com palmeiras de sub-bosque e trepadeiras na África (Muscarella et al., 2020). Os bambus são gramíneas altas que ocorrem em uma ampla gama de habitats nos trópicos (Fadrique et al., 2020). Suas rápidas taxas de crescimento, combinadas com a

reprodução clonal, permitem que os bambus dominem grandes extensões de terra, o que pode interromper a sucessão florestal e diminuir significativamente o acúmulo de carbono na floresta (Griscom e Ashton 2003; Lima et al., 2012), e eles também podem se tornar invasivos onde são introduzidos (Montti et al., 2014). Os bambus são amplamente colhidos em florestas tropicais por motivos econômicos, o que pode afetar a fauna local que depende das florestas de bambu para se alimentar (Sheil et al., 2012). Lianas, palmeiras e bambus diferem das árvores em suas características foliares e na arquitetura da planta, tornando possível quantificar sua abundância com sensoriamento remoto multiespectral, hiperespectral e lidar (de Carvalho et al., 2013; Dalagnol et al., 2022; van der Heijden et al., 2022).

Fenologia da folha: As plantas tropicais apresentam diversas estratégias de fenologia foliar, de perenes a decíduas, com variações na duração, no momento, na integridade da decadência e se a decadência é obrigatória ou facultativa (Borchert, 1994; Eamus, 1999; Kushwaha e Singh, 2005; Williams et al., 2008; Kearsley et al., 2024). A alta demanda de carbono necessária para a descarga de novas folhas significa que a maioria das espécies decíduas de seca nos trópicos tem folhas mais finas para reduzir os custos de construção e alta demanda de nutrientes para aumentar a capacidade fotossintética em estações de crescimento mais curtas (Eamus e Prior, 2001; Oliveira et al., 2021a). A vida útil das folhas e o momento sazonal da produção de folhas também são fatores importantes em espécies perenes e brevi-decíduas, com implicações para a variação sazonal na qualidade das folhas e na capacidade fotossintética (Wu et al., 2016; Lopes et al., 2016; Wu et al., 2017a,b; Albert et al., 2018). A abundância relativa de diferentes estratégias fenológicas varia sistematicamente entre as florestas tropicais em relação ao clima, à geomorfologia, aos solos e a outros fatores (Condit et al., 2000) e contribui de forma importante para a forte variação em nível de estande na fenologia foliar e reprodutiva entre os locais (Bohman, 2010; Guan et al., 2015; Fisher et al., 2020; Fadrique et al., 2021; Yang et al., 2021b). A fenologia das folhas também varia substancialmente entre os anos dentro dos locais, contribuindo para a variação interanual na função florestal (Pau et al., 2010; Detto et al., 2018; Lamjiak et al., 2021). Os fatores climáticos da fenologia das folhas incluem disponibilidade de água e luz. Muitas árvores, espécies e povoamentos tropicais ficam mais verdes nas épocas do ano em que recebem mais luz (menos nuvens), mesmo quando mais luz é acompanhada de condições mais secas (Wright e van Schaik, 1994; Lopes et al., 2016; Wagner et al., 2017; Li et al., 2021). Mudanças de longo prazo no clima, especialmente em áreas onde as estações secas estão se prolongando, podem aumentar a vantagem competitiva e a abundância de espécies decíduas de seca (Vico et al., 2017; Aguirre-Gutiérrez, 2019).

Animais e micróbios: Os animais e os micróbios também impulsionam a função do ecossistema e são influenciados pelas mudanças ambientais globais de forma consequente. Os animais e os micróbios contribuem para serviços essenciais, como polinização, dispersão de sementes e ciclo de nutrientes, e moldam a biodiversidade das plantas e a estrutura e função da floresta por meio dessas interações mutualísticas. As interações entre plantas e animais também podem ser antagônicas, como por meio de herbivoria e doenças (Dirzo et al., 2014). A megafauna, como os elefantes florestais (*Loxodonta cyclotis*) - encontrados atualmente na África, mas não nas Américas - tem efeitos particularmente importantes sobre a estrutura e a função da floresta devido à pastagem e à perturbação física. Os elefantes também ajudam na redistribuição de nutrientes e na dispersão de sementes grandes, resultando em maior abundância de espécies de árvores com alta densidade de madeira em toda a paisagem (Berzaghi et al., 2018; 2019; Campos-Arceiz e Blake, 2011). Foi demonstrado que as exclusões experimentais de vertebrados aumentam a densidade de plantas do sub-bosque e a abundância de mudas (Beck et al., 2013a; Camargo-Sanabria et al., 2015; Kurten e Carson, 2015). A

grande maioria das espécies de árvores tropicais e aproximadamente metade das espécies de lianas (cipós lenhosos) dependem de vertebrados para a dispersão de sementes, sendo que a maioria das espécies restantes depende do vento (Muller-Landau e Hardesty 2005). Assim, a defaunação das florestas tropicais pela caça e outras atividades humanas ameaça diretamente a regeneração das plantas e pode alterar a composição das espécies vegetais e a dinâmica do ciclo de carbono (Wunderly, 1997; Estrada-Villegas et al., 2023). A defaunação pode, em última análise, levar a uma mudança para estoques de carbono florestal mais baixos (Brodie e Gibbs, 2009; Jansen et al., 2010; Bello et al., 2015; Osturi et al., 2016; Peres et al., 2016). Entre os locais no Panamá, por exemplo, o aumento da defaunação foi associado a mudanças na composição da comunidade de espécies na camada de mudas, incluindo mais espécies dispersas pelo vento e pela água e mais lianas (Wright et al., 2007; Kurten et al., 2015).

2.3 Interações e feedbacks climáticos

Esse tema científico do PANGEA investigará as complexas retroalimentações e interações entre as florestas tropicais e o sistema climático, bem como a forma como as mudanças nesses processos influenciarão a dinâmica futura do sumidouro/fonte de carbono das florestas tropicais.

Interações terra-atmosfera: As interações terra-atmosfera das florestas tropicais modulam o tempo e o clima local e regionalmente. As plantas reciclam a precipitação por meio da evapotranspiração e influenciam o início e o momento das estações chuvosas (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). Por meio da emissão de compostos orgânicos voláteis biogênicos, as plantas afetam a formação de nuvens, o albedo e a disponibilidade de luz para a vegetação (Artaxo et al., 2022). Os dosséis florestais também regulam o albedo, os fluxos de calor latente e sensível e a rugosidade, que impulsionam os feedbacks biofísicos do clima (Bonan, 2008; Chen et al., 2020; Lee et al., 2011). Além disso, os balanços de energia e água dependem da umidade do solo, controlada por raízes, textura do solo e geomorfologia (Fan et al., 2017; Seneviratne et al., 2010; Zhou et al., 2021).

Efeitos do tempo e do clima nas florestas tropicais: Os sistemas convectivos de mesoescala fornecem grande parte da precipitação na África Central e na Amazônia (Andrews et al., 2024; Rehbein et al., 2017; Negron-Juarez et al., 2024). As tempestades, por sua vez, afetam a estrutura da floresta e a mortalidade das árvores por meio do lançamento de vento (por exemplo, Negrón-Juárez et al., 2018; Feng et al., 2023a) e o funcionamento do ecossistema, incluindo processos que influenciam a prevalência de espécies resistentes a tempestades (Uriarte et al., 2019; Liu et al., 2017). As florestas de terras baixas se adaptaram à submersão e ao alagamento, pois a precipitação causa ciclos de inundação (Alsdorf et al., 2016; Hawes e Peres 2016), o que pode diminuir a disponibilidade de oxigênio, reduzir a fotossíntese e diminuir a condutância da água (Parolin et al., 2004; Parolin et al., 2016; Hawes e Peres 2016). As inundações também levam ao aumento da produção de CH₄ por microrganismos. A precipitação também afeta os ciclos de nutrientes por meio da deposição úmida de nutrientes como o nitrogênio (Bauters et al., 2018, 2021), a fotossíntese e a reprodução por meio da cobertura de nuvens e neblina (Philippon et al., 2019; Pohl et al., 2021) e a evapotranspiração por meio da deposição de orvalho (por exemplo, Gerlein-Safdi et al., 2018; Binks et al., 2019).

Fatores determinantes da variabilidade interanual do clima: O clima tropical é diretamente afetado pela variação da temperatura da superfície do mar (SST), que controla o transporte de energia

equatorial cruzada (Cook e Vizy 2015; Zhou et al., 2019) e afeta os padrões de precipitação por meio de mudanças na zona de convergência intertropical (ITCZ; Schneider et al., 2014, Byrne et al., 2018), monções (Cook e Vizy 2019) e sistemas dinâmicos em escala regional (Cook e Vizy 2019; Creese et al., 2019; Montini et al., 2019). Fenômenos como o El Niño-Oscilação Sul (ENSO), a Oscilação Madden-Julian, o Dipolo do Oceano Índico e a Circulação Meridional de Revolvimento do Atlântico contribuem para a variabilidade interanual na convecção tropical (Raghavendra et al., 2020; Dias et al., 2017; Gu e Adler 2018). Diferentes fases desses fenômenos estão fortemente associadas a secas (Marengo et al., 2016; Ndehedehe et al., 2018; Jiménez-Muñoz et al., 2016), estações secas mais longas (Jiang et al., 2019; Staal et al., 2020) e mudanças na estação chuvosa e intensificação de tempestades (Taylor et al., 2018; Rehbein e Ambrizzi, 2023; Balaguru et al., 2018). As respostas às mudanças climáticas variam entre as regiões. As florestas africanas parecem ser menos vulneráveis a secas do que as florestas amazônicas (Tao et al., 2022; Asefi-Najafabady e Saatchi 2013; Saatchi et al., 2012; Bennett et al., 2021), e as florestas tropicais mais úmidas mostram resiliência às mudanças climáticas (Bennett et al., 2023), embora as consequências de condições mais secas ou mais variáveis permaneçam desconhecidas.

Impactos de distúrbios antropogênicos no tempo e no clima: As atividades humanas na forma de desmatamento de florestas, agricultura, pecuária e fogo interagem com as mudanças climáticas para exercer feedbacks significativos sobre os ciclos hidrológicos terrestres (Li et al., 2022; Li et al., 2024). Isso inclui mudanças na superfície, como descarga de rios e inundações (Ndehedehe et al., 2022; Bogning et al., 2022; Oliveira et al., 2021b), bem como mudanças no desenvolvimento convectivo ou nas condições dinâmicas e termodinâmicas da camada limite 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). As alterações nessas dinâmicas atmosféricas levam a mudanças na atividade de tempestades tropicais, que aumentou de 5 a 25% por década no último meio século e parece provável que continue no futuro (Taylor et al., 2018; Raghavendra et al., 2018; Lavigne et al., 2019; Harel e Price, 2020). Paralelamente ao aumento da atividade de tempestades, as florestas tropicais estão passando por estações secas mais longas, maior estresse hídrico atmosférico e secas mais frequentes (Fang et al., 2022; Boiser et al., 2015; Duffy et al., 2015; Trenberth et al., 2014). O desmatamento e a degradação florestal aumentam o aquecimento da superfície do solo devido à diminuição do resfriamento evaporativo (Devaraju et al., 2018; Li et al., 2015), sendo a magnitude desse efeito influenciada pela quantidade de cobertura florestal perdida (Alkama e Cescatti, 2016). Temperaturas mais altas podem, subsequentemente, aumentar a respiração das árvores, o que reduz o NPP e altera a forma como as florestas tropicais fazem o ciclo do carbono (Choury et al., 2022; Das et al., 2023; Liu et al., 2017; Lloyd et al., 2023). O desmatamento e a degradação podem aumentar o fluxo de água e afetar a qualidade da água devido aos fluxos de sedimentos (Levy et al., 2018), bem como aumentar o fluxo de calor sensível e diminuir a evapotranspiração e a infiltração (Costa et al., 2003; Souza-Filho et al., 2016; Longo et al., 2020; de Oliveira et al., 2021; Rangel-Pinagé et al., 2023). A cobertura da terra e a mudança no uso da terra podem afetar os padrões de precipitação, alterando a heterogeneidade da superfície e influenciando os fluxos de umidade e calor a jusante (Mahmood et al., 2014; Snyder, 2010) e os ciclos de nutrientes entre continentes (Li et al., 2021; Barkley et al., 2019). Além disso, a queima de biomassa contribui com aerossóis, afetando a formação e a dinâmica das nuvens (Liu et al., 2020; Zhang et al., 2008; Chaboureau et al., 2022; Tosca et al., 2015).

Transições críticas de florestas tropicais induzidas pelo clima: À medida que novos regimes climáticos estão surgindo, podem ocorrer mudanças nas florestas tropicais para ecossistemas alternativos de dossel aberto (Hirota et al., 2011; Flores et al., 2024). No entanto, a sensibilidade da vegetação difere

entre os continentes tropicais, e interações complexas com outras mudanças, como o aumento do CO₂ atmosférico, podem alterar a resposta da vegetação (Zhang et al., 2015; Bartlett et al., 2019). Por exemplo, as florestas africanas, especialmente as da África Ocidental, são frequentemente expostas a temperaturas mais altas em comparação com as florestas tropicais relativamente mais frias e úmidas do Sudeste Asiático e, portanto, podem estar mais adaptadas ao estresse térmico (Malhi et al., 2013). No entanto, essa adaptação pode ocorrer ao custo de as florestas da África Ocidental operarem mais perto de suas temperaturas críticas ou limiares hidráulicos. Em última análise, exceder os limites climáticos históricos nos trópicos pode levar a mudanças futuras para estados de vegetação alternativos que não suportam os serviços ecossistêmicos das florestas tropicais contemporâneas (Aguirre-Gutiérrez et al., 2020; Flores et al., 2024; Nobre et al., 2016; Scheffer et al., 2001).

Efeitos do feedback clima-biosfera sobre os recursos de água doce: As florestas tropicais de todo o planeta também abrigam uma extensa rede de rios e córregos, que inclui duas das maiores bacias hidrográficas, a Amazônica e a do Congo (Dai e Trenberth, 2002). Entretanto, as mudanças no regime de temperatura e precipitação, juntamente com a expansão do desmatamento e da degradação florestal, estão alterando os ciclos hidrológicos em ambas as regiões. Embora a diminuição da precipitação reduza o suprimento bruto de água doce na parte superior das copas, o desmatamento e a degradação florestal podem aumentar o suprimento de água doce para os rios por meio da combinação de maior precipitação de passagem e menor evapotranspiração (Davidson et al., 2012). No caso da bacia do rio Amazonas, estudos anteriores indicam que o efeito líquido da mudança climática e do desmatamento é espacialmente heterogêneo, com reduções de descarga do rio em sub-bacias com fortes declínios de precipitação ou taxas de desmatamento modestas, e aumentos em áreas fortemente impactadas pelo desmatamento (Coe et al., 2011; Lima et al., 2014; Arias et al., 2018). A mudança dos ciclos hidrológicos nos sistemas de água doce também afeta a extensão e a duração das inundações sazonais nas bacias hidrográficas, o que afeta ainda mais os fluxos de CO₂ e CH₄ (Hamilton, 2010; Alsdorf et al., 2016). Além disso, as mudanças na cobertura florestal têm impactos significativos na qualidade da água, como mudanças na concentração de nitrogênio e fósforo, no pH da água, na disponibilidade de oxigênio e na transparência (Neill et al., 2001; Ríos-Villamizar et al., 2017). Esses efeitos, combinados com mudanças na temperatura devido ao clima e às perdas de cobertura do dossel, podem impactar significativamente os habitats de água doce e as comunidades ribeirinhas de plantas, algas e animais (Lorion e Kennedy, 2009; Castello e Macedo, 2016; Taniwaki et al., 2017; Zeni et al., 2019).

2.4 Sistemas socioecológicos

Esse tema científico do PANGEA investigará as interações e os feedbacks entre os sistemas sociais e ecológicos relacionados à produção e à segurança alimentar, às práticas culturais, aos meios de subsistência, às estratégias de gerenciamento e à resiliência dos sistemas tropicais.

Sistemas socioecológicos: Para entender completamente a complexidade dos sistemas socioecológicos (SES) das florestas tropicais e como eles estão sendo impactados pelas mudanças globais, o PANGEA adota uma abordagem de sistemas que centraliza os feedbacks e as interações que existem entre as pessoas, o clima e o meio ambiente (**Figura 15**). A pesquisa de SES evoluiu nas últimas décadas para entender e modelar as relações entre e dentro dos sistemas sociais e ecológicos, abrangendo a estrutura de meios de subsistência sustentáveis (Scoones 1998), subsistemas e interações de SES (Ostrom 2009), resiliência de SES (Folke 2006), robustez em SES (Anderies et al., 2004), sistemas acoplados homem-natureza (Liu et al., 2007), socionatureza (Swyngedouw 1999), serviços ecossistêmicos (Costanza et al., 2017; Daily et al., 1997), contribuições da natureza para as pessoas (Díaz et al., 2018; Pascual et al., 2017) e cobenefícios socioecológicos (Levis et al., 2024). Embora essas estruturas possam diferir em suas definições (Colding e Barthel 2019), elas convergem em princípios e variáveis fundamentais que descrevem o sistema socioecológico, incluindo um foco central nas interações e feedbacks que podem facilitar ou dificultar a mudança no SES. Uma perspectiva de SES é particularmente importante nos trópicos, onde a terra e as florestas estão sob alta demanda para atender às necessidades de segurança alimentar e produção, às metas de conservação e biodiversidade e apoiar os meios de subsistência e o

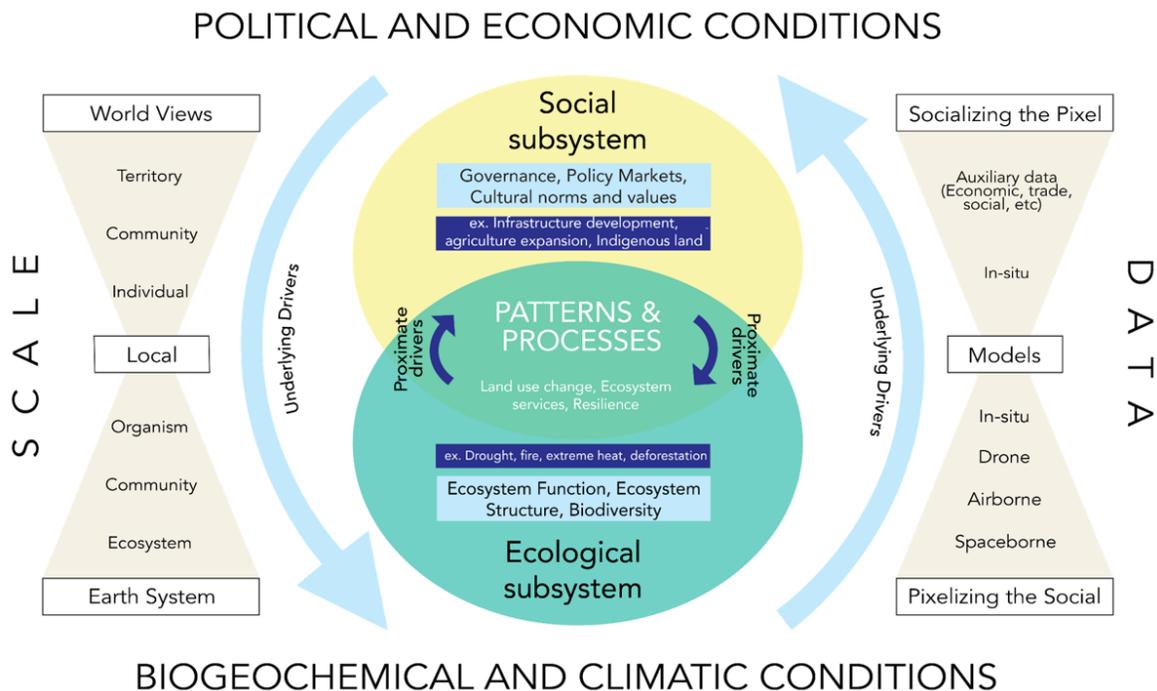


Figura 15. A abordagem do PANGEA para o SES vinculará os fatores de mudança próximos e subjacentes nos sistemas sociais e ecológicos em várias escalas para entender como as interações no SES afetam a vulnerabilidade e a resiliência das florestas tropicais.

desenvolvimento locais. É necessário entender os impactos sociais e ecológicos dessas compensações e os feedbacks que as moldam para desenvolver uma compreensão abrangente das forças que moldam a vulnerabilidade e a resiliência das florestas tropicais e para orientar estratégias de adaptação e gerenciamento eficazes e culturalmente sensíveis.

Padrões e fatores de mudança no uso da terra: Nos trópicos, os fatores e padrões regionalmente distintos de mudança no uso da terra, incluindo desmatamento, degradação e regeneração florestal, têm o potencial de impactar a resiliência do sumidouro de carbono tropical (Saatchi et al., 2021; Hubau et al., 2020). Na Amazônia e no Sudeste Asiático, o desmatamento e a degradação são impulsionados principalmente pela expansão da agricultura de larga escala, baseada em commodities, para atender à demanda dos mercados doméstico e internacional (Curtis et al., 2018; Haddad et al., 2024). Especificamente, na Amazônia, a mudança no uso da terra é impulsionada principalmente pela expansão das pastagens para o gado e pela produção industrial de soja (Barlow et al., 2018; Londres et al., 2023). O cultivo de soja e a criação de gado alteram os ciclos biogeoquímicos (por exemplo, nitrogênio e fósforo), os regimes hidrológicos e de fogo, e são uma das principais causas de desmatamento (MapBiomas, 2023). No Sudeste Asiático, onde as plantações em larga escala estão se expandindo rapidamente às custas de florestas primárias e turfeiras, a mudança no uso da terra é impulsionada em grande parte pela demanda global por óleo de palma (Koh e Wilcove, 2008). Em 2020, estima-se que a expansão do óleo de palma contribuirá com 20% das emissões de carbono da região (Carlson et al., 2013). Foi demonstrado que a melhoria dos meios de subsistência dos pequenos proprietários com a expansão do dendê na Indonésia gera compensações diretas com a função do ecossistema (Clough et al., 2016). Diferentemente da Amazônia e do Sudeste Asiático, a maior parte da mudança no uso da terra na Bacia do Congo é de pequena escala e impulsionada pela expansão da agricultura de subsistência e de culturas de commodities hiperlocais (Tyukavina et al., 2018). A demanda persistente por cacau e madeira continua a moldar a mudança no uso da terra na África tropical, embora a mudança no uso da terra em pequena escala e com base na subsistência ainda desempenhe um papel enorme na condução da mudança no uso da terra (Hosonuma et al., 2012, Kamath et al., 2024; Fuller et al., 2019). Por exemplo, embora as culturas de commodities, como o dendê, tenham se expandido na África tropical desde a década de 1990, a expansão está ligada à demanda doméstica e é atendida por pequenos proprietários e sistemas de mercado informais (Ordway et al., 2017a; Ordway et al., 2017b). O grau em que essas diferentes escalas, intensidade e formas de mudança no uso da terra entre os continentes tropicais afetam a biodiversidade distinta e as trajetórias do ciclo de carbono, no entanto, permanece pouco compreendido.

Interações de feedback: Nos sistemas socioecológicos tropicais, os feedbacks entre as pessoas e o sistema terrestre desempenham um papel fundamental na manutenção da resiliência e na orientação da trajetória desses sistemas integrados (Dearing et al., 2010). A dinâmica dos sistemas socioecológicos em florestas tropicais envolve feedbacks com uma combinação de forças próximas e subjacentes, incluindo incentivos políticos e/ou baseados no mercado, estruturas regulatórias, acesso ou barreiras a informações e recursos e conexões de longa data entre comunidades locais, povos indígenas e ecossistemas florestais (Geist e Lambin, 2002, Lambin et al., 2003). Esses fatores não apenas moldam a dinâmica ecológica, incluindo os ciclos de carbono e da água, as interações planta-animal e os sistemas meteorológicos e climáticos, mas também no subsistema social (**Figura 15**), incluindo a segurança alimentar e os meios de subsistência locais (Sonwa et al., 2012; Flores et al., 2024). Além disso, os fatores de mudança moldam os feedbacks e as interações entre os subsistemas sociais e ecológicos, por meio de mudanças, por exemplo, no uso e na cobertura da terra, na

resiliência do ecossistema e nos regimes de incêndio (Whitfield et al., 2019; Gatti et al., 2023). Os feedbacks entre os seres humanos e as florestas tropicais estão intimamente ligados por meio do fornecimento de serviços ecossistêmicos e atividades de conservação e manejo, em que, por exemplo, a coleta de produtos florestais não madeireiros, como sementes, folhas, frutos e raízes, pode desempenhar um papel importante no apoio aos meios de subsistência e às culturas das comunidades de florestas tropicais. Embora essas interações ocorram nos trópicos, as condições políticas, econômicas, culturais e de gestão específicas do local influenciam a resposta, a resiliência e as adaptações das florestas tropicais e das comunidades locais à dinâmica das mudanças globais (Saatchi et al., 2021; Geist e Lambin, 2002; Turner, 2014).

Impactos sobre a vulnerabilidade e a resiliência: As atividades humanas criam feedbacks complexos entre os sistemas sociais e ecológicos, resultando em uma cascata de impactos ambientais e sociais (Lambin & Meyfroidt, 2010). Uma melhor compreensão não apenas dos feedbacks que ampliam a vulnerabilidade, mas também daqueles que aumentam a resiliência das florestas tropicais, é essencial para o desenvolvimento de planos de gerenciamento baseados em locais e culturalmente sensíveis que apoiem a resiliência do ecossistema e os meios de subsistência da comunidade. Um exemplo inclui uma pesquisa recente focada em "pontos de esperança" socioecológicos - definidos como áreas que podem impactar significativamente a resiliência socioecológica, onde as comunidades locais e o envolvimento público podem ser estrategicamente combinados com ciência, engenharia e tecnologia, incluindo sensoriamento remoto, para proporcionar o maior impacto na conservação da biodiversidade vulnerável (Levis, et al., 2024). Os autores destacam o exemplo do Alto Xingu, localizado no arco de desmatamento da Amazônia brasileira, onde grupos indígenas como os Kuikuro enriqueceram a biodiversidade por meio de milênios de gestão da paisagem, incluindo a criação de solos antropogênicos, a domesticação de diversas culturas e o cultivo de florestas culturais, demonstrando práticas culturais e de gestão que promovem a resiliência da floresta (Levis, et al., 2024). O PANGEA oferece uma oportunidade de expandir pesquisas semelhantes em outros lugares dos trópicos por meio de colaboração e coprodução equitativas com comunidades indígenas e locais para identificar práticas que promovam sistemas resilientes que beneficiem tanto a natureza quanto as pessoas, inclusive aquelas com potencial para serem ampliadas. É necessário muito mais trabalho para identificar métodos e práticas culturalmente apropriados para integrar o sensoriamento remoto e a ciência indígena.

Implicações para o sistema socioecológico: As regiões tropicais abrigam muitas comunidades indígenas e locais cujos meios de subsistência estão intimamente ligados à saúde do ambiente que as cerca. Ao compreender os ciclos de feedback entre as atividades humanas e a função do ecossistema, as pessoas em escala local e global podem tomar decisões mais bem informadas sobre o uso da terra, o gerenciamento de recursos e os esforços de conservação que se alinham tanto à resiliência ecológica quanto às suas necessidades socioeconômicas (Aguiar et al., 2020). Os tomadores de decisão em nível subnacional e nacional também podem usar essas informações para elaborar políticas que equilibrem as metas de desenvolvimento com a conservação da biodiversidade e dos serviços dos ecossistemas, garantindo que os benefícios desses ecossistemas sejam compartilhados de forma equitativa e sustentados para as gerações futuras (Pörtner et al., 2021). O PANGEA promoverá pesquisas sobre feedbacks socioecológicos nos trópicos para melhorar a compreensão e permitir previsões mais precisas dos impactos de longo prazo das ações humanas. Esse trabalho é essencial para prever as trajetórias futuras do sumidouro de carbono tropical, a perda de espécies, as mudanças nos serviços de ecossistema e a resiliência desses ecossistemas a pressões externas (Leclère et al., 2020). Previsões precisas são necessárias para identificar possíveis pontos de inflexão,

em que pequenas mudanças ou a continuação de tendências no uso e no manejo da terra podem levar a mudanças irreversíveis de regime, e para projetar intervenções que possam evitar ou mitigar esses resultados (Staal et al., 2020; Liu et al., 2024b; Flores et al., 2024). Os avanços na compreensão, nos métodos e nos recursos de monitoramento do PANGEA têm o potencial de capacitar os povos indígenas, as comunidades locais e os tomadores de decisão com as informações necessárias para governar e se envolver com esses ecossistemas de forma mais sustentável. Em última análise, a capacidade de prever e gerenciar feedbacks complexos em ecossistemas tropicais é fundamental para promover a resiliência ambiental e social nessas regiões críticas.

Impactos globais das florestas tropicais: Os impactos das florestas tropicais também vão muito além dos trópicos. As pessoas nos EUA e em todo o mundo sofrem o impacto das interações terra-atmosfera tropical e também são agentes de mudanças no clima e nos ecossistemas tropicais, por exemplo, por meio de padrões de consumo, estilos de vida e mudanças no uso da terra. A Amazônia desempenha um papel fundamental na estabilização dos sistemas climáticos em todas as Américas, e o desmatamento da Amazônia ameaça os padrões de chuva nos EUA, o que poderia levar a uma redução de 20% nas chuvas em todo o noroeste dos EUA e a uma diminuição de 50% na camada de neve de Sierra Nevada, na Califórnia, que é a fonte de água para a agricultura e as áreas urbanas das quais dependem todos os EUA (Medvigy et al., 2013). Se os padrões de chuva no Meio-Oeste, Noroeste e partes do Sul dos EUA forem interrompidos, isso representará sérios riscos para a agricultura e os recursos hídricos dos EUA (Lawrence e Vandecar, 2015). O desmatamento da Amazônia pode levar a uma redução de 20% na precipitação em todo o noroeste dos EUA e a uma diminuição de 50% na camada de neve de Sierra Nevada na Califórnia, que é a fonte de água da qual dependem a agricultura e as áreas urbanas de todos os EUA (Medvigy et al., 2013). Essas mudanças na precipitação, combinadas com mudanças na circulação atmosférica, prejudicariam a disponibilidade de água, diminuiriam a produção agrícola e desestabilizariam os ecossistemas das Planícies Centrais dos EUA até a Costa Oeste, com possíveis preocupações com a segurança alimentar. A perda e a degradação da floresta amazônica representam ameaças diretas e graves à agricultura, aos recursos hídricos e à estabilidade social dos EUA. Além do papel que as florestas tropicais desempenham na regulação do clima global, muitas das principais culturas de commodities são cultivadas principalmente ou inteiramente nos trópicos, incluindo cacau, café, óleo de palma e borracha. Várias espécies de madeira também são encontradas apenas nos trópicos (Romero et al., 2017). O PANGEA avaliará a extensão variável do uso da terra para apoiar essas culturas e a extração de madeira sobre o desmatamento tropical e as mudanças climáticas e considerará as compensações e as estratégias de adaptação e mitigação.

2.5 Dinâmica de perturbação

Esse tema científico do PANGEA investigará como os regimes de perturbação estão alterando os feedbacks do ciclo biogeoquímico por meio do clima, da biodiversidade e do ciclo hidrológico.

Dinâmica de distúrbios nos trópicos: Existem dois regimes primários de distúrbios florestais: (1) distúrbios humanos diretos resultantes da cobertura da terra e da mudança no uso da terra, como desmatamento, degradação, desenvolvimento agrícola e incêndios provocados pelo homem, e (2) distúrbios naturais que estão amplamente associados a altas temperaturas, estresse hídrico, tempestades, agentes bióticos e ignição natural de incêndios, que são exacerbados indiretamente por

ações humanas que contribuem para a mudança climática. Esses dois regimes de distúrbios contribuem enormemente para a renovação total da floresta e para as emissões de carbono das florestas tropicais (McDowell et al., 2020; Qin et al., 2021), mas têm distribuições espaciais, intensidades, frequências e consequências distintas para as regiões tropicais. No Arco do Desmatamento do Brasil, a degradação florestal por meio da extração de madeira e incêndios causou mais perda de carbono do que o desmatamento entre 2016 e 2018 (Csillik et al., 2024). O efeito das tempestades de vento na perda de carbono foi quase tão grande quanto os incêndios e maior que a exploração madeireira (Csillik et al., 2024; Urquiza-Muñoz et al. 2024; Esquivel-Muelber et al. 2020). Os efeitos das mudanças na frequência e gravidade das secas e tempestades, do aumento das temperaturas, do desmatamento e da degradação são altamente variáveis entre os ecossistemas e podem afetar a mortalidade das árvores, a evapotranspiração, a respiração do ecossistema, a composição das espécies e muito mais. De forma crítica, as interações entre os distúrbios podem ser multiplicativas, em vez de aditivas, o que significa que precisamos quantificar explicitamente seu impacto e suas interações para entender seus efeitos. Os exemplos incluem a seca que amplifica os efeitos do fogo (Brando et al., 2014), o desmatamento que amplifica o vento (Schwartz et al., 2017) e os cipós que amplificam os raios (Gora et al., 2023). O PANGEA quantificará os efeitos da perturbação nos gradientes de biodiversidade, clima, clima edáfico e uso da terra para entender suas consequências individuais e multiplicativas.

Perturbação humana direta: Nas últimas décadas, a perturbação humana direta representou o principal risco à persistência e à função das florestas tropicais. As pessoas desmatam grandes extensões de florestas tropicais todos os anos e causam degradação por meio da extração seletiva de madeira, da caça e do fogo. Os distúrbios humanos diretos geralmente envolvem impactos intensos e duradouros, como a remoção extensiva de biomassa, a defaunação e a conversão de terras em ecossistemas não florestais (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). O sensoriamento remoto por satélite revolucionou a detecção e a quantificação rápidas de distúrbios humanos diretos e possibilitou uma compreensão mais profunda dos fatores determinantes (consulte a Seção 2.4). O desmatamento e a mudança na cobertura da terra agora estão sendo ativamente mapeados em alta resolução espacial nos trópicos e em associação com setores e práticas específicos que impulsionam essas tendências (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). Com o advento das matrizes de pequenos satélites (por exemplo, PlanetScope), agora também é possível quantificar o desmatamento e a degradação em alguns sistemas em um período de dias a meses (Welsink et al., 2023; Dalagnol et al., 2023). Esses avanços demonstraram que a degradação contribui tanto ou mais do que o desmatamento para o total de regimes de distúrbios em florestas tropicais (Maxwell et al., 2019; Qin et al., 2021), destacando a importância de dados de alta resolução e alta frequência para compreender e monitorar essa dinâmica. Ainda assim, as interações entre desmatamento e degradação e fatores como ciclo hidrológico, condições micrometeorológicas, interações de espécies e ciclo biogeoquímico permanecem pouco compreendidas, especialmente na África tropical.

Fogo: em florestas tropicais úmidas, a dinâmica do fogo frequentemente interage com o desmatamento e a degradação, onde os incêndios de ignição natural permanecem raros e os incêndios de ignição humana são comuns (Uhl e Kaufmann, 1990; Cochrane, 2003; Brando et al., 2019a). De 2003 a 2018, em florestas tropicais úmidas, cerca de $41 \pm 14\%$ de toda a perda florestal foi relacionada a incêndios, embora isso tenha variado consideravelmente entre os continentes (van Wees et al., 2021). De toda a perda florestal relacionada a incêndios tropicais durante esse período,

69% ocorreram nas Américas tropicais, 22% no Sudeste Asiático e apenas 8% na África Subsaariana (van Wees et al., 2021). Embora os incêndios estejam associados ao desmatamento, os impactos do declínio do desmatamento na Amazônia, desde 2005, sobre a atividade do fogo permanecem incertos. Alguns estudos mostraram uma dissociação entre incêndios e desmatamento (Aragão et al., 2018), enquanto outros relataram declínios na atividade de incêndios (por exemplo, Andela et al., 2017; Libonati et al., 2021). Na África, houve um aumento na perda de florestas tropicais relacionada ao fogo, mas a maioria dos incêndios na região provavelmente não é detectada (Wimberly et al., 2024). Os incêndios provocados pelo homem geralmente se espalham para o sub-bosque de florestas tropicais intactas, onde causam a mortalidade de árvores e tornam as florestas mais suscetíveis a distúrbios subsequentes provocados pelo vento (Barlow et al., 2003; Brando et al., 2014; Silvério et al., 2019; Berenguer et al., 2021b). As mudanças na estrutura da floresta associadas a incêndios e à fragmentação florestal podem aumentar o risco de incêndios subsequentes, tanto pela maior abundância de cargas de combustível, como gramíneas e plantas de sub-bosque (Silvério et al., 2013, Sagang et al., 2024b), quanto pela maior radiação solar que atinge o solo, o que favorece condições mais quentes e secas perto da superfície (Brando et al., 2014; Longo et al., 2020; Nunes et al., 2022). Além disso, as secas periódicas amplificam os efeitos do fogo ao aumentar a inflamabilidade do combustível e, portanto, espera-se que o aumento das secas severas, impulsionado pelo clima, aumente os efeitos do fogo (Alencar et al., 2006; Brando et al., 2014, 2019a; Barbosa, 2024; Burton et al., 2024a,b; da Veiga et al., 2024; Jones, 2024). Os incêndios transferem o nitrogênio do ecossistema para a atmosfera por meio da pirodenitrificação, com o consequente efeito de empobrecimento de nitrogênio, levando a taxas reduzidas de regeneração da vegetação (Davidson et al., 2007). As medições de satélite e de solo revelaram os efeitos generalizados dos incêndios e suas principais contribuições para o ciclo de carbono pantropical (Cochrane 2001; Berenguer et al., 2021a). Por meio de medições terrestres coordenadas e co-localizadas e observações avançadas de satélite e aerotransportadas, o PANGEA melhorará significativamente a compreensão da dinâmica do fogo e seus impactos.

Dinâmica de distúrbios naturais: Os distúrbios naturais - principalmente secas, tempestades e agentes bióticos - apresentam desafios distintos para a detecção, quantificação e atribuição em comparação com os distúrbios humanos diretos, como o desmatamento e a degradação florestal - embora a defaunação continue essencialmente impossível de ser detectada por meio de sensoriamento remoto. A maioria dos distúrbios naturais ocorre em pequenas escalas espaço-temporais, sendo que mais de 98% da mortalidade de biomassa por quedas de árvores na Amazônia é atribuída a eventos com menos de 0,1 ha de área (Espírito-Santo et al., 2014). No entanto, pequenos eventos de distúrbio podem causar coletivamente cerca de 1,5 a 2% da rotatividade de biomassa anualmente, indicando que os distúrbios naturais liberam o equivalente a todo o pool de carbono da floresta tropical a cada 50 a 75 anos (Galbraith et al., 2013; Espírito-Santo et al., 2014). Os distúrbios naturais também podem variar enormemente no espaço e no tempo (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), com fatores distintos em diferentes regiões e fortes evidências de que os regimes de distúrbios naturais estão mudando com as mudanças climáticas (Gloor et al., 2013; McDowell et al., 2018, Gora et al., 2020a; Sullivan et al., 2020; Gora e Esquivel-Muelbert 2021; Fang et al., 2022). Dadas as suas enormes contribuições para a dinâmica do ciclo de carbono das florestas tropicais - por exemplo, na Amazônia brasileira, os distúrbios naturais foram responsáveis por mais de 50% das perdas totais de carbono da biomassa (Csillik et al., 2024) -, mesmo pequenas mudanças nos regimes de distúrbios naturais afetarão a função das florestas tropicais, a biodiversidade e o orçamento global de carbono.

Seca: Os eventos de seca são os principais causadores de distúrbios naturais nas florestas tropicais. O estresse hídrico atmosférico associado a altas temperaturas e déficits de pressão de vapor aumentou nas últimas décadas (Fang et al., 2022), e as secas episódicas estão ocorrendo com maior gravidade e frequência (Boiser et al., 2015; Duffy et al., 2015; Trenberth et al., 2014). O estresse hídrico relacionado à seca está associado ao aumento da mortalidade e à diminuição do crescimento das árvores, detectável em parcelas de inventário florestal e sensoriamento remoto 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). Trabalhos anatômicos e fisiológicos detalhados revelaram muito sobre os mecanismos subjacentes à resiliência das florestas ao estresse hídrico (McDowell et al., 2008; McDowell 2011; Trugman et al., 2018; Smith-Martin et al., 2023; Tavares et al., 2023). A pesquisa sobre a seca em florestas tropicais fornece fortes evidências de sua importância, mas também revela que os efeitos da seca são altamente variáveis entre os ecossistemas. Por exemplo, o El Niño de 2015-2016 teve efeitos fortes na Amazônia (Bennett et al., 2023), mas apenas um efeito marginal nas florestas tropicais africanas (Bennett et al., 2021) e causou um aumento substancial na GPP na região central do Panamá (Detto e Pacala, 2022). Embora as diferenças entre os anos de seca e os anos sem seca sejam claras, a contribuição das secas para as tendências decadais na dinâmica florestal e as trajetórias futuras das florestas tropicais permanecem altamente incertas.

Tempestades: As tempestades tropicais (denominadas furacões, ciclones ou tufões, dependendo de sua localização geográfica) estão aumentando em intensidade e são uma forma dominante de perturbação nas florestas tropicais costeiras 10° ao norte e ao sul do equador (Hoyos et al., 2006; Lugo 2008), embora desempenhem um papel limitado nos regimes de perturbação pantropical. Em contraste, há muitas evidências de que o vento e os raios associados a tempestades são os principais fatores da mortalidade de árvores e da dinâmica da biomassa florestal (Chambers et al., 2013; Negrón-Juárez et al., 2018; Negrón-Juárez et al., 2017, Negrón-Juárez et al., 2023, Gora et al., 2020b; Gora e Esquivel-Muelbert, 2021). Na Amazônia, a mortalidade de árvores causada por tempestades quadruplicou desde a década de 1980 (Urquiza-Muñoz et al., 2024), mas poucos estudos na Amazônia investigaram os fatores de tempestade da dinâmica e composição da floresta. A variação temporal na atividade de tempestades prevê as taxas de distúrbios no dossel (Araujo et al., 2021) e a variação espacial na atividade de tempestades é um forte correlato da variação espacial na biomassa da floresta, nas taxas de mortalidade da biomassa e na composição de espécies (Gora et al., 2020; Gorgens et al., 2021; de Lima et al., 2023; Feng et al., 2023a). Por exemplo, a baixa atividade de tempestades está associada à alta biomassa no Escudo das Guianas, enquanto a alta frequência de tempestades está associada à baixa biomassa e a taxas de perturbação mais altas na Amazônia ocidental (Gorgens et al., 2021). As tempestades provavelmente desempenham um papel semelhante em outras florestas tropicais, mas as análises de distúrbios causados por tempestades nas florestas tropicais africanas e indomalaias são quase inexistentes. Essa lacuna de conhecimento é preocupante porque todos os dados existentes sugerem que as tempestades convectivas aumentaram em frequência de 5 a 25% por década no século passado, e espera-se que continuem aumentando (Taylor et al., 2018; Raghavendra et al., 2018; Lavigne et al., 2019; Harel e Price 2020).

Aumento das temperaturas: A maioria das florestas tropicais de planície apresenta temperaturas médias elevadas durante todo o ano, com variabilidade sazonal e interanual relativamente baixa, o que pode tornar as florestas tropicais excepcionalmente vulneráveis a mudanças de temperatura (Cunningham e Read, 2002). As projeções climáticas indicam que as florestas tropicais experimentarão cada vez mais temperaturas médias anuais não análogas e eventos extremos de calor ao longo do século XXI (Seneviratne et al., 2021). As altas temperaturas podem aumentar rápida e não

linearmente o déficit de pressão de vapor (VPD) (Barkhordarian et al., 2019), o que, por sua vez, afeta negativamente a produtividade primária devido ao fechamento dos estômatos (Lloyd e Farquhar, 2008). Experimentos indicaram que as espécies de árvores tropicais são capazes de manter a produtividade até 38°C se a VPD não aumentar (Smith et al., 2020). No entanto, se as temperaturas médias aumentarem mais de 4°C acima dos níveis atuais, os ecossistemas florestais tropicais poderão passar por períodos frequentes de temperaturas próximas a 50°C, o que poderia causar danos irreversíveis aos tecidos e perda persistente da capacidade fotossintética (Doughty et al., 2023). O limite exato em que a temperatura e a VPD causarão danos permanentes e extensos às florestas tropicais permanece altamente incerto (Slot e Winter, 2016; Winter e Roelfsema, 2024).

3 Lacunas de conhecimento e dúvidas

Apesar da importância global das florestas tropicais, não compreendemos totalmente os padrões e processos básicos que sustentam sua sobrevivência, o que limita nossa capacidade de prever com eficácia sua função futura no sistema terrestre. É importante ressaltar que a maioria das lacunas de conhecimento atuais são inerentemente transdisciplinares e exigem uma compreensão avançada dos processos e interações entre ecossistemas de florestas tropicais estrutural, funcional e socialmente diversos e heterogêneos, o efeito das mudanças climáticas, as mudanças nos regimes de distúrbios naturais e antropogênicos e seus impactos combinados sobre a biodiversidade, os ciclos biogeofísicos e biogeoquímicos. As perguntas científicas do PANGEA, portanto, abrangem os cinco temas científicos descritos na Seção 2. As perguntas que abordam esses temas - Ciclos Biogeoquímicos, Biodiversidade, Interações e Retroalimentações Climáticas, Sistemas Socioecológicos e Dinâmica de Perturbação - são organizadas de acordo com considerações de padrão (Seção 3.1), processo (Seção 3.2) e mudança futura projetada (Seção 3.3) para refletir sua natureza transdisciplinar. As medições necessárias para fornecer dados ecológicos, sociais e geofísicos para abordar as questões científicas serão obtidas por meio de métodos terrestres, aéreos e de satélite e são descritas brevemente nesta seção, com mais detalhes na **Tabela 2** na Seção 6.2 e na **Tabela -E1** no Apêndice E. A gama e a variedade de coleta de dados para medições por satélite, aéreas e terrestres são mostradas na **Figura 16**.

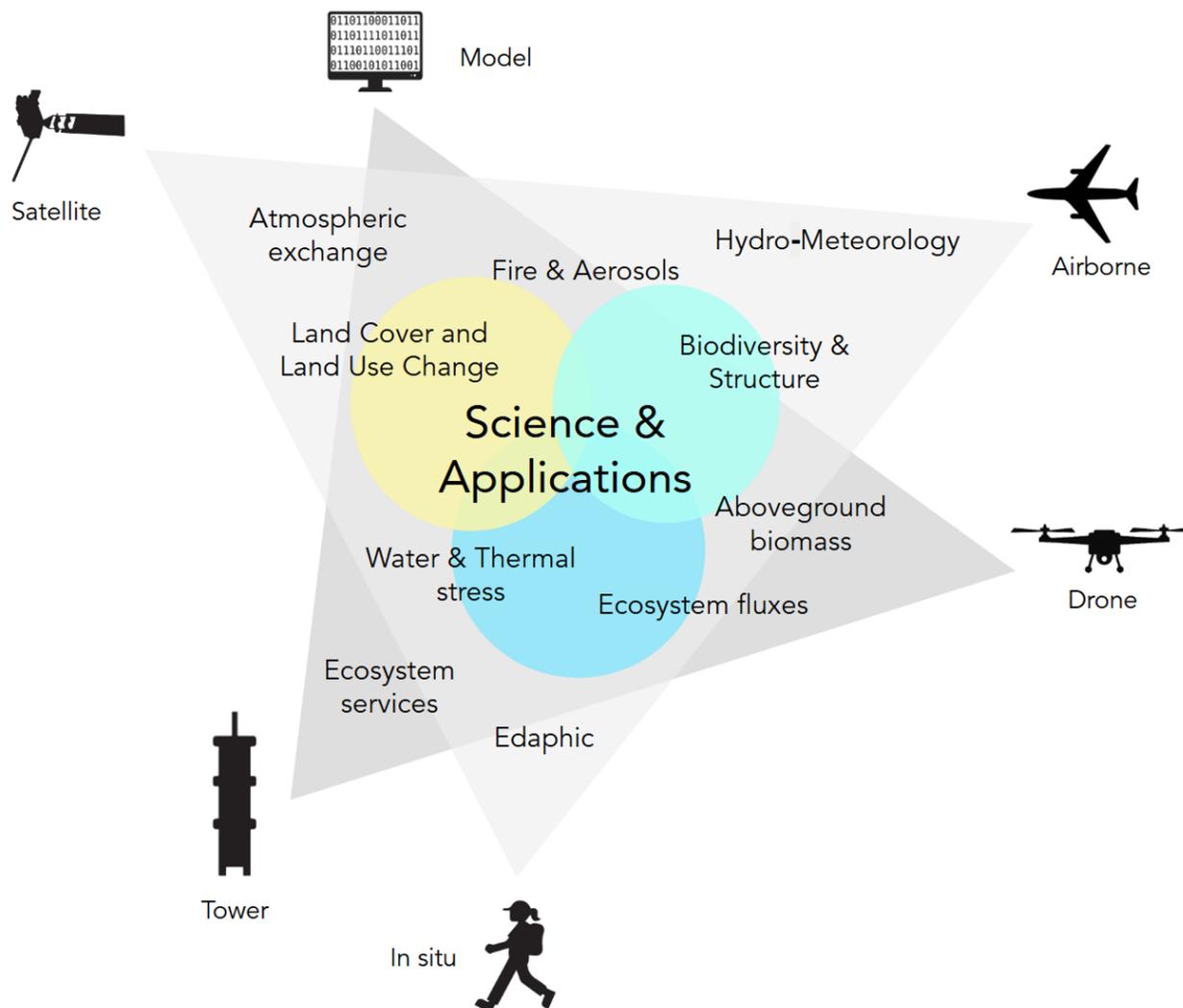


Figura 16. A ciência e os aplicativos do PANGEA conciliarão as incompatibilidades de escala por meio de medições in situ, em torres, drones, aeronaves e satélites, combinadas com avanços na modelagem e na compreensão dos processos que sustentam a teoria de escala.

3.1 Padrão

3.1.1 Padrão: Estoques e fluxos de carbono

As estimativas atuais dos estoques e fluxos de carbono diferem acentuadamente nos trópicos (Sullivan et al., 2020; Xu et al., 2021a; Muller-Landau et al., 2021; Wang et al., 2023a). Os dados da África, embora esparsos e com um viés geográfico e falta de representatividade, sugerem que os regimes de distúrbio e as respostas das florestas aos distúrbios são distintos de outros continentes (Hubau et al., 2020; Bennett et al., 2021; 2023), embora isso ainda esteja aberto a debate. Além disso, nos trópicos, os padrões espaciais e temporais da dinâmica de distúrbios são mal caracterizados, o que agrava a incerteza sobre o futuro do orçamento global de carbono (Pugh et al., 2020). Para preencher as lacunas de conhecimento em nossos dados e na compreensão dos estoques e fluxos de carbono

tropical, o PANGEA abordará as seguintes questões relacionadas a padrões para responder à pergunta abrangente do PANGEA na Seção 1:

- **Q1.** Como as florestas dos trópicos diferem em estoques de carbono e fluxos de dióxido de carbono, metano e laterais, e como **a variação espacial** dentro de cada floresta se relaciona com o microclima, o ciclo hidrológico, os solos, a geomorfologia e as interações socioecológicas?
- **Q2.** Como **as variações temporais** nos fluxos de florestas tropicais se relacionam com as variações temporais no clima e como elas serão afetadas pelas mudanças climáticas?
- **Q3.** Como **os tipos de perturbação** e os gradientes nos **regimes de perturbação** afetam os estoques e fluxos de carbono, incluindo dióxido de carbono, metano e fluxos laterais?
- **Q4.** Como as diferenças geográficas e as variações espaciais e temporais na **fenologia** das árvores de florestas tropicais variam com os estoques e fluxos de carbono, e a fenologia está mudando em relação às mudanças, incluindo mudanças climáticas e de uso da terra e regimes de perturbação?

Para melhorar a **caracterização espacial** da biomassa em escala de paisagem (ou seja, florestas, terras agrícolas, pastagens) e as diferenças de biomassa nos domínios geográficos centrais e estendidos, o PANGEA integrará dados de parcelas de inventários florestais e medições adicionais em locais selecionados que abrangem a escala de paisagem, com dados de satélite e de sistemas lidar aéreos. O PANGEA fará parceria com o GEO-TREES, um projeto que está coordenando medições terrestres de inventários florestais com escaneamento a laser terrestre, drones e coleta de dados lidar aéreos. O PANGEA aproveitará as informações sobre estimativas de estoques de carbono com base na alometria das árvores e priorizará a colocação de paisagens em locais florestais do GEO-TREES para apoiar os esforços de aumento de escala usando **GEDI, NISAR, BIOMASS e EDGE***. Para avançar na **quantificação temporal** dos fluxos do ecossistema, o PANGEA integrará os dados de CO₂ e CH₄ coletados por meio de medições de fluxo de covariância de Foucault existentes (Baldocchi 2020) e também identificará áreas para a implementação de novas torres para preencher lacunas de dados e conhecimento em gradientes climáticos, de biodiversidade e de perturbação. Medições adicionais de CO₂ e CH₄ serão feitas por meio da implantação estratégica de câmaras automatizadas e manuais. Para avaliar as restrições regionais e pantropicais sobre os fluxos de CO₂ e CH₄, o PANGEA empregará medições de gases traços aéreos, que desempenharam um papel fundamental em campanhas de campo anteriores da NASA, como as medições do perfil vertical de Manaus durante o LBA e as medições de gases traços aéreos do CARVE e do Arctic-CAP durante o ABoVE (Sweeney et al., 2022). Elas serão usadas para validar observações de satélite de sensores como o **OCO-2 e -3, TROPOMI, Carbon Mapper** e novos produtos de satélites geoestacionários, incluindo o **GOES-R** (Crisp et al., 2017; Lorente et al., 2021; Khan et al., 2021; Ranjbar et al., 2023). O **NISAR** e o **BIOMASS** serão usados para mapear áreas úmidas tropicais, que serão integradas aos dados de águas superficiais da Surface Water and Ocean Topography Mission (**SWOT**) para restringir as medições dos fluxos laterais de carbono.

O PANGEA colaborará com a Rede de Observação da Coluna Total de Carbono (TCCON) e a Rede Colaborativa de Observação da Coluna de Carbono (COCCON) para preencher as lacunas de validação da observação por satélite, especialmente na África, a fim de resolver debates sobre as estimativas de fontes e sumidouros continentais inferidas a partir das observações do OCO-2. O TCCON e o COCCON são redes de espectrômetros terrestres com transformada de Fourier que são usados para recuperar a abundância exata e precisa da média da coluna de CO₂, CH₄, N₂O, HF, CO,

H₂O e HDO, fornecendo um recurso de validação essencial para **OCO-2/3**, **GOSAT** e **GOSAT-2**, **TROPOMI** e outras missões. Atualmente, essas medições de validação são extremamente escassas nos trópicos, limitando a interpretação dos padrões de fluxo espaço-temporal inferidos a partir de dados de satélite de CO₂ e CH₄. Essas medições também ajudarão a restringir os modelos e a quantificar as incertezas das estimativas em escala regional dos fluxos de CO₂ e CH₄ derivados da modelagem inversa (Beck et al., 2013b; Liu et al., 2016; Schuh et al., 2019) para paisagens em todo o domínio do PANGEA. Por fim, o PANGEA quantificará o impacto do **distúrbio do dossel** causado por vento, raios e secas, e a **fenologia da floresta tropical** nos fluxos e estoques de carbono por meio de uma combinação de medições de campo, PhenoCams, drones e dados de satélite para abordar as lacunas de conhecimento relacionadas às diferentes respostas fenológicas das folhas para espécies individuais e tipos funcionais aos gradientes de clima e distúrbio nas paisagens. Os conjuntos de dados do PANGEA complementarão os esforços existentes para expandir a cobertura geográfica da fenologia usando **Landsat**, **Sentinel-2** e **dados de satélites comerciais** (Guan et al., 2015; Yang et al., 2021b; Wang et al., 2023a).

3.1.2 Padrão: Biodiversidade e composição funcional

A biodiversidade varia acentuadamente entre os continentes tropicais, não apenas devido a diferenças climáticas, mas também como resultado de seu passado evolutivo (Corlett e Primack 2006; Slik et al., 2018; Raven et al., 2020). A biodiversidade está positivamente associada a uma maior produtividade primária líquida em florestas tropicais (Durán et al., 2019). Entender os mecanismos que sustentam essa relação em escalas regionais e pantropicais é uma lacuna de conhecimento que o PANGEA pode ajudar a preencher. Faltam informações detalhadas sobre a diversidade funcional dos ecossistemas de florestas tropicais. Uma avaliação inicial da abundância de dados de características de plantas de florestas tropicais nos trópicos americanos, com base em TRY (Kattge et al., 2020); LT-Brasil (Mariano et al., 2021) e NGEE-Tropics (<https://ngt-data.lbl.gov/doi/>), revela que alguns poucos locais na região central do Panamá e na costa da Guiana Francesa são responsáveis pela maior parte dos dados de características de espécies de árvores florestais, e a maioria das características tem informações limitadas (**Figura 17**), especialmente para espécies de árvores africanas. Ao abordar essas lacunas de conhecimento e dados, o PANGEA vinculará diretamente as medições de solo com o sensoriamento remoto aéreo e por satélite para entender a distribuição das características funcionais do dossel e a diversidade funcional nos biomas de florestas tropicais e investigará a força e a dependência da escala dos controles de biodiversidade na função do ecossistema. O PANGEA responderá às seguintes perguntas para preencher as lacunas de conhecimento na compreensão da biodiversidade e da composição funcional nos trópicos.

- **Q5.** Como a estrutura e a função das florestas tropicais diferem geograficamente e variam espacialmente com a **biodiversidade** das plantas?
- **Q6.** Quais são as **distribuições de características funcionais** das plantas **em florestas tropicais** de diferentes continentes e como essas diferenças refletem as respostas a distúrbios e gradientes climáticos?
- **Q7.** Até que ponto os estoques de carbono tropical e a dinâmica do ciclo de carbono estão relacionados à **composição das características funcionais das plantas**?

Para relacionar as métricas de biodiversidade à diversidade estrutural e funcional, o PANGEA coletará medições terrestres coincidentes e observações hiperespectrais aéreas em toda a biodiversidade de espécies e composição de características funcionais, além de gradientes de perturbação. O PANGEA se baseará em pesquisas anteriores que demonstram como essas abordagens permitem estimativas da composição funcional e da diversidade de ecossistemas de florestas tropicais (Ferret e Asner, 2013; Asner et al., 2014b; Asner et al., 2017; Chadwick e Asner 2020; Ordway et al., 2022). O PANGEA empregará dados hiperespectrais aéreos e de satélite, inclusive das missões **EMIT**; **PRISMA**; **DESI**; Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem Mission (**PACE**) e **Planet Tanager**, e avançará na calibração e no desenvolvimento de algoritmos para apoiar a ciência e as aplicações do PANGEA e a missão **SBG**. O PANGEA também caracterizará a diversidade estrutural da floresta usando lidar terrestre e baseado em UAV, aerotransportado e espacial (**GEDI**, **EDGE***) em escalas de árvore individual a ecossistema (por exemplo, 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 a associação entre a composição de espécies de plantas e o funcionamento do ecossistema (Coverdale e Davies, 2023), o PANGEA combinará medições sobre a diversidade estrutural e funcional com observações in situ e de sensoriamento remoto de CO₂, CH₄, fluxos de água e energia e ciclagem de nutrientes, usando séries temporais de medições e amostragem espaço-por-tempo nas paisagens. Para relacionar a diversidade funcional com as respostas do ecossistema a eventos extremos, a coleta de dados do PANGEA abrangerá paisagens que apresentaram respostas distintas a eventos extremos anteriores, por exemplo, o El Niño de 2015. Usaremos uma abordagem de espaço para tempo na ausência de eventos extremos durante o PANGEA. A detecção de respostas a eventos extremos, bem como as

relações emergentes entre a diversidade funcional e a função do ecossistema, serão usadas para dimensionar os conjuntos de dados nos domínios do PANGEA e para a avaliação comparativa de modelos baseados em processos. A Seção 3.2.1 apresenta outras perguntas relacionadas à biodiversidade do PANGEA que vão além da botânica e incluem táxons não vegetais e interações entre espécies. Com base em conversas com colaboradores indígenas durante o esforço de definição do escopo do PANGEA, é mais provável que a abordagem das perguntas da Seção 3.2.1 se beneficie da integração do Conhecimento Ecológico Indígena, Tradicional e Local (IEK, TEK e LEK) com outras formas de conhecimento e dados. Acreditamos que o IEK, o TEK e o LEK têm o potencial de

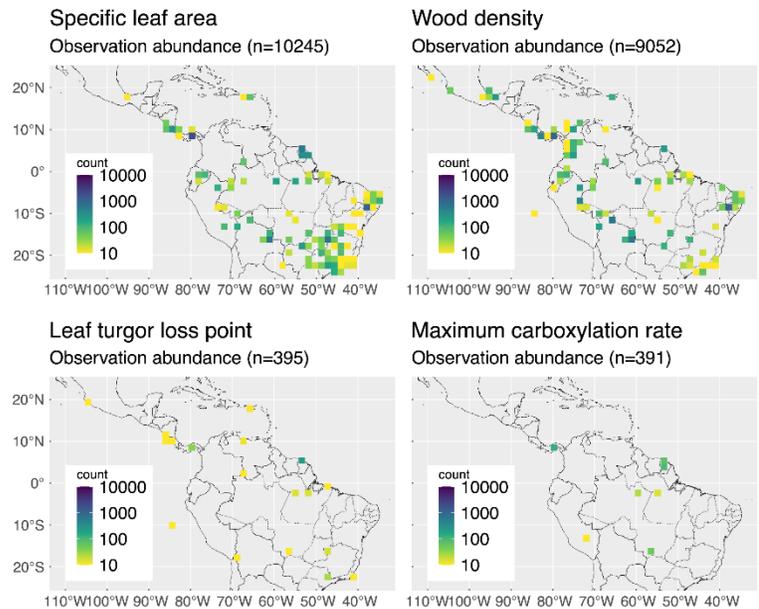


Figura 17. Número de observações para características selecionadas nos trópicos americanos, com base nos bancos de dados existentes - TRY (Kattge et al. 2020); LT-Brasil (Mariano et al. 2021, e referências a esse respeito); e NGEE-Tropics (<https://ngt-data.lbl.gov/doi/>). Para a área foliar específica e a taxa máxima de carboxilação, a contagem inclui apenas observações que foram inequivocamente obtidas do dossel ou de folhas expostas ao sol.

promover a compreensão de todas as questões científicas do PANGEA de maneiras que serão exploradas por meio de uma ciência co-desenvolvida e equitativa.

3.1.3 Padrão: Interações terra-atmosfera e limiares

Apesar dos avanços na compreensão das interações e feedbacks entre a biosfera e a atmosfera em regiões tropicais de projetos e campanhas anteriores da NASA (Davidson et al., 2012), ainda existem lacunas substanciais de conhecimento sobre como essas interações variam dentro e entre os continentes (Phillipon et al., 2019; Pohl et al., 2021; Martins et al., 2018; Chakraborty et al., 2019; Jonard et al., 2022). As condições hidroclimáticas nas florestas tropicais variam significativamente ao longo dos gradientes de distúrbios, de florestas intactas a paisagens altamente fragmentadas (Gutierrez-Cori et al., 2021), e há evidências de estudos de modelagem e sensoriamento remoto de que a degradação generalizada de florestas tropicais pode alterar os fluxos de energia e água (por exemplo, Longo et al., 2020; Rangel Pinagé et al., 2023), mas os efeitos da degradação florestal na intensidade e reciclagem da precipitação permanecem desconhecidos. Os impactos do desmatamento nas vias de transporte da umidade atmosférica reciclada são um foco crescente de pesquisa na Amazônia, mas em menor grau na África Central (van der Ent et al., 2010; Zemp et al., 2017; Baker e Spracklen 2022; Te Wierik et al., 2022; Xu et al., 2022; Staal et al., 2023; Theeuwes et al., 2023; Flores et al., 2024; Nyasulu et al., 2024). Essa lacuna de conhecimento para a África é uma preocupação, dada a evidência recente que sugere que as florestas tropicais da África Central dependem mais da reciclagem de umidade para fornecer umidade atmosférica para as chuvas do que a Amazônia (Worden et al., 2021b, 2024; Baker e Spracklen 2022). Além disso, as atividades de incêndio relacionadas ao uso da terra podem alterar significativamente a concentração de aerossol na atmosfera e afetar diretamente as atividades convectivas nos ecossistemas tropicais (Andreae et al., 2004; Freire et al., 2020). Para abordar as lacunas de conhecimento relacionadas às interações terra-atmosfera e aos limiares hidroclimáticos, o PANGEA responderá às seguintes perguntas:

- **Q8.** Como *as interações terra-atmosfera*, incluindo a reciclagem de umidade e os fluxos de carbono, variam com os feedbacks climáticos, os distúrbios, a capacidade de armazenamento de carbono e a resiliência das florestas tropicais, sob condições ambientais variáveis?
- **Q9.** Como *os limites hidroclimáticos*, como níveis críticos de umidade do solo ou limites térmicos, variam dentro e entre os continentes tropicais?

Para investigar como as interações entre a terra e a atmosfera variam entre os continentes, o PANGEA se baseará nas medições usadas para a variação espacial e temporal dos estoques de carbono (Seção 3.1.1) e da diversidade estrutural e funcional (Seção 3.1.2), complementadas com medições terrestres de estações micrometeorológicas, fluxos de calor latente e sensível de torres de covariância de vórtices, umidade do solo, medições ecofisiológicas do dossel e umidade de combustível vivo e morto. O PANGEA dimensionará dados de solo e de torre sobre umidade do solo, conteúdo de água do dossel, características hidráulicas, estresse térmico e evapotranspiração (ET) para os pantropicais, combinando radar aéreo e hiperespectral com **SMAP**, Soil Moisture and Ocean Salinity Mission (**SMOS**), **NISAR***, Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS Mission (**AMSR-E**), **EMIT**, **ECOSTRESS** e Fluorescence Explorer Mission (**FLEX**). Os dados terrestres do PANGEA melhorarão ainda mais as estimativas de umidade do solo do **SMAP** em florestas tropicais, conhecidas por serem significativamente distorcidas em ecossistemas tropicais (Cho et al., 2024), com base em esforços de correção recentes (Wang et al., 2024). Para identificar limiares hidroclimáticos críticos, o PANGEA avançará em abordagens emergentes para quantificar o estresse hídrico da vegetação a partir do

espaço. Por exemplo, o conteúdo de água do dossel a partir de dados hiperespectrais aéreos ilustrou padrões ecologicamente significativos relacionados ao estresse hídrico em sistemas mediterrâneos (Brodrick et al., 2019; Paz-Kagan e Asner 2017), e o PANGEA testará a transferibilidade dessa abordagem para os trópicos. A estimativa da profundidade óptica da vegetação a partir do sensoriamento remoto por micro-ondas é outra tecnologia promissora para a quantificação do estresse relacionado à seca (Konings et al., 2021), e o PANGEA investigará como dimensionar a resposta em nível de folha e individual, avaliará as incertezas e levará em conta os efeitos de confusão, como o fato de o sinal ser dominado pela água da superfície da folha em vez da água intersticial (Xu et al., 2021b). O PANGEA coletará medições ecofisiológicas no nível das folhas do dossel e usará métodos de recuperação da profundidade óptica da vegetação (VOD) baseados em torres usando sinais de micro-ondas GNSS (Humphrey e Frankenberg, 2023). O PANGEA também avaliará a escalabilidade dessas medições usando recuperações hiperespectrais e de micro-ondas aerotransportadas e espaciais. Os dados térmicos e de fluorescência solar induzida (SIF) baseados em torre e aerotransportados também serão usados para avaliar as medições diurnas e sazonais de GPP e ET para restringir ainda mais os produtos de dados e as métricas recuperadas de satélites como o **ECOSTRESS** (por exemplo, Fisher et al., 2020; Li et al., 2021) e as recuperações de SIF de satélites como **OCO-2/3** e **TROPOMI** (Sun et al., 2018). Os produtos restritos fornecerão dados de calibração valiosos para umidade do solo com sensoriamento remoto, ecofisiologia de plantas, GPP e ET em escalas regionais para modelos baseados em processos.

3.2 Processo

3.2.1 Processo: Interações entre espécies e resiliência

Embora as florestas tropicais sejam conhecidas como ecossistemas de alta biodiversidade, a ciência e a tecnologia para quantificar e monitorar a biodiversidade em grandes escalas, bem como a compreensão do processo de como a diversidade estrutural e funcional medeia o ciclo de carbono, água, energia e nutrientes, ainda é incipiente. Além disso, a maioria dos modelos da biosfera terrestre ainda representa florestas tropicais com menos tipos funcionais de plantas do que as florestas temperadas (por exemplo, Lawrence et al., 2019; Schaphoff et al., 2018). Mesmo quando os modelos representam várias estratégias de histórico de vida, obter uma coexistência robusta nas simulações continua sendo um desafio significativo (Koven et al., 2020; Li et al., 2023; Powell et al., 2018). Parte desse desafio decorre do fato de que as plantas em florestas tropicais densas devem competir por vários recursos limitantes (luz, água, nutrientes) e há fortes compensações entre aquisição de recursos, crescimento e sobrevivência (Choat et al., 2018; Oliveira et al., 2021a). Essas compensações são caracterizadas por diferentes traços funcionais, mas a maioria dos esforços para caracterizar a distribuição de traços em escalas regionais e globais resultou em discordância acentuada nas estimativas para florestas tropicais (Dechant et al., 2024). Além disso, as comunidades de plantas em diferentes continentes têm histórias evolutivas distintas (Slik et al., 2018), bem como interações contemporâneas únicas entre plantas e animais em cada continente tropical (Corlett & Primack 2006). Por exemplo, na África Central, a megafauna herbácea, como os elefantes florestais, ao consumir seletivamente espécies com menor densidade de madeira e ajudar na dispersão de espécies de plantas com sementes grandes que têm alta densidade média de madeira, pode apoiar direta e indiretamente florestas mais densas em carbono e ajudar em sua capacidade de sequestro de carbono (Berzaghi et al., 2019). Pesquisas sugerem que a perda de megaherbívoros de florestas tropicais reduz os estoques de carbono das florestas tropicais em até 9% (Berzaghi et al., 2018, 2023).

Essa perda de megaherbívoros pode ter alterado as relações entre a biodiversidade e a função da floresta, mas essa hipótese ainda precisa ser testada. As florestas tropicais também estão passando por mudanças significativas devido ao desmatamento e à degradação florestal. Pesquisas anteriores indicaram que mesmo níveis modestos de degradação podem esgotar significativamente a biodiversidade em florestas tropicais (Barlow et al., 2016). Entender como essas perdas afetam a capacidade das florestas de se recuperarem e responderem às mudanças climáticas cada vez mais intensas é uma prioridade de pesquisa fundamental. Embora exista um conjunto crescente de evidências mostrando a função da vida selvagem nos ciclos biogeoquímicos, especialmente nos fluxos e no sequestro de carbono (Berzaghi et al., 2018, 2023; Schmitz et al., 2018), a extensão em que a vida selvagem afeta o ciclo natural do carbono continua sendo uma área de pesquisa ativa e não está adequadamente representada nos ESMs existentes. Portanto, o PANGEA abordará as seguintes questões:

- **Q10.** Qual é o papel da **biodiversidade** na condução das variações nos estoques e fluxos de carbono das florestas tropicais em escalas local, regional e continental?
- **Q11.** Como **as interações planta-animal** medeiam a vulnerabilidade ou a resiliência dos estoques e fluxos de carbono das florestas tropicais?
- **Q12.** Quão vulneráveis ou resistentes às mudanças climáticas e de uso da terra são as **interações entre espécies** que sustentam a função das florestas tropicais, incluindo interações entre hábitos de vida (árvores, lianas, palmeiras, ervas/gramíneas e bambus)?
- **Q13.** Quais **características funcionais e estruturais das plantas** conferem resiliência ao ciclo do carbono e como elas variam entre os tipos de florestas, gradientes ambientais e verticalmente dentro das florestas?

Além das medições descritas na Seção 3.1.2, a caracterização da biodiversidade em todas as escalas combinará medições in situ que incluem diversidade taxonômica e abundância de plantas e dados de movimentação de animais, coletados por meio de sensores bioacústicos, armadilhas fotográficas, DNA ambiental, Conhecimento Ecológico Indígena (IEK), Conhecimento Ecológico Tradicional (TEK), Conhecimento Ecológico Local (LEK), radar e lidar hiperespectral aerotransportado e radar e lidar hiperespectral por satélite (**EMIT, PRISMA, DESIS, PACE e Planet Tanager**) (**GEDI, EDGE*, NISAR* e BIOMASS***). Esses conjuntos de dados (consulte a Seção 6) permitirão estimativas diretas e indiretas da biodiversidade e fornecerão condições iniciais e referências para modelos de biosfera terrestre baseados em processos que possam representar a diversidade estrutural e funcional (por exemplo, BiomeE, ED/ED2, FATES; Seção 6.3). Esses modelos serão usados para desenvolver a compreensão do processo e a atribuição do papel da biodiversidade nos fluxos de carbono, água e energia, e como essas relações variam dentro dos continentes e entre eles. Para investigar como a biodiversidade e as mudanças na biodiversidade causadas pelo uso da terra afetam a resistência das florestas tropicais aos extremos climáticos, o PANGEA identificará paisagens em gradientes de distúrbio, clima e edáficos e quantificará as relações emergentes entre a composição estrutural/funcional da floresta e a sensibilidade da floresta aos extremos climáticos. Os indicadores de estresse hídrico e função do ecossistema (Seção 3.1.3), por exemplo, serão desenvolvidos usando dados do **SMAP, SMOS, NISAR*, AMSR-E, EMIT, ECOSTRESS, FLEX, TROPOMI e OCO- 2/3**. Essas relações serão aplicadas para restringir modelos inversos e modelos de biosfera terrestre baseados em processos, permitindo que esses modelos atribuam o papel da biodiversidade na atenuação dos impactos da mudança global no sumidouro de carbono da terra tropical.

3.2.2 Processo: Retroalimentação da função do ecossistema e da perturbação

As mudanças nos regimes de perturbação, incluindo secas, incêndios, tempestades e mudanças no uso da terra, estão remodelando as florestas tropicais. As regiões tropicais dos continentes diferem em suas respostas a eventos de perturbação semelhantes, como os eventos do El Niño (Liu et al., 2017). Essas diferenças continentais podem estar associadas a diferenças na resiliência das florestas tanto à ação humana quanto às mudanças climáticas (Bennett et al., 2021; Saatchi et al., 2021); no entanto, os mecanismos subjacentes às diferenças na vulnerabilidade das florestas são elusivos. Da mesma forma, não temos uma quantificação dos fatores determinantes da mortalidade de árvores em grandes escalas e os motivos da maior mortalidade de árvores em diferentes continentes (McDowell et al., 2018; Gora e Esquivel-Muelbert 2021). Parte dessa dificuldade decorre de limitações de escala. Embora furacões, ciclones e tufões produzam distúrbios de tempestades em grande escala em florestas tropicais costeiras, eles não são comuns nos principais locais do PANGEA nas Américas e na África (Walsh et al. 2016). A maioria dos distúrbios relacionados a tempestades ocorre em escalas muito pequenas (<0,1 ha) (Espírito-Santo et al., 2014; Negrón-Juárez et al., 2018; Negrón-Juárez et al., 2023). Esses distúrbios em pequena escala são pequenos demais para serem detectados com métodos de satélite contemporâneos (Cushman et al., 2021). As grandes derrubadas de florestas na Amazônia podem abranger de centenas a milhares de hectares e estão se tornando cada vez mais comuns (Feng et al., 2023b; Urquiza-Muñoz et al., 2024). No entanto, em comparação com os pequenos eventos de windthrow, os grandes windthrows são raros. Muitos distúrbios florestais causados por pequenas tempestades não podem ser atribuídos de forma confiável usando métodos tradicionais de parcelas florestais devido aos intervalos normalmente longos entre os censos de árvores (Arellano et al., 2021). Os dados que descrevem os mecanismos subjacentes à vulnerabilidade das árvores a ventos e raios associados a tempestades também são limitados (Gora et al., 2017; 2020b; Jackson et al., 2019; 2021a, 2021b; Feng et al., 2023a). Em termos mais amplos, a influência relativa da falta de carbono e da falha hidráulica na mortalidade de árvores nos trópicos, bem como os motivadores e mecanismos dessas influências, continuam sendo lacunas importantes de conhecimento (Anderegg et al., 2016; McDowell et al., 2018; Bauman et al., 2022). Compreender a eficiência variável no tempo do uso de carbono e água dos ecossistemas florestais tropicais em relação às tendências de mortalidade de árvores e à absorção e respiração de carbono em escala de ecossistema, particularmente em resposta a eventos extremos, é fundamental para reconciliar a dinâmica de fonte-sumidouro da floresta tropical (Chambers et al., 2004; Peñuelas et al., 2010; Adams et al., 2019). O avanço da compreensão das respostas distintas dos ecossistemas aos eventos de mortalidade e distúrbios requer dados integrados sobre a mortalidade das árvores, a eficiência do uso do carbono e da água e as taxas de recuperação pós-distúrbio, abrangendo regimes de distúrbios, padrões de composição funcional e uso da terra. O PANGEA responderá às seguintes perguntas:

- **Q14.** *Como as mudanças nos regimes de distúrbio estão afetando a **eficiência do uso do carbono (CUE)** e a **eficiência do uso da água (WUE)** de diferentes florestas tropicais?*
- **Q15.** *Como as taxas e os padrões de **mortalidade de árvores** variam dentro e entre as florestas tropicais em resposta a mudanças nos processos forçantes, incluindo clima, mudança no uso da terra e regimes de distúrbio? Como a variabilidade temporal e espacial da mortalidade influencia a heterogeneidade dos estoques e fluxos de carbono tropical nas florestas tropicais?*

Para caracterizar a distribuição espacial e temporal da renovação do dossel e dos distúrbios de degradação nos trópicos, o PANGEA aproveitará os esforços avançados para quantificar a

degradação florestal em escala fina a partir do espaço usando o aprendizado profundo (por exemplo, Dalagnol et al., 2023). Com essa abordagem, o PANGEA investigará a integração de várias fontes de sensoriamento remoto por satélite - dados RGB e lidar de drones e aeronaves, dados ópticos comerciais de alta resolução, **Landsat, Sentinel-1, Sentinel-2, GEDI, NISAR*, BIOMASS* e EDGE*** - **para** avançar no monitoramento da mortalidade de árvores e dos regimes de distúrbios naturais a partir do espaço, de maneiras que foram tentadas anteriormente com dados lidar aéreos (Dalagnol et al., 2021). Os modelos de aprendizagem profunda serão treinados combinando medições de campo de mortalidade e perturbação nas principais paisagens do PANGEA (Seção 6.3) com dados de mortalidade de parcelas de inventário de campo. Para investigar as relações emergentes entre regimes de distúrbio, CUE e WUE em diferentes paisagens, o PANGEA combinará os produtos de mortalidade e degradação florestal com estimativas de alta resolução de WUE e CUE derivadas de dados hiperespectrais, multiespectrais e VOD aéreos e espaciais, incluindo **Landsat, ECOSTRESS, EMIT e AMSR-E**, e testará a robustez dessas relações em locais com fluxos de covariância de Foucault e inventários de parcelas florestais. Os dados aéreos, especialmente os hiperespectrais, serão essenciais para avaliar a escalabilidade dessas métricas de árvores com diferentes e variadas eficiências de uso de carbono e água para ecossistemas inteiros. Os mapas de degradação florestal dependentes do espaço e do tempo serão usados para impulsionar as taxas de perturbação em modelos baseados em processos. Tanto os mapas de mortalidade quanto as relações emergentes entre as taxas de mortalidade e a WUE e a CUE serão usados para a avaliação comparativa de modelos ao longo de gradientes de influência ambiental e antropogênica e entre continentes.

3.2.3 Processo: Dinâmica e gerenciamento da recuperação

Como as mudanças climáticas aumentam a taxa de recorrência de distúrbios naturais, a expansão do desmatamento e da degradação florestal está ampliando ainda mais os regimes de distúrbios climáticos nas florestas tropicais (Armenteras et al., 2006; Portela & Rademacher, 2001; Jusys 2018; Hosonuma et al., 2012). Distúrbios mais frequentes representam uma ameaça à resiliência das florestas tropicais, com o potencial de influenciar transições críticas para estados alternativos (Verbesselt et al., 2016; Whitfield et al., 2019; Falk et al., 2022). Para avaliar esses riscos, no entanto, é imperativo quantificar minuciosamente a frequência com que os distúrbios ocorrem, a resistência do ecossistema aos distúrbios e o tempo de recuperação após os impactos dos distúrbios (Cole et al., 2014; Longo et al., 2018). Embora muitas pesquisas tenham se concentrado nos impactos dos distúrbios (por exemplo, McDowell et al., 2018; Brando et al., 2014), ainda há grandes incertezas sobre as taxas de recuperação. A recuperação de florestas tropicais secundárias e degradadas agora cobre cerca de 10% da área de floresta tropical e tem um grande potencial de sumidouro de carbono (Heinrich et al., 2023). Pesquisas anteriores baseadas em campo indicaram que a trajetória de restauração pós-distúrbio e as taxas de recuperação, bem como as escalas de tempo, variam consideravelmente nos trópicos e dependem da intensidade e do tipo de distúrbio (Poorter et al., 2016; Rutishauser et al., 2015). Além das tempestades, o impacto da conectividade geográfica das mudanças no manejo da terra em diferentes escalas também é fundamental. Por exemplo, mudanças de sistemas de cultivo intensivo para sistemas agroflorestais e gerenciamento de restauração (por exemplo, administração indígena), bem como intervenções voltadas para a conservação, podem resultar em biodiversidade local e restauração de biomassa e maior resiliência de sistemas que apoiarão os meios de subsistência locais (por exemplo, Ebeling & Yasué 2008; Santika et al., 2017; Mills et al., 2019; Pienkowski et al., 2024). As regiões tropicais estão desempenhando um papel cada vez mais importante na agricultura global (Alexandratos e Bruinsma, 2012; Berenguer et al., 2021a) e

há uma imensa pressão sobre as florestas tropicais devido à expansão agrícola decorrente da crescente demanda global por alimentos, fibras e biocombustíveis (Erb et al., 2024; Pendrill et al., 2022). A intensificação agrícola para apoiar as demandas globais e os meios de subsistência locais se beneficiará muito dos métodos de agricultura de precisão e do monitoramento do ciclo biogeoquímico (por exemplo, fósforo e nitrogênio) para garantir soluções sustentáveis. Por outro lado, a intensificação agrícola e os esforços para melhorar a sustentabilidade também podem levar ao vazamento e ao deslocamento de distúrbios para outras geografias (Ewers e Rodrigues, 2008; Gan e McCarl, 2007; Henders e Ostwald, 2014, Meyfroidt et al., 2020; Hertel et al., 2019). Para abordar as lacunas de conhecimento relacionadas à recuperação pós-distúrbio e à resiliência das florestas tropicais ligadas às práticas de gestão da terra, o PANGEA abordará as seguintes questões:

- **Q16.** *Como o tipo e a intensidade do distúrbio - incluindo diferentes usos da terra - influenciam o **tempo de recuperação pós-distúrbio e a trajetória** em direção à estrutura florestal restaurada, à composição de espécies e à função do ecossistema?*
- **Q17.** *Quais **atividades humanas e práticas de gestão** apoiam a resiliência do sumidouro de carbono tropical, incluindo o uso de áreas protegidas e outras medidas de conservação baseadas em áreas (OECMs), como práticas comunitárias indígenas e territoriais, sistemas agroflorestais e práticas de corte seletivo de madeira?*

Para quantificar as escalas de tempo de recuperação pós-distúrbio, o PANGEA integrará dados de inventários de campo em regiões afetadas por distúrbios com informações sobre a idade do distúrbio derivadas de sensoriamento remoto de longo prazo (por exemplo, usando o Landsat) e sensoriamento remoto mais recente da estrutura da floresta a partir de lidar (GEDI, EDGE*, NISAR* e BIOMASS*), usando **Landsat**) e sensoriamento remoto mais recente da estrutura florestal a partir de lidar (airborne lidar, **GEDI, EDGE*, NISAR*** e **BIOMASS***), composição florestal a partir de imagens hiperespectrais (airborne hyperspectral, **EMIT, PRISMA, DESIS, PACE** e **Planet Tanager**), função do ecossistema (**ECOSTRESS, TROPOMI**) e sistemas agrícolas (**Landsat, EMIT, NISAR*, Planet**) para construir cronossequências em paisagens ao longo de gradientes ambientais e de gerenciamento. Essas cronossequências serão usadas para reduzir as incertezas nos modelos baseados em processos que, em seguida, serão usados para atribuir a função dos fatores ambientais e as diferentes características de perturbação nas escalas de tempo de recuperação em todo o domínio do PANGEA. Ao incorporar restrições à recuperação nos modelos, eles poderão simular melhor a recuperação da floresta e as interações complexas entre a composição das espécies, a estrutura da floresta e os fatores ambientais. Isso aumentará a capacidade dos modelos de ecossistema de projetar futuras mudanças nos estoques de carbono sob regimes de perturbação alterados e informar os esforços de conservação e restauração (Héroult e Piconiot, 2018; de Paula et al., 2015; Shi et al., 2024; Zhang et al., 2022).

Com base em várias estruturas de SES, o PANGEA adotará uma perspectiva de sistemas que centraliza os feedbacks entre os sistemas humanos (incluindo governança, política, mercados, normas culturais e valores) e os processos ambientais, para entender melhor como as atividades humanas e as práticas de gerenciamento influenciam a resiliência das paisagens tropicais. O PANGEA aproveitará os esforços contínuos de diversas atividades (por exemplo, **NASA Harvest, SERVIR**) para detectar atividades humanas e agroecossistemas, que permitem o mapeamento e o monitoramento de recursos naturais (Meemken et al., 2024) e avanços no mapeamento de tipos de culturas, rendimentos e riscos de desastres (Jain et al., 2016; Azzari et al., 2017; Meza et al., 2020; Song et al., 2021) necessários para viabilizar os meios de subsistência e melhorar o bem-estar humano. Para abordar a

diversidade de práticas de gestão entre diferentes atores em sistemas tropicais, o PANGEA se baseará na categorização global existente de regimes de gestão (Lesiv et al., 2022), juntamente com informações locais específicas sobre a diversidade de opções de implementação para esses diferentes regimes. O PANGEA também explorará abordagens recentes para extrair informações socioeconômicas de dados de satélite (Yeh et al., 2020). Ao usar métodos que integram dados de sensoriamento remoto com informações e conhecimentos in situ e outros auxiliares, o PANGEA avançará nos mensuráveis do sistema socioecológico tropical e investigará a causalidade para verificar se os feedbacks do SES apoiam a resiliência dos sumidouros de carbono tropical e outros processos do ecossistema.

3.2.4 Processo: Feedbacks do ciclo hidrológico

As florestas tropicais desempenham um papel fundamental no ciclo da água (van der Ent et al., 2010; Spracklen et al., 2018), e as projeções climáticas do CMIP6 indicam aumentos de seca e umidade extremas em diferentes partes dos trópicos (Vogel et al., 2020). O desmatamento de florestas tropicais tem um impacto marcante na precipitação que depende da escala do desmatamento (Spracklen et al., 2018). Mudanças generalizadas induzidas pela degradação nos fluxos de água e energia também poderiam afetar a reciclagem das chuvas nos trópicos, mas essa hipótese ainda não foi testada. A degradação florestal tem um impacto marcante sobre a evapotranspiração e os fluxos de calor sensível (Brando et al., 2019b; Jucker et al., 2018b; Longo et al., 2020; de Oliveira et al., 2021; Rangel Pinagé et al., 2023). Estudos anteriores encontraram uma concordância encorajadora em termos de magnitude e variabilidade sazonal da evapotranspiração entre estimativas de sensoriamento remoto e torres de covariância de Foucault em florestas tropicais (Melo et al., 2021; Salazar-Martínez et al., 2022), mas eles se baseiam em um número muito limitado de locais. Na realidade, há uma variação espacial considerável na magnitude e na sazonalidade da ET em escalas regionais e continentais (por exemplo, Baker et al., 2021; Weerasinghe et al., 2020). Os efeitos combinados das mudanças nos regimes de precipitação, das temperaturas mais quentes e da expansão do desmatamento e da degradação florestal afetam as descargas dos rios, os habitats de água doce e a qualidade da água (Lima et al., 2014; Castello e Macedo, 2016); no entanto, a magnitude prevista desses impactos é incerta (Guimberteau et al., 2017; Farinosi et al., 2019). Compreender os efeitos líquidos dos ciclos hidrológicos nos recursos de água doce também é economicamente importante, pois muitos países nos trópicos dependem da energia hidrelétrica (Arias et al., 2020). Os estudos sobre os recursos de água doce tropical estão concentrados na América do Sul tropical e raramente foram estudados na África e na bacia do rio Congo (Fugère et al., 2016). Além disso, os modelos do Sistema Terrestre têm capacidade limitada de mapear a distribuição espacial da precipitação nos trópicos porque não conseguem representar eventos extremos de precipitação (Negron-Juarez et al., 2024), e há diferenças marcantes na forma como os modelos representam a reciclagem de chuvas nos continentes (Baker e Spracklen, 2022). Os modelos também exigem representações precisas da ET e do fluxo de calor sensível para quantificar a reciclagem da chuva e produtos de sensoriamento remoto para avaliar a ET em escalas regionais. Para abordar essas lacunas de conhecimento, o PANGEA responderá às seguintes perguntas:

- **Q18.** Quais são os **controles hidroclimáticos** diretos e indiretos sobre os ciclos de carbono (incluindo emissões de CO₂ e CH₄), energia e água das florestas tropicais?
- **Q19.** Como a **reciclagem da precipitação** influencia a resiliência ou a **vulnerabilidade do equilíbrio do carbono florestal** com a **mudança dos regimes de distúrbio**, a cobertura da terra e a mudança no uso da terra e o aumento do CO atmosférico?

- **Q20.** Como as mudanças no clima e no uso da terra estão alterando *as propriedades biofísicas da superfície terrestre* que influenciam a força das interações terra-atmosfera?
- **Q21.** Como *o desmatamento, a degradação florestal e a regeneração florestal* alteram *os ciclos hidrológicos regionais nas regiões tropicais, incluindo os regimes de precipitação e os recursos de água doce*?

Para investigar os fatores hidroclimáticos da função do ecossistema nos trópicos, o PANGEA integrará medições meteorológicas e de covariância de vórtices in situ com recuperações de satélite do conteúdo de vapor de água e precipitação (**GOES-R, GPM**), temperatura da superfície terrestre, evapotranspiração e estresse evaporativo (**ECOSTRESS**) e SIF (**FLEX*, TROPOMI, OCO- 2/3**). Além disso, o PANGEA empregará dados do **SMAP, SMOS, NISAR, AMSR-E** e **EMIT** para medir a umidade do solo, o conteúdo de água do dossel, as características hidráulicas e o estresse térmico. Para quantificar ainda mais as propriedades biofísicas da superfície terrestre, o PANGEA também obterá o albedo da superfície e outros fluxos de radiação da superfície do **VIIRS** e do **GOES-R**. As medições hidrológicas de superfície do **SWOT** serão usadas para caracterizar corpos d'água terrestres tropicais (lagos, reservatórios, áreas úmidas) e avaliar os recursos de água doce. Esses conjuntos de dados serão usados em conjunto com a estrutura florestal, a função e as mudanças na composição de espécies associadas ao desmatamento e à degradação florestal (Seção 3.2.3) para avaliar as relações emergentes entre os diferentes tipos de cobertura da terra e a mudança no uso da terra com mudanças na precipitação e no armazenamento de água em todo o domínio do PANGEA. Esses conjuntos de dados também fornecerão condições iniciais e de limite para modelos baseados em processos (Seção 6.3) que exploram a extensão do desmatamento e da degradação florestal e fornecerão referências sobre os impactos do desmatamento e da degradação nos ciclos de água, energia e carbono em diferentes escalas de paisagem. As medições terrestres e os conjuntos de dados aéreos e de satélite obtidos por meio do PANGEA também fornecerão conjuntos de dados essenciais para avaliar a capacidade dos modelos do sistema terrestre de representar a reciclagem da precipitação nos diferentes continentes.

3.3 Projeções

3.3.1 Projeções: Ciclos de carbono, água, energia e nutrientes

Os padrões futuros de precipitação nos trópicos são incertos, mas as simulações do modelo do sistema terrestre sugerem que a América do Sul tropical pode sofrer reduções na precipitação média anual, enquanto a precipitação média anual na África Central pode permanecer semelhante ou até mesmo aumentar (Dobler et al., 2024). Entretanto, a estabilidade na precipitação média anual não significa estabilidade no ciclo hidrológico. Por exemplo, a sazonalidade das chuvas pode se tornar mais pronunciada com uma variabilidade interanual mais forte (Gloor et al., 2013), e as tendências de aquecimento podem aumentar a secura atmosférica e do solo, mesmo que a precipitação permaneça semelhante às médias históricas (Cook et al., 2020; Ukkola et al., 2020). Os efeitos do CO₂ atmosférico no hidroclima dependem de vários fatores que interagem entre si e são incertos. Por exemplo, o alto CO₂ pode reduzir a transpiração no nível das folhas devido à menor condutância estomática (Sampaio et al., 2021), mas as alterações no índice de área foliar e no número de estômatos também afetarão a resposta no nível do ecossistema (Li et al., 2018). O desmatamento e a degradação florestal na Amazônia (Spracklen et al., 2018; Baudena et al., 2021) podem afetar as chuvas por meio de grandes impactos na evapotranspiração, na interceptação do dossel, no escoamento e no armazenamento de

água (Heerspink et al., 2020), embora haja grande incerteza sobre a magnitude desse efeito em estudos de modelagem (por exemplo, Pires e Costa 2013; Swann et al., 2015).

As mudanças no hidroclima, no CO atmosférico₂, na cobertura da terra e na mudança do uso da terra também interagem com as mudanças no ciclo de nutrientes, e a compreensão desses feedbacks é fundamental. A disponibilidade de fósforo e potássio influencia a produtividade primária líquida durante as secas (Manu et al., 2024), e o nitrogênio pode ser um fator limitante importante nas florestas secundárias (Davidson et al., 2007). Pesquisas sugerem que os efeitos da fertilização com CO₂ podem ser bastante reduzidos quando o fósforo é um fator limitante (Yang et al., 2016; Fleischer e Terrer, 2022). No entanto, nossa compreensão dos feedbacks entre o ciclo de nutrientes e outros fatores (clima, fertilização por CO₂ e mudanças na cobertura e no uso da terra) vem de experimentos manipulativos pequenos e localizados, o que torna desafiador o dimensionamento para paisagens altamente heterogêneas e escalas continentais (Townsend et al., 2008). Ao integrar medições coordenadas em paisagens e escalas, o PANGEA abordará as seguintes questões:

- **Q22.** *Como as mudanças nos padrões de precipitação, o aumento das temperaturas e a mudança na dinâmica de distúrbios nas florestas tropicais alterarão o **balanço hídrico terrestre** por meio de mudanças no tempo e na duração da precipitação sazonal, na evapotranspiração e na umidade do solo?*
- **Q23.** *Como **as futuras mudanças na vegetação**, incluindo o desmatamento, a degradação e a rebrota, afetarão o clima e a hidrologia locais, regionais e continentais?*
- **Q24.** *Como o aumento das temperaturas, o CO atmosférico₂ e os eventos climáticos extremos afetarão **a disponibilidade de nutrientes** e **as interações entre o solo e a vegetação**?*

Considerando que essas perguntas explorarão simulações de mudanças futuras nos trópicos, o PANGEA usará modelos baseados em processos (Seção 6.3) que serão totalmente integrados ao sensoriamento remoto (Seção 6.2). Por exemplo, para inicializar modelos mecanicistas baseados em coortes e indivíduos com estrutura e composição florestais realistas e observadas em gradientes ambientais, o PANGEA integrará dados multiespectrais, hiperespectrais, lidar e de radar coletados por meio de campanhas aéreas do PANGEA e de medições por satélite (**GEDI, EMIT, VIIRS, Sentinel-3, NISAR***, imagens **SBG** de infravermelho visível a ondas curtas [**VSWIR***]). As relações emergentes com base no sensoriamento remoto relacionadas à estrutura, composição e função da floresta (Seção 3.1.2), bem como as variáveis de hidroclima e estresse hídrico com sensoriamento remoto (Seção 3.1.3) serão usadas para avaliar e reduzir a incerteza do modelo. Além disso, as concentrações de nutrientes no dossel, estimadas a partir de recuperações de sensoriamento remoto hiperespectral orientadas por características geomorfológicas derivadas de lidar, serão usadas para informar os padrões e os fatores determinantes das distribuições de nutrientes em paisagens heterogêneas de florestas tropicais. Em seguida, os modelos otimizados serão aplicados a uma série de simulações representativas para quantificar e distinguir as funções das mudanças no clima, no CO atmosférico₂, na cobertura e no uso da terra para promover mudanças nos ciclos biogeofísicos e biogeoquímicos.

3.3.2 Projeções: Resiliência florestal heterogênea

As mudanças climáticas e a expansão do desmatamento e da degradação florestal nos trópicos provavelmente expõem as florestas a distúrbios antropogênicos e naturais mais frequentes (Seidl et al., 2017; Lapola et al., 2023). Mudanças generalizadas nos regimes de distúrbios terão efeitos profundos na estrutura, composição e função do ecossistema e, por sua vez, nos muitos serviços

ecossistêmicos locais, regionais e globais que as florestas tropicais fornecem (Malhi et al., 2014). No entanto, o impacto de longo prazo da mudança dos regimes de distúrbios nas florestas tropicais dependerá, em última análise, de vários fatores que ainda são pouco compreendidos nos ecossistemas tropicais: (1) o impacto relativo das mudanças de intensidade e frequência dos distúrbios (Williams et al., 2013); (2) a variabilidade da resiliência aos distúrbios e a recuperação pós-distúrbio entre espécies e paisagens (Anderson-Teixeira et al, 2013, Powell et al., 2018; Liu et al., 2022); (3) as interações entre vários distúrbios que afetam a mesma região; (4) os feedbacks entre as mudanças na estrutura e na composição da floresta causadas por distúrbios e os distúrbios subsequentes ou adicionais (Silvério et al., 2019; Brando et al., 2020b); e (5) os impactos dos distúrbios nos serviços ecossistêmicos e nos meios de subsistência das pessoas (Mamalakis et al., 2021). O avanço da quantificação baseada em observação e a compreensão do processo desses fatores são fundamentais para melhorar os recursos de modelagem. Portanto, a pesquisa no PANGEA abordará as seguintes questões:

- **Q25.** Em um clima em mudança, quais **tipos de floresta funcionalmente distintos** são mais vulneráveis a se tornarem fontes líquidas de carbono para a atmosfera, quais tipos de floresta são resilientes e por quê?
- **Q26.** Como o aquecimento climático e a mudança de eventos extremos interagirão com a cobertura e a mudança do uso da terra para influenciar **a mudança dos regimes de incêndio** e seus feedbacks com a função florestal e o clima?
- **Q27.** Como as futuras mudanças no clima e os eventos extremos afetarão o ciclo de carbono nas florestas tropicais e qual é o limite para que isso resulte em uma **transição em larga escala** na composição funcional e/ou para que as regiões se tornem uma fonte líquida de carbono?
- **Q28.** Como as mudanças climáticas e de uso da terra interagirão com a vulnerabilidade variável das florestas tropicais para influenciar a disponibilidade de serviços ecossistêmicos e o acesso a **co-benefícios socioecológicos**, incluindo disponibilidade de água, produção agrícola, saúde humana, redução de riscos de desastres e práticas culturais?

Modelos de sistemas socioecológicos e baseados em processos (por exemplo, modelos baseados em agentes, bioeconômicos, de desequilíbrio ou de rede) serão usados para quantificar os impactos das mudanças nos regimes de distúrbio em florestas tropicais hiperdiversas e as consequências para as provisões e serviços do ecossistema que podem afetar as atividades econômicas e a subsistência dos Povos Indígenas e das Comunidades Locais. Para modelos baseados em processos, o PANGEA usará a mesma abordagem descrita na Seção 3.3.1 para gerar condições iniciais e de limite. Da mesma forma, as relações emergentes entre a diversidade funcional e as taxas de recuperação serão derivadas usando dados de medições terrestres e pesquisas socioecológicas conduzidas com pesquisadores e comunidades locais, campanhas aéreas combinadas com fluxos de dados do SIF (**TROPOMI, OCO-2/3, FLEX***), medições de infravermelho térmico (**ECOSTRESS, GOES-R, MTG- I**) e as cronosequências de recuperação do ecossistema com base em sensoriamento remoto (Seção 3.2.3). Para quantificar os impactos das florestas tropicais nos co-benefícios socioecológicos, o PANGEA realizará pesquisas integradas de sistemas socioecológicos para entender melhor os padrões e a influência do uso da terra e suas mudanças, incluindo desmatamento, degradação, restauração florestal, secas e inundações, regimes de incêndio e temperaturas extremas nos biomas tropicais. O PANGEA também estudará os feedbacks entre os sistemas sociais e ecológicos, abrangendo desde o manejo florestal tradicional, local e indígena até os sistemas industriais, e como esses sistemas afetam a resiliência do ecossistema e o fornecimento de serviços ecossistêmicos. O PANGEA integrará dados

sociais e ecológicos aos modelos existentes (por exemplo, Andersen et al., 2017; von Essen e Lambin, 2023) e desenvolverá novos modelos para capturar os feedbacks nos sistemas socioecológicos sob diferentes condições econômicas, culturais, ambientais e de governança.

4 Avanço científico e técnico do PANGEA

O PANGEA aproveitará décadas de esforços científicos, incluindo grandes projetos como o LBA (Avissar et al., 2002; Davidson et al., 2012), redes internacionais de parcelas de inventário florestal (por exemplo, ForestPlots.net et al, 2021) e vários esforços de desenvolvimento de modelos, incluindo (mas não se restringindo a) o Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) da NASA, o GISS BiomeE da NASA (Weng et al., 2022) e o modelo FATES apoiado pelo DOE que está sendo desenvolvido como parte do NGEE-Tropics (Koven et al., 2020; Huang et al., 2020; Xu et al., 2023; Knox et al., 2024; Shuman et al., 2024). Apesar desses esforços, as tentativas de avaliar a resiliência das florestas tropicais a distúrbios têm obtido resultados inconsistentes. Estudos de campo sugerem que as florestas da África Central podem ser mais resistentes às mudanças nas condições climáticas e podem oferecer um sumidouro de carbono de longo prazo em comparação com outras florestas tropicais (Hubau et al., 2020; Bennett et al., 2021). No entanto, estudos de sensoriamento remoto por satélite indicam que as florestas da África Central são tão sensíveis às anomalias climáticas quanto a Amazônia e outras regiões de florestas tropicais (Liu et al., 2017; Palmer et al., 2019). As inconsistências entre as medições de campo e as observações de satélite devem ser reconciliadas para prever o impacto das mudanças climáticas sobre o papel dessas florestas nos ciclos globais de carbono e água. Diversos fatores podem explicar essas inconsistências, incluindo (1) taxas variáveis de mortalidade de árvores, (2) sensibilidade diferente da fotossíntese, taxas de respiração e outros processos do ecossistema (que alteram os fluxos líquidos de carbono e água) a distúrbios naturais e antropogênicos, (3) diferentes intensidades e padrões de desmatamento e degradação na estrutura e função do ecossistema, (4) diferentes trajetórias evolutivas que resultaram em biodiversidade única e interações de espécies que influenciam diretamente a resiliência do ecossistema (por exemplo, abundância variável de megafauna nas florestas tropicais) e (5) dados espaciais e temporais limitados e modelos incompletos ou pouco desenvolvidos.

O PANGEA investigará os fatores que podem explicar as diferenças nas respostas das florestas tropicais em diferentes continentes, as inconsistências (mencionadas acima) e outros fatores determinados pela comunidade do PANGEA, acrescentando uma visão pan-tropical, obtendo novos conhecimentos a partir de medições de sensoriamento remoto multidimensional aprimoradas com medições colocalizadas e coincidentes e novas análises. O PANGEA enfatiza a integração de medições de solo e conjuntos de dados de sensoriamento remoto para florestas tropicais, apoiando o desenvolvimento de algoritmos e modelos de sensoriamento remoto e a integração de dados de modelos. Prevemos avanços científicos significativos a partir de medições remotas e terrestres coordenadas e colocalizadas e do uso de informações das partes interessadas, incluindo aquelas provenientes do conhecimento ecológico indígena, tradicional e local, incorporadas em um esforço científico colaborativo que prioriza a transdisciplinaridade. Para avançar nas capacidades e soluções científicas e tecnológicas, o PANGEA irá

- **Elucidar** os padrões de mudanças recentes (5 a 30 anos) e contínuas em paisagens, dinâmicas e feedbacks de florestas tropicais e suas diferenças geográficas, com ênfase em comparações entre as Américas e a África.

- **Aumentar** a compreensão dos processos que controlam a heterogeneidade e a vulnerabilidade das paisagens florestais tropicais às mudanças estruturais e funcionais.
- **Avançar** os recursos de sensoriamento remoto para medir, mapear e monitorar a biodiversidade, a dinâmica do ciclo de carbono e os sistemas agrícolas.
- **Fornecer** projeções aprimoradas de mudanças futuras em paisagens de florestas tropicais, que incluirão os feedbacks em climas locais, regionais e globais e sistemas socioecológicos.

Esses avanços científicos serão possibilitados por avanços técnicos:

- **Integração** de recuperações de sensoriamento remoto e terrestre, levando a calibrações mais confiáveis de variáveis de sensoriamento remoto;
- **Dimensionamento** de dados e fluxos de trabalho para análise integrada de dados terrestres e de sensoriamento remoto;
- **Avanços** no uso de IA e aprendizado de máquina para assimilação, fusão e dimensionamento de dados;
- **Desenvolvimento** de integração de modelo de dados que melhora a representação dos componentes funcionalmente importantes da diversidade de florestas tropicais que são escalonáveis com sensoriamento remoto;
- **Melhoria** da precisão e validação, e estimativas **refinadas** de incerteza para produtos de dados derivados de sensoriamento remoto.

O PANGEA caracterizará a estrutura e a função do ecossistema em várias dimensões, de ecossistemas florestais tropicais intactos a degradados e de alta a baixa diversidade. O PANGEA medirá a diversidade filogenética e taxonômica das árvores e as taxas demográficas da vegetação, usando dados de solo existentes de parcelas de inventário florestal de longo prazo, e a diversidade funcional e estrutural usando sensoriamento remoto. As imagens hiperespectrais de sensoriamento remoto coincidentes e as medições de características foliares in situ mapearão as características do dossel e as comunidades funcionais distintas, além de avaliar modelos escalonáveis, aproveitando as medições de satélite. Com esse resultado, caracterizaremos as diferenças entre gradientes abióticos, de uso da terra e bióticos. Os aprimoramentos resultantes em nossa compreensão das distribuições de características melhorarão nossos modelos de fluxos de ecossistemas sob mudanças climáticas e forçantes de mudanças no uso da terra e nos permitirão avaliar as diferenças nas respostas dos ecossistemas. Com essa combinação de medições e modelos, o PANGEA abordará como as diferentes estruturas e funções das florestas tropicais influenciam a estabilidade das florestas tropicais em face dos impactos do uso da terra e das mudanças climáticas.

A integração de dados terrestres e de sensoriamento remoto com o desenvolvimento e a avaliação do modelo é parte integrante do PANGEA (Seção 6.3). As medições de sensoriamento remoto e in situ (por exemplo, hiperespectral e lidar) em gradientes críticos serão usadas para reduzir a incerteza dos parâmetros e fornecer condições iniciais e de limite para modelos baseados em processos. As equipes do PANGEA empregarão modelos de inteligência artificial e aprendizado de máquina para obter conjuntos de dados de síntese que dimensionem as medições em locais intensivos do PANGEA e locais de parceiros para os domínios centrais e estendidos do PANGEA usando sensoriamento remoto por satélite. Esses conjuntos de dados de síntese serão usados para parametrizar e avaliar modelos baseados em processos e modelos de sistemas socioecológicos em grandes escalas e fornecerão condições de limite para modelos inversos. A integração de modelos e dados será fundamental para responder às principais perguntas do PANGEA (Seção 3), que servirão de base para

muitos estudos que buscam (1) entender o papel da diversidade estrutural e funcional no controle dos ciclos de carbono, água, energia e nutrientes das florestas tropicais; (2) investigar como o aumento dos níveis de CO₂ e o aumento das temperaturas afetam especificamente as taxas de sequestro de carbono nas florestas tropicais; (3) quantificar os impactos de eventos extremos, como secas severas, sobre a saúde das florestas e as emissões de CO₂ e CH₄; (4) aumentar a compreensão das consequências do desmatamento e da degradação florestal sobre a biodiversidade, os ciclos biogeofísicos e biogeoquímicos, os serviços ecossistêmicos e o hidroclima; (5) avaliar a eficácia das estratégias de restauração sobre a resiliência das florestas tropicais e a mitigação das mudanças climáticas; e (6) caracterizar o risco de as florestas tropicais atingirem transições críticas para estados alternativos devido às mudanças climáticas, ao desmatamento e à degradação florestal, e determinar o papel da biodiversidade na mitigação dessas vulnerabilidades.

5 Papel crítico do sensoriamento remoto da NASA

O PANGEA tem como objetivo determinar se diferentes florestas tropicais terão o mesmo destino ou variação em suas respostas aos efeitos das mudanças climáticas e de uso da terra, com foco especial nos continentes da África e das Américas, que abrigam as duas maiores florestas tropicais da Terra.

A identificação dos processos que resultam na estabilidade das florestas tropicais é fundamental para restringir a incerteza nas previsões da dinâmica futura do fluxo de carbono terrestre. Para conciliar as diferenças entre os conjuntos de dados terrestres e de satélite, para melhorar as estratégias de dimensionamento, para avançar no monitoramento futuro e para caracterizar como e por que as florestas tropicais da África Central e da América diferem em sua resistência às rápidas mudanças climáticas, precisamos de recuperações aéreas coordenadas. Por exemplo, é necessária uma resolução espacial suficientemente alta (~2-5 m) para dimensionar adequadamente a dinâmica das folhas e árvores em nível de organismo para as paisagens, servindo como um intermediário entre as medições de campo e as observações de satélite (**Figura 14**). O PANGEA se baseia diretamente nos desenvolvimentos e sucessos de escala do NASA ABoVE na América do Norte (por exemplo, Virkkala et al., 2021; Peltola et al., 2019; Braghieri et al., 2023), que lançam uma nova luz sobre sistemas árticos anteriormente pouco estudados.

Para atender a seus objetivos científicos, o PANGEA aproveitará o Programa de Ciência Aérea da NASA para obter dados de alta resolução de sistemas hiperespectrais, lidar de pequeno porte, radar de abertura sintética (SAR) e outros sistemas de sensoriamento remoto sobre florestas tropicais na África Central e nas Américas. -A obtenção de dados de alta resolução espacial e espectral nessas regiões permite uma avaliação sem precedentes da dinâmica florestal, incluindo fluxos, crescimento, mortalidade e estratégias funcionais (por exemplo, eficiência no uso de nutrientes e água, fenologia) na resolução de árvores individuais em grandes paisagens que variam em sua composição de espécies, características do solo, topografia, regimes de perturbação e interações humanas.

A cobertura persistente de nuvens é um problema significativo ao usar o XCO₂ e o XCH₄ baseados no espaço para restringir os fluxos de gases de efeito estufa tropicais (por exemplo, Rayner et al., 2002; Qu et al., 2021). Mesmo com a resolução espacial mais alta dos atuais sensores de satélite de órbita baixa da Terra que recuperam o XCH₄ (por exemplo, **TROPOMI** [3,5 km × 7,0 km]) e o XCO₂ (por exemplo, **OCO-2** [1,3 km × 2,2 km]), mais de 95% das informações recuperadas são filtradas devido às

nuvens nos trópicos (Qu et al., 2021). Sensores de satélite XCO₂ e XCH₄ de maior resolução espacial, como o recém-lançado MethaneSat (100 m × 400 m), melhorarão muito a capacidade de recuperar o fluxo tropical por meio de lacunas de nuvens. Outros sensores de satélite de mapeamento de fonte pontual (por exemplo, **EMIT, GHGSat, Carbon Mapper, PRISMA**) foram lançados com resolução espacial muito alta (<100 m × 100 m). Entretanto, essas observações no modo alvo não fornecerão a cobertura global necessária para restringir os orçamentos de gases de efeito estufa tropicais. A cobertura de nuvens também afetará as estimativas da temperatura da superfície terrestre e da evapotranspiração do sensoriamento remoto térmico, o que exigirá abordagens de correção de viés (Van Niel et al., 2012).

O PANGAEA obterá uma grande variedade de observações aéreas e terrestres coincidentes com as ultrapassagens de satélites existentes da NASA (por exemplo, **OCO-2/3, EMIT, PACE, VIIRS, SMAP, GRACE, SWOT, AMSR-E, AMSR2, ICESat-2, Landsat, GEDI**), internacionais (por exemplo, TROPOMI, GOSAT, GOSAT-2, CO2M, RADARSAT, Envisat, PRISMA, DESIS), comerciais (por exemplo, GHGSat, MethyM, RADARSAT, Envisat, PRISMA, DESIS), **TROPOMI, GOSAT, GOSAT-2, CO2M, RADARSAT, Envisat, PRISMA, DESIS** e produtos de satélite comerciais (por exemplo, **GHGSat, MethaneSat, WorldView, QuickBird/GeoEye, Planet**). Essas observações ajudarão na validação dos dados obtidos por esses satélites sobre estrutura florestal, características foliares, diversidade florestal, inundação, precipitação, dinâmica de distúrbios e composição atmosférica. Elas também ajudarão a avaliar a capacidade de futuros sensores de satélite planejados (por exemplo, **NISAR, SBG, BIOMASS, CHIME** (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment), **GLIMR, FLEX, Carbon Mapper**) e estratégias de observação. O PANGAEA permitirá a investigação das características necessárias dos instrumentos (por exemplo, precisão, exatidão, resolução espacial/espectral) e das estratégias de observação (por exemplo, órbita terrestre baixa versus geoestacionária) para monitorar as emissões de gases de efeito estufa e as muitas variáveis que impulsionam a dinâmica de fonte-sumidouro tropical.

6 Estratégia de pesquisa e desenho do estudo

De forma semelhante aos projetos anteriores da NASA, o PANGAEA permitirá que os pesquisadores estudem as principais questões científicas (*Seção 3*) respondendo às chamadas de propostas da NASA. O cofinanciamento será buscado; portanto, apresentamos um projeto modular e flexível. A pesquisa integrará investigações e modelos científicos terrestres, aéreos e baseados em satélites para permitir a interpretação eficaz dos dados atuais e futuros baseados em satélites. Com base em projetos anteriores da NASA nos trópicos, o PANGAEA será concebido em conjunto com instituições e parceiros locais para facilitar colaborações e criar novos relacionamentos na comunidade científica, com ênfase especial nas interações entre cientistas dos EUA e de países com florestas tropicais. Ao longo da definição científica e dos anos do projeto, o PANGAEA trabalhará para envolver e treinar cientistas em início de carreira, tanto dos EUA quanto de instituições locais de florestas tropicais. O PANGAEA deixará um legado de dados abertos, ciência aberta, desenvolvimento de capacidade e parcerias fortalecidas, fornecendo uma base sólida para pesquisas futuras.

6.1 Abordagem geral do estudo

A compreensão das florestas tropicais em escalas globais e relevantes para as políticas requer sensoriamento remoto por satélite.

A utilidade do sensoriamento remoto em florestas tropicais depende da integração de dados e conhecimentos em várias escalas. A abundância de novos dados de satélite, aéreos e terrestres agora pode ser combinada com novos recursos para análise de dados. Também existe agora uma capacidade muito maior de realizar análises numericamente intensivas em comparação com projetos anteriores de TE da NASA, como o LBA, com computação em nuvem, recursos computacionais avançados e recursos de aprendizado de máquina e IA em rápida evolução para classificação, regressão e previsão. No entanto, a escassez de observações e dados de rótulos para treinamento e validação de modelos de IA que consomem muitos dados, além do conhecimento limitado do processo ecológico para regiões tropicais até o momento, levou a desafios significativos no aprimoramento dos produtos de satélite e na interpretação das descobertas científicas obtidas com esses produtos. Ainda existem incompatibilidades de escala para os resultados desejados de quase todos os satélites sobre os trópicos. Para superar essas limitações e aumentar a utilidade do sensoriamento remoto por satélite em biomas de florestas tropicais, o PANGEA baseia-se em abordagens de escala desenvolvidas durante projetos de campo anteriores do TE da NASA, como BOREAS, LBA e ABoVE. O PANGEA reconciliará as incompatibilidades de escala por meio de medições colocadas em solo, torre, drone, aeronave e satélite, em combinação com avanços na compreensão dos processos que sustentam a teoria de escala. O restante da Seção 6 descreve a Estratégia da Ciência em Escala (Seção 6.1.1), o Cronograma Ncional (Seção 6.1.2), as Medições Científicas Essenciais em todas as escalas (Seção 6.2), bem como a abordagem de Modelagem, Síntese de Dados e Análise Integrativa para unir tudo isso (Seção 6.3).

6.1.1 Estratégia de ciência em escala do PANGEA

O projeto de amostragem aninhada do PANGEA e a estratégia de ciência em escala oferecem oportunidades para avançar no monitoramento por satélite, no desenvolvimento de produtos, na assimilação de dados e na avaliação comparativa de processos em modelos de ecossistemas de última geração. Esses avanços podem melhorar significativamente a capacidade das partes interessadas de aplicar modelos para melhorar a compreensão e a previsão de longo prazo dos processos.

A estratégia de ciência em escala do PANGEA implementa uma abordagem de sistemas integrados que abrange mosaicos de paisagens complexas que vão de florestas a áreas úmidas e turfeiras, de florestas intactas a perturbadas e sistemas agrícolas e socioecológicos. Para garantir que os processos sejam capturados em uma ampla diversidade de condições ambientais e várias fontes de dados - sensores de solo, torres, drones e aeronaves - os projetos de campo e aéreos do PANGEA incluirão amostragem em gradientes de estrutura e função do ecossistema, clima, geomorfologia e solos, disponibilidade de nutrientes e regimes de perturbação. A incorporação dessa variabilidade é fundamental para o dimensionamento regional e pan-tropical e para informar os modelos e garantir

que eles possam ser avaliados e comparados em diferentes condições, reduzindo assim o risco de equifinalidade - obter as respostas certas devido à compensação pelos motivos errados. A escolha dos gradientes prioritários levará em conta as incertezas atuais dos modelos e os novos processos que ainda não foram avaliados com dados de sensoriamento remoto em escala (por exemplo, mudanças temporais na estrutura e na composição do dossel e seus impactos nos fluxos de energia, água e carbono; respostas hidráulicas das plantas à variabilidade climática).

As recuperações de sensoriamento remoto suborbital (por exemplo, drones e aeronaves) são essenciais para a escala entre as medições terrestres e as recuperações de satélites de resolução mais grosseira. O PANGEA se baseia em projetos aéreos e de campo da NASA muito bem-sucedidos na África e nas Américas, incluindo SAFARI 2000, AfriSAR-1 e -2, BioSCape e várias missões Earth Venture Suborbital (EVS).

As diferenças entre a área de cobertura de aproximadamente 1 km dos fluxos de covariância de Foucault baseados em torres e as recuperações de satélite com resolução de >2 km da produtividade primária bruta, fluxos de metano e respiração do ecossistema exigem reconciliação (por exemplo, Li et al., 2018). Da mesma forma, a recuperação de atributos estruturais em nível de árvore e copa a partir do lidar é necessária para vincular os processos e a dinâmica do organismo às respostas do ecossistema observadas em escalas de paisagem. Além disso, foi demonstrado que a variação vertical na estrutura da floresta varia de acordo com a função do ecossistema, mesmo quando as métricas integradas verticalmente, como o índice de área foliar (LAI), não variam (Ordway et al., 2022). O lidar espacial produz observações em escala comunitária que, embora incrivelmente valiosas, permanecem insuficientes para serem combinadas com medições in situ em nível de árvore. Como esses dados espaciais excedem as dimensões de uma copa de árvore, eles não suportam a recuperação de métricas em nível de copa e de árvore, ou métricas de ecossistema em escala fina, como detecção de lacunas na copa e mortalidade de árvores.

Outro exemplo é o uso de dados de sensoriamento remoto hiperespectral para estimar métricas de biodiversidade. As recuperações hiperespectrais do topo do dossel do EMIT, PACE, SBG e CHIME têm o potencial de gerar recuperações diretas da diversidade espectral das plantas (Cawse-Nicholson et al., 2021; Schimel et al., 2020), que também podem ser usadas para estimar a diversidade do ecossistema (Féret e Asner, 2014) e beta (Schweiger e Laliberte, 2022), a diversidade funcional das plantas (Cawse-Nicholson et al., 2021; Rocchini et al., 2022; Thompson et al., 2021) e, em alguns casos, a diversidade taxonômica das plantas (Schimel et al., 2020; Rossi e Gholizadeh, 2023). A fusão dessas recuperações e métricas com dados e conhecimentos sobre movimentação de animais, interações planta-animal, montagem de comunidades multitáxicas e variação estrutural do ecossistema a partir de IEK, TEK e LEK, bem como eDNA, bioacústica, armadilhas fotográficas e outros conjuntos de dados de sensoriamento remoto (por exemplo, **GEDI, NISAR, SWOT**) tem o potencial de gerar estimativas e indicadores indiretos adicionais de biodiversidade. Essa abordagem integrativa pode, por exemplo, melhorar a implementação de programas de incentivo baseados em carbono (Castro-Magani et al., 2021) ou melhorar os serviços nacionais e maximizar os benefícios sociais (Schiavon et al., 2023). No entanto, atualmente faltam dados de calibração e validação nos trópicos para testar a generalização dos algoritmos existentes. Por exemplo, a resolução espectral adequada, o tamanho do pixel e a coexistência de várias espécies de árvores em um determinado pixel, ou a resolução temporal para quantificar os processos diurnos característicos associados a essas espécies, precisam ser abordados adequadamente (Schimel et al., 2020; Rocchini et al., 2022). A diversidade de

membros finais é uma abordagem para lidar com alguns desses desafios (Rossi e Gholizadeh, 2023). Além disso, os mapas de características funcionais ainda exigem estimativas usando modelos calibrados para locais específicos com base em medições de características foliares in situ (por exemplo, Chadwick e Asner 2016a), e um trabalho muito limitado foi realizado para explorar a fusão de tipos de dados diferentes para desenvolver métricas ou indicadores baseados em processos (Mairota et al., 2015; Schimel et al., 2020; Ordway et al., 2022; Portillo-Quintero et al., 2022).

O PANGEA se coordenará com as estruturas de dimensionamento existentes, facilitando a padronização dos métodos de coleta de dados.

A equipe EMIT da NASA está trabalhando ativamente com a Rede Nacional de Observatórios Ecológicos (NEON) para desenvolver fluxos de trabalho de escala entre NEON e dados de satélite em preparação para a próxima missão de Biologia e Geologia de Superfície (SBG) da NASA. As aquisições terrestres e aéreas do PANGEA estenderão esses fluxos de trabalho para os trópicos. O PANGEA também se coordenará com os esforços existentes financiados pela NASA, como o [CMS4D](#), um sistema protótipo de fusão de dados em várias escalas para o monitoramento da dinâmica do carbono a partir do espaço. O CMS4D, liderado por Carlos Alberto Silva, é um estudo de caso no Cerrado brasileiro com foco na dinâmica do fogo, que tem muitos paralelos de fluxo de trabalho com o PANGEA. A coordenação com esses esforços para padronizar e harmonizar a coleta de dados e os fluxos de trabalho de dimensionamento ajudará a garantir dados consistentes e de alta qualidade, permitindo uma colaboração mais ampla e a validação cruzada dos resultados. Um excelente exemplo desse tipo de trabalho colaborativo é a High-Latitude Drone Ecology Network (HiLDEN) (<https://arcticdrones.org/>), que o PANGEA pretende imitar em biomas tropicais. O PANGEA também se baseará em outros esforços de colaboração em campo, como a iniciativa da Society for the Protection of Underground Networks (SPUN), que se concentrou na amostragem de fungos micorrízicos em áreas historicamente pouco amostradas (<https://www.spun.earth/>). Essas redes demonstram o poder da coordenação e do envolvimento no nível do solo para preencher as lacunas nos dados do ecossistema, uma abordagem que o PANGEA adotará em suas várias escalas de estudo. Essa abordagem multiescalar dos conjuntos de dados de campo, aéreos e de satélite promoverá o monitoramento por satélite e a capacidade dos modelos de próxima geração de simular processos importantes e melhorar as previsões de longo prazo dos ecossistemas.

O avanço efetivo do uso do sensoriamento remoto por satélite exige uma coleta de dados e informações rigorosa, criativa e cuidadosa, além da integração do conhecimento em escalas espaciais e temporais. Uma década de esforços coordenados durante a NASA ABoVE avançou a compreensão das transições e não linearidades do bioma boreal, revelando tendências de resiliência crescentes e decrescentes espacialmente explícitas (Zhang et al., 2024) e produzindo um novo sistema de benchmarking de modelo específico de bioma (Stofferahn et al., 2019). O PANGEA se baseará na teoria de escalonamento avançada pela ABoVE e integrará ainda mais o ML/AI com dados de sensoriamento remoto para avançar na medição e no monitoramento de processos heterogêneos, dinâmicas e mudanças em regiões de florestas tropicais, incluindo a dinâmica de fonte/sumidouro de fluxo de carbono, classificação de uso da terra, modelagem de distribuição de espécies, estimativa de índice de área foliar e previsões climáticas. O PANGEA oferece oportunidades para modelos numéricos que representam processos que medeiam a diversidade florestal e as interações de florestas estruturalmente heterogêneas com o clima, o uso da terra e os ciclos biogeoquímicos (por

exemplo, Rödig et al., 2019; Longo et al., 2020; Schneider et al., 2023). A Seção 6.3.3 descreve com mais detalhes a modelagem, a síntese de dados e a abordagem de integração do PANGEA.

O PANGEA melhorará nossa capacidade de ampliar os limites do que podemos inferir com os sensores de satélite e definir melhor as limitações, permitindo que a comunidade de pesquisa concentre esforços e recursos onde precisamos de informações para complementar a pesquisa de sensoriamento remoto e obter maior compreensão da função da floresta tropical.

A cobertura persistente de nuvens, por exemplo, é uma limitação importante para os sensores ópticos em florestas tropicais (por exemplo, Landsat, EMIT, OCO-2/3). Embora aspectos da enorme biodiversidade das florestas tropicais possam ser estudados a partir do espaço, é improvável que as observações espaciais substituam os inventários de espécies de estudos terrestres. É improvável que os táxons não vegetais sejam revelados por investigações baseadas em satélites em florestas tropicais, embora alguns aspectos da biodiversidade não vegetal possam ser previstos a partir de dados de satélite. O denso dossel vegetal das florestas tropicais também bloqueia nossa visão do solo e de outras dinâmicas subterrâneas. É urgente interrogar e esclarecer os recursos e os limites do sensoriamento remoto dos trópicos por meio de avanços metodológicos e computacionais e da fusão de dados para orientar as atividades de pesquisa e implementação em terra e os esforços de monitoramento de longo prazo em várias escalas. Consulte o *Apêndice D* para ver as *atividades de pesquisa e monitoramento planejadas e em andamento* que podem se beneficiar do PANGEA.

6.1.2 Cronograma teórico do projeto

O Escritório de Projetos do PANGEA desenvolverá o cronograma definitivo do projeto. Aqui, fornecemos um esboço teórico dos principais eventos do projeto PANGEA que serão executados ao longo de 6 a 9 anos (consulte a Seção 9.4). Antes da implementação do projeto, o PANGEA desenvolverá um Plano de Experimentos Conciso (CEP) durante a fase de Definição Científica, que dura de um a dois anos. Essa fase envolve a seleção de paisagens prioritárias; o refinamento dos planos de coleta de dados terrestres, aéreos e de satélite; a definição de análises para abordar as questões científicas do projeto; e a determinação de um orçamento preliminar. O Plano de Experimento Conciso formará a base para um anúncio da NASA de uma oportunidade para recrutar a Equipe Científica da Fase 1 do PANGEA. Nominalmente, esperamos que a NASA solicite propostas para a participação da Equipe Científica a cada três anos. Após a fase de Definição Científica e a seleção de uma Equipe Científica da Fase 1, consideramos que um projeto PANGEA seja executado em cerca de 8 anos, embora períodos de implementação mais longos ou mais curtos sejam possíveis usando uma abordagem flexível e modular. Uma ampla gama de perfis de orçamento e cronograma é possível sob uma abordagem modular porque as campanhas individuais têm dependências limitadas. O foco inicial será estabelecer e aumentar os locais de campo com novos instrumentos, bem como análises e modelos de dados baseados em satélite para otimizar medições futuras. O desenvolvimento inicial do modelo e as análises dos dados existentes revelarão as maiores sensibilidades que orientarão os detalhes da implementação e a coleta de dados da campanha. O pico de aquisição de dados ocorreria durante os anos 2 a 6, garantindo que os recursos sejam gastos em aquisições com o maior retorno científico. Em uma síntese final durante os anos 7 e 8, a atividade de campo será limitada, e o PANGEA se concentrará em estudos de síntese e modelagem que utilizem amplamente os dados adquiridos anteriormente.

6.2 Componentes científicos essenciais

A solução das lacunas de dados e conhecimento nos trópicos requer projetos coordenados terrestres e aéreos que abranjam as duas maiores florestas tropicais da África e das Américas.

O PANGEA aproveita o histórico da NASA de campanhas aéreas e de campo bem-sucedidas nos trópicos para medir a dinâmica e o status do ecossistema no final da estação úmida e no final da estação seca, quando os sistemas florestais tropicais estão menos e mais estressados, revelando diferenças funcionais (Yang et al., 2021b), e a cobertura de nuvens pesadas limita o sensoriamento remoto nos trópicos durante a estação úmida. As conquistas recentes que demonstram a viabilidade incluem a bem-sucedida campanha AfriSAR-2, que coletou dados UAVSAR de banda L e P sobre Camarões, República Democrática do Congo (RDC), Gabão, Gana, República do Congo e São Tomé e Príncipe. Apesar dessas campanhas bem-sucedidas, ainda há uma necessidade crítica de medições colocadas e coincidentes nas paisagens tropicais altamente variáveis, especialmente na África, onde as lacunas de dados são maiores e o entendimento baseado em processos é mais pobre. As medições limitadas à estação seca correm o risco de influenciar a compreensão das florestas tropicais, dadas as fortes diferenças sazonais na dinâmica e nos processos (Cleveland et al., 2015), incluindo o ciclo de carbono, as interações entre espécies, as atividades de uso da terra (por exemplo, fogo e desmatamento), o ciclo hidrológico e muito mais. O PANGEA preencherá lacunas temporais importantes no sensoriamento remoto, coordenando as recuperações suborbitais programadas durante o final da estação úmida e o final da estação seca com aquisições de dados contínuas e/ou mais frequentes de torres de fluxo, drones e outros sensores. Para atingir os objetivos do PANGEA, portanto, são necessárias campanhas de voo que atendam aos requisitos de medição descritos na Seção 6.2.1, com base em vários países da África Central e das Américas tropicais, para abranger a gama de ambientes presentes nesses sistemas. Essas observações vincularão medições de processo de alta resolução (parcelas florestais, medições de câmara, torres de fluxo, eDNA, dados de movimentação de animais, dados agrícolas, TEK, IEK e LEK) com extensas recuperações de sensoriamento remoto aéreo e por satélite, fornecendo uma linha de base para conjuntos de dados terrestres, aéreos e de satélite em andamento e permitindo a comparação com estudos anteriores.

O PANGEA fornece uma estrutura para dimensionar e integrar recuperações aéreas e de satélite com medições de campo in situ, medições de torres de fluxo de turbulência e modelos para promover a compreensão científica e os recursos de sensoriamento remoto em áreas temáticas que abordam diretamente as metas da Área de Foco de Ciclo de Carbono e Ecossistemas da NASA, em alinhamento com as Áreas de Foco de Variabilidade e Mudança Climática e Ciclo de Água e Energia.

O PANGEA estabelecerá uma rede de campanhas coordenadas de campo e aéreas distribuídas em ecossistemas florestais tropicais específicos para preencher lacunas de dados e permitir o dimensionamento entre conjuntos de dados de campo e de sensoriamento remoto, bem como modelagem em escala regional e pantropical (**Tabela 2**). Usando conjuntos de dados coordenados, o PANGEA caracterizará as diferenças entre gradientes bióticos, abióticos e de uso da terra. Em seguida, o PANGEA usará essas medições integradas para modelar a estrutura, a função e os fluxos do ecossistema em cenários de mudanças climáticas e de uso da terra para avaliar as diferenças nas

respostas do ecossistema. Ao fazer isso, o PANGEA aborda como a dinâmica variável da floresta tropical influencia a estabilidade da floresta tropical em face dos impactos das mudanças climáticas e do uso da terra.

6.2.1 Linha de base, limiar e estratégia de descópio

Derivamos três níveis alternativos de Medições Científicas Essenciais, a saber, **Linha de Base, Limiar e Descópio**, dos Objetivos Científicos do PANGEA para (1) entender as diferenças nos estoques e fluxos de carbono tropical e as forças que impulsionam a heterogeneidade, (2) resolver problemas de escala entre os dados de campo e de satélite, avançando na compreensão do processo e nos métodos de escala, e (3) prever respostas variadas do ecossistema da floresta tropical às mudanças climáticas e de uso da terra. Os Requisitos Funcionais da Investigação do PANGEA estão descritos abaixo.

A **Investigação de Linha de Base** cumpre todos os Objetivos Científicos (*Seção 1.1*) e todas as Perguntas Científicas (*Seção 3*) em paisagens de florestas tropicais americanas e africanas de 3 a 6 anos. Para atender a esses Objetivos da Investigação de Linha de Base, estabelecemos os seguintes requisitos:

1. Colete recuperações aerotransportadas por meio de mosaicos de linhas de voo de parede a parede e transectos de amostragem em, no mínimo, três paisagens prioritárias na África e três paisagens prioritárias nas Américas, onde as paisagens cobrem centenas de quilômetros abrangendo uma variedade de sistemas socioecológicos - os ecossistemas e as pessoas que dependem deles (consulte as Seções 6.2.3 e 6.2.4 para obter detalhes sobre medições de paisagens).
 - a. As recuperações aéreas incluirão uma captura bem-sucedida no final da estação seca e uma captura bem-sucedida no final da estação úmida em cada paisagem. As capturas do final da estação seca (seca para úmida) e da estação úmida (úmida para seca) ocorrem em meses diferentes em continentes diferentes. As florestas tropicais podem ter sazonalidade unimodal (uma estação seca e uma úmida) ou bimodal (duas estações secas e duas úmidas). Por esse motivo, os cronogramas de recuperação serão definidos com base na sazonalidade específica da paisagem.
 - b. As paisagens serão selecionadas entre os locais candidatos durante o desenvolvimento do Plano Conciso de Experimentos.
 - c. Uma análise de variabilidade baseada na **Figura 11** e uma análise da incerteza do modelo serão usadas para informar os membros finais importantes a serem capturados e contribuirão para a seleção da paisagem durante o desenvolvimento do Plano de Experimento Conciso.
2. Colete medições terrestres coincidentes e colocadas durante as aquisições aéreas para as medições necessárias (por exemplo, características químicas das folhas, medições de fluxo de CO₂ e CH₄ da câmara).
3. Colete medições terrestres contínuas nas frequências temporais necessárias durante todo o projeto (por exemplo, aquisições mensais de mortalidade e fenologia de árvores com base em drones e no solo, medições de fluxo de hora em hora).
4. Desenvolver e aplicar abordagens de síntese de dados para dimensionar observações aéreas e de campo para o domínio principal do PANGEA, usando dados de satélite para obter estimativas restritas (e incertezas) de variáveis de interesse.

5. Avaliar a capacidade de transferência dos produtos de síntese de dados em todo o Core Domain por meio de validação cruzada.
6. Modelar os fluxos de carbono, água e energia, bem como a dinâmica da vegetação, usando modelos da biosfera terrestre inicializados, parametrizados e comparados com os produtos de síntese de dados baseados em sensoriamento remoto.
7. Aplicar modelos otimizados para testar a estabilidade da floresta tropical dentro e entre todas as paisagens de investigação e regionalmente com base nos resultados do modelo de biosfera terrestre e de sistemas socioecológicos.
8. Modelar o papel relativo do clima, dos solos e das histórias evolutivas divergentes na determinação da variação da estabilidade das florestas tropicais em face dos impactos climáticos.

A Threshold **Investigation** atende a todos os Objetivos Científicos (*Seção 1.1*) em duas paisagens de florestas tropicais americanas e duas africanas. A Threshold Investigation exige uma captura aérea bem-sucedida no final da estação úmida e uma captura aérea bem-sucedida no final da estação seca em cada paisagem.

Nossa **Investigação Descrita** cumpre todos os Objetivos Científicos (*Seção 1.1*) em apenas duas paisagens na África. Para os trópicos americanos, a nossa Investigação Descrita baseia-se em dados existentes, campanhas planejadas (consulte a *Seção 6.2.4*), compras de dados comerciais e drones implantáveis, além de dados de satélite sobre as Américas para comparações.

Requisitos de revisita temporal: Duas campanhas aéreas focadas, com mosaicos de parede a parede e transectos em várias paisagens, são necessárias para capturar as variações sazonais e considerar a heterogeneidade intra e intercontinental de forma padronizada. O momento das pesquisas levará em conta a sazonalidade da precipitação de cada paisagem. Para paisagens onde existem duas estações secas, as campanhas do PANGEA se concentrarão na estação seca mais longa. As campanhas aerotransportadas capturarão os membros finais necessários para dimensionar as diferenças sazonais em fluxos, estoques, características, interações planta-animal, hidrodinâmica, interações terra-atmosfera e atividades de uso da terra agrícolas e de fogo. O tempo decorrido entre as duas capturas e entre as diferentes paisagens não afetará a capacidade de capturar esses membros finais, permitindo um projeto modular e a construção de uma valiosa flexibilidade de campanha aérea. Nas subseções em nível de paisagem dessas aquisições aéreas (por exemplo, 10-20 km²), as recuperações de alta frequência (\leq mensal) da estrutura e dos espectros florestais feitas por drones permitirão a quantificação de tendências temporais em escala fina (por exemplo, mortalidade, fenologia) e fornecerão dados de calibração e validação para o desenvolvimento de métodos de satélite para monitorar essa dinâmica. Além disso, ao longo de um projeto de 6 a 9 anos, é altamente provável que ocorram eventos extremos, como um grande incêndio, uma seca ou um evento do El Niño, o que proporcionará mais oportunidades de análise.

Requisitos de variabilidade espacial: A estrutura, a função, os fluxos e a biodiversidade do ecossistema são caracterizados em gradientes multidimensionais de sistemas florestais tropicais intactos a degradados, de alta a baixa diversidade e de alto a baixo estoque de carbono. **O PANGEA implementa uma abordagem de amostragem em escala, com um projeto de amostragem aninhado.** As medições terrestres e aéreas abrangerão gradientes em uma paisagem, e as paisagens abrangerão gradientes climáticos e de biodiversidade em um continente (**Figura 11 e 18**). A coleta de dados do PANGEA será realizada em paisagens que abrangem condições intactas, perturbadas e degradadas

em florestas, turfeiras e ecossistemas de zonas úmidas, bem como em agroecossistemas adjacentes. A coleta coordenada e coincidente de dados terrestres sobre fluxos, características foliares, estrutura florestal, mortalidade de árvores, diversidade da fauna, interações de espécies, umidade do solo e outros serão coletados nesses gradientes dentro de cada paisagem. Para obter mais informações, consulte a *Seção 6.2.2, Paisagens candidatas*, e a *Seção 6.2.5, Observações e estudos de campo*.

Abordagem flexível e modular: O PANGEA será executado com uma combinação de aquisições plurianuais de dados terrestres, de torres e de drones em paisagens específicas e campanhas sazonais de coleta intensiva de dados que podem incluir componentes terrestres e aéreos. Cada paisagem e cada campanha podem ser implementadas e financiadas separadamente. O PANGEA exigirá campanhas plurianuais em cada paisagem para permitir que as aquisições de dados terrestres, aéreos e de satélite se sobreponham espacialmente. No entanto, enfatizamos que não haverá requisitos para que as campanhas em estações separadas ou em continentes separados sejam realizadas no mesmo ano ou em uma ordem específica (por exemplo, úmido antes de seco). O número de continentes e paisagens dentro dos continentes pode variar de acordo com a estratégia seguida (Linha de Base, Limiar ou Descope). A combinação de estratégias e do cronograma da campanha gera várias opções de cronogramas e perfis orçamentários que oferecem flexibilidade ao gerenciamento da NASA e aos possíveis cofinanciadores das atividades do PANGEA.

Tabela 2. Descrição das variáveis ecológicas e geofísicas relevantes para este projeto, com os requisitos de observação correspondentes e os ativos de observação da Terra existentes ou futuros.

ARES: Airborne Research Facility for the Earth System (Instalação de pesquisa aérea para o sistema terrestre). ET: evapotranspiração. LST: temperatura da superfície terrestre. SIF: fluorescência induzida pelo sol. O texto **em roxo** indica satélites de agências federais não americanas. * Indica missões que ainda não foram lançadas e/ou que ainda podem estar sendo consideradas pela concorrência. ** Indica missões encerradas recentemente. Consulte a **Tabela -E1** no *Apêndice E* para obter uma *tabela detalhada das medições do PANGEA*.

VARIÁVEL(EIS)	PERGUNTAS SOBRE CIÊNCIAS	MEDIÇÕES DE SOLO	TECNOLOGIAS DE OBSERVAÇÃO	ATIVOS DE OBSERVAÇÃO DA TERRA	
				SATÉLITE (PLANEJADO/PROPOSTO)	AEROTRANSPORTADO (DRONE/AERONAVE)
FLUXOS DO ECOSISTEMA (GPP, ET, Respiração do ecossistema)	Q1-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q20-Q24	Torres de fluxo, espectros no nível da folha	Espectroscopia de infravermelho, 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, Comercial* , satélites meteorológicos GEO	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER
INTERCÂMBIO ATMOSFÉRICO (Fluxos de CO ₂ e CH ₄ , coluna CO /CH ₂₄ /CO)	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q20, Q21, Q24, Q27	Torres de fluxo, medições de câmara, TCCON, COCCON, Espectrômetros EM27/SUN	Hiperespectral, Covariância de Foucault Aerotransportada (AEC), Espectroscopia de Infravermelho	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
BIOMASSA E ESTRUTURA ACIMA DO SOLO (Altura do dossel, heterogeneidade da altura vertical, dinâmica de lacunas, mortalidade de árvores)	Q1, Q2, Q4-Q13, Q15, Q17-Q21, Q23, Q25, Q28	Dados de parcelas de inventário florestal, escaneamento a laser terrestre, dados de parcelas de inventário florestal de censos repetidos	Lidar, Radar, Multispectral	GEDI, Icesat-2, MOLI*, EDGE*, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*, Landsat, Sentinel-1/2, Planet	NASA LVIS, UAVSAR, lidar de pequeno porte (aeronave), RGB ou Lidar de drones repetidos
DIVERSIDADE (Espectral, funcional, características foliares do dossel, fauna, fenologia)	Q2, Q4-Q7, Q10-Q15, Q20, Q24, Q25, Q28	Espectros no nível da folha, diversidade taxonômica; características das plantas; IEK, TEK, LEK; armadilhas fotográficas; sensores bioacústicos; movimento animal; eDNA; PhenoCams; observações fenológicas de longo prazo	Hiperespectral, Lidar, Radar, Radiômetros 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 pegada pequena, RGB de drone repetido

VARIÁVEL(EIS)	PERGUNTAS SOBRE CIÊNCIAS	MEDIÇÕES DE SOLO	TECNOLOGIAS DE OBSERVAÇÃO	ATIVOS DE OBSERVAÇÃO DA TERRA	
				SATÉLITE (PLANEJADO/PROPOSTO)	AEROTRANSPORTADO (DRONE/AERONAVE)
LIMITES CRÍTICOS (Estresse hídrico, estresse térmico)	Q1-Q4, Q6-Q9, Q12-Q20, Q22, Q23, Q25	Sondas de umidade do solo, conteúdo de água da folha, potenciais de água e condutância da folha/tronco, VOD baseado em torre (GNSS de banda L), câmeras FLIR	Radar/radiometria de micro-ondas, GNSS-R/Sinais de Oportunidade, hiperespectral	SMAP, SMOS, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*, LSTM*, AMSR-E, EMIT, SBG VSWIR & TIR*, CHIME*, FLEX*, SNOOPI*, CYGNSS, Lemur-2, Landsat, ECOSTRESS, TRISHNA*, Commercial*	NASA UAVSAR, AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER, AirMOSS
FOGO E AEROSSÓIS (Fogo ativo, aerossóis de queima de biomassa)	Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q21, Q26, Q28	Umidade do combustível vital, umidade do solo, área queimada, gravidade da queimadura, IEK, TEK, LEK, tipo de combustível, densidade do combustível, medições de aerossol	Térmico, UV/Infravermelho, fotômetros, Lidar	Landsat, VIIRS, Sentinel-3, SBG*, TRISHNA*, LSTM*, Comercial*, OMPS, EMIT, PACE, OLCI, NISAR*, BIOMASS*, CALIPSO-CALIOP**, AOS*	NASA HyTES, MESTRE
USO E COBERTURA DA TERRA E SERVIÇOS DE ECOSSISTEMA: (Alimentos, água doce, remédios, práticas espirituais e cerimoniais)	Q1, Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q14, Q16, Q19, Q21, Q23, Q28	Atividade agrícola, severidade da exploração madeireira, práticas de incêndio, IEK, TEK, LEK, práticas de gerenciamento de conservação, identificações culturais, quantidade e qualidade da água	Radiômetros ópticos (OR), hiperespectral, 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, small-footprint lidar
HIDROMETEOROLOGIA (Águas superficiais, águas subterrâneas, umidade atmosférica, VPD, vento)	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q22, Q23, Q25, Q28	Altura da superfície da água, extensão da inundação, caracterização de descarga, medições de poços, estações meteorológicas	Altímetro, Radar, Radiômetro, Gravimétrico, Micro-ondas, Sondas de infravermelho, Geradores de imagens, Doppler wind lidar	SWOT, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*, GRACE-FO, ATMS, GeoXO*, AOS*, Aeolus	UAVSAR da NASA, observações de radiosonda
EDÁFICO (Nutrientes e textura do solo, topografia, geomorfologia)	Q1, Q8, Q18, Q19, Q22-Q25, Q28	Amostras de solo	Hiperespectral, Lidar, Radar	EMIT, PACE, SBG*, CHIME*, SRTM, Copernicus GLO-30 Observação: o PANGEA explorará relações correlativas com variáveis de sensoriamento remoto, não medições diretas.	NASA AVIRIS-NG/3, UAVSAR, LVIS, small-footprint lidar

6.2.2 Paisagens candidatas

O PANGEA colaborará estreitamente com as instituições parceiras no país para garantir a execução tranquila das atividades de campo e aéreas em paisagens selecionadas que serão de aproximadamente 10.000 km². **O projeto de amostragem aninhada do PANGEA apóia uma abordagem de amostragem em escala (Figura 18)**. As medições terrestres abrangerão gradientes em uma paisagem, e as paisagens abrangerão gradientes climáticos e de biodiversidade em um continente (**Figura 11**). O PANGEA priorizará os países que abrangem paisagens com uma confluência de ecossistemas de florestas, turfeiras e zonas úmidas intactas, perturbadas e degradadas, com agroecossistemas adjacentes. A coleta coordenada de dados terrestres abrangerá esses gradientes em cada paisagem. **A Tabela 3** resume as paisagens candidatas com base nas informações fornecidas pelos parceiros. As paisagens do PANGEA priorizarão locais onde os dados descritos no início da Seção 6.2.4 já estejam sendo coletados ou onde a coleta de dados possa ser ampliada no âmbito do PANGEA.

Tabela 3. Paisagens candidatas ao PANGEA. Os círculos coloridos indicam os dados disponíveis existentes, por tipo.

● = Dados do solo; ● = Dados socioeconômicos; ● = Dados da torre; ● = Dados do drone; ● = Dados da aeronave.
 N = Dados de aeronaves da NASA. * Indica atividades planejadas. ATTO: Observatório de torres altas da Amazônia. As paisagens **em negrito** são locais GEO-TREES confirmados. As paisagens em *italico* são locais confirmados da iniciativa One Forest Vision.

PAISAGEM	PAÍS	DADOS DISPONÍVEIS
PAISAGENS POTENCIAIS DAS FLORESTAS TROPICAIS AMERICANAS		
KM34/ATTO (Manaus)	Brasil	● ● ● ● ●
KM67 (Santarém)		● ● ● ●
Rebio Jaru		● ●
Tanguro		● ● ● ●
Caxiuana		● ●
Amacayacu	Colômbia	●
Amazonas		●
La Planada		● N
Santa Rosa	Costa Rica	● ● ● ● ● N
Turrialba		● ● ● N
Tiputini	Equador	● ● N
Yasuní		● N
Paracou	Guiana Francesa	● ● ● ● N
Água salgada	Panamá	●
BCI		N
Darien	Peru	● ●
Iquitos		●
Huánuco		● ●
Jenaro Herrera		● ●
Os Amigos		● ●
Madre de Deus		●
San Martin		● ●
Tambopata		● ●
Ucayali		●
Guanica		Porto Rico
Luquillo	● ●	

PAISAGEM	PAÍS	DADOS DISPONÍVEIS
PAISAGENS POTENCIAIS DE FLORESTAS TROPICAIS NA ÁFRICA		
Nalohou	Benin	● ●
Bellefougou		● ●
La Lama		● ●
Dja	Camarões	● ● ● ● ● N
Mbalmayo		● ● ● N
Korup		●
Campo Ma'an	Dem. República do Congo	●
<i>Luki</i>		● ●
Mai Ndombe		● ● ● ● ● N
Yangambi		● ● ● ●
Reserva Yoko		● ● ●
Ankasa	Gana	● ●
Bia Tano		● ●
Bobiri		● ●
Kogyae		● ●
Lopé	Gabão	● ● N
Ipasa		●
Mondah		● N
Mabounié		● N
Rabi		● N
Bokatola	República do Congo	●
Kolongomba		●
Lac Tele		●
Loundougou		● ●
Odzala-Kokoua		● ● ● N
Nyungwe	Ruanda	●
Vulcões		●
Kibale	Uganda	●
<i>Sebitoli</i>		●

O PANGEA coordenará a seleção de paisagens em estreita colaboração com os esforços que estão ativamente no processo de seleção de locais para coleta de dados complementares e investimento em infraestrutura. Entre eles estão o GEO-TREES, a campanha amazônica do INPE-ESA, a One Forest Vision Initiative, as medições de campo de metano tropical e de turfeiras financiadas pela Fundação Moore e pela National Science Foundation (NSF), bem como várias propostas do Schmidt Science Virtual Institute for the Carbon Cycle com foco nos trópicos. Um processo de seleção de paisagens e locais será formalizado no Plano Conciso de Experimentos para garantir a seleção e a aprovação transparente de paisagens e locais dentro de paisagens para a coleta de dados terrestres e aéreos. Esse processo se baseará em discussões contínuas com parceiros institucionais locais e gerentes de locais que começaram durante o processo de definição do escopo e incluirá o co-design com povos indígenas e comunidades locais (consulte a Seção 8 para obter mais informações).

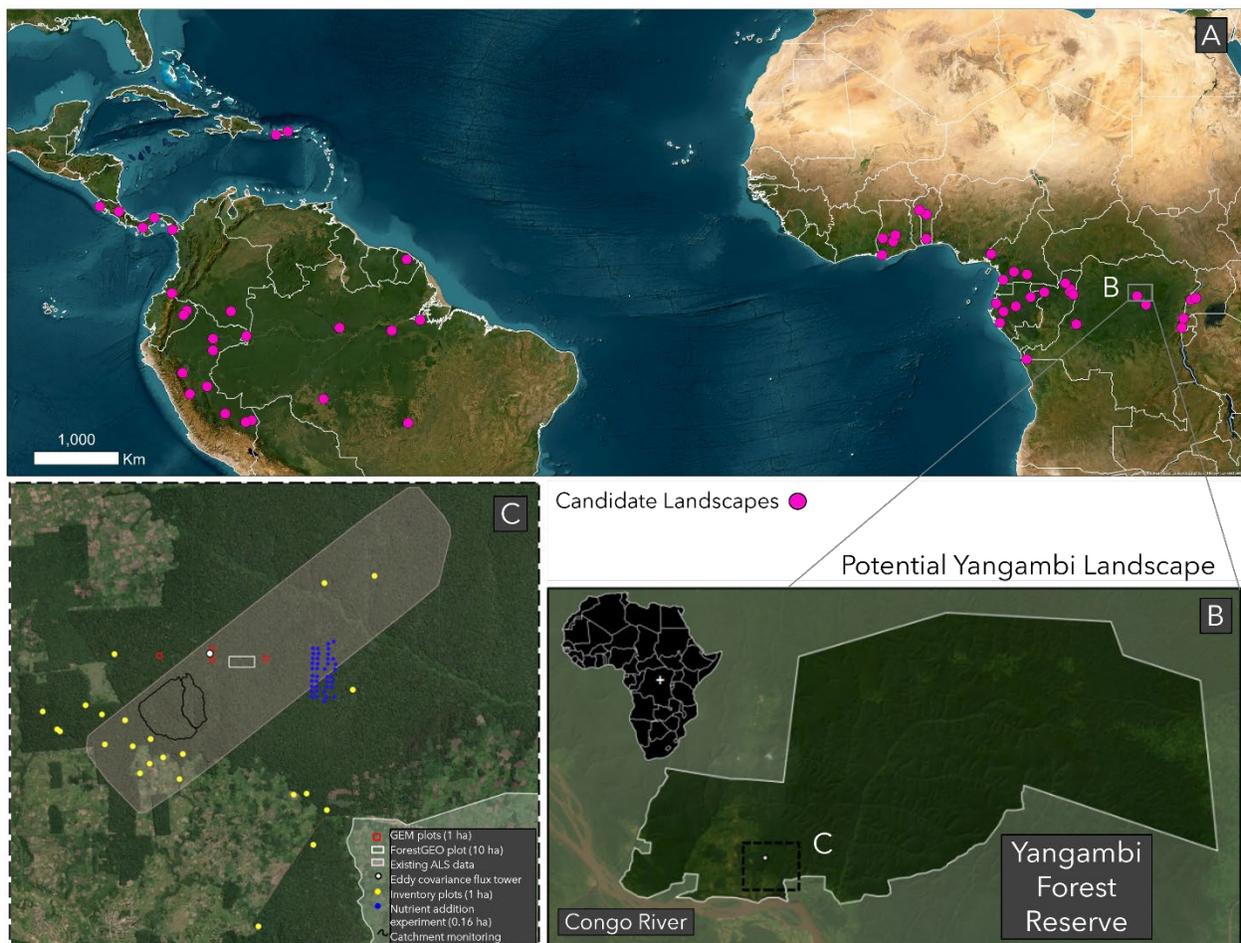


Figura 18. As paisagens candidatas em potencial abrangem os trópicos americanos e africanos (A). Yangambi, um exemplo de paisagem candidata em potencial, é ilustrado no painel B, que tem parcelas de inventário existentes, uma torre de fluxo e dados de aeronaves (C) que poderiam ser situados em uma paisagem PANGEA maior, abrangendo ecossistemas agrícolas, intactos e degradados.

6.2.3 Observações de sensoriamento remoto por satélite

Há uma grande variedade de plataformas de satélites da NASA que contribuirão para os objetivos científicos e de aplicativos do PANGEA, bem como um ecossistema cada vez maior de sensores de outras agências espaciais e organizações não governamentais (ONGs) (**Tabelas 2 e E-1**). O PANGEA está bem posicionado para alavancar as missões do Sistema de Observação da Terra (EOS) para compreender os padrões das propriedades dos ecossistemas tropicais e suas mudanças no passado recente, bem como para avançar a maneira como usamos os sensores espaciais na era das missões do Observatório do Sistema Terrestre (ESO). O PANGEA também está preparado para contribuir com a melhoria e o refinamento dos algoritmos do ESO para representar melhor os ecossistemas tropicais e atender às necessidades dos usuários nessas regiões de importância global. O trabalho in situ realizado pelo PANGEA em conjunto com as observações de sensoriamento remoto por satélite permitirá que os biomas de florestas tropicais e as pessoas que vivem nessas regiões se tornem parte do ciclo virtuoso do Earth Science to Action, garantindo sua inclusão no processo.

Tabela 4. Exemplos de observações e avanços do sensoriamento remoto por satélite.

O texto em roxo indica satélites de agências federais não americanas. * Indica missões que ainda não foram lançadas e/ou que ainda podem estar sendo consideradas pela concorrência.

OBSERVAÇÕES POR SATÉLITE	CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E AVANÇOS DE ALGORITMOS DO PANGEA
Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*	<ul style="list-style-type: none"> Expandir a calibração/validação do mapeamento de biomassa ao longo de gradientes de perturbação e clima. Apoiar o desenvolvimento de produtos de dados do NISAR e do BIOMASS em florestas densas.
EMIT, CHIME*, SBG-VSWIR*	<ul style="list-style-type: none"> Expandir os dados de validação do produto derivado do EMIT em florestas tropicais. Suporte para produtos de vegetação L3 aprimorados do SBG VSWIR.
OCO-2/3, TROPOMI, MethaneSat, EMIT, CarbonMapper	<ul style="list-style-type: none"> Obtenha amostras de calibração sem nuvens de XCO₂ e XCH₄ em regiões tropicais. Dados de suporte para produtos L3, escalonamento entre o modo alvo e dados de ampla cobertura espacial.
Carbono-I*	<ul style="list-style-type: none"> Dados de validação de fluxos de gases de efeito estufa de áreas úmidas.
GEDI, ICESat-2, EDGE*	<ul style="list-style-type: none"> Dados de estrutura florestal de alta precisão para produtos Lidar espaciais L3 aprimorados. Oportunidades de dados de calibração para produtos de quantificação de biomassa L4.
SMAP, SMOS	<ul style="list-style-type: none"> Dados de calibração para produtos de umidade do solo em florestas densas.
Geoestacionário: GOES-R ABI (Américas), MTG-I (África) e AHI (Ásia)	<ul style="list-style-type: none"> Dados de calibração para estimativas da função do ecossistema em escalas de tempo subdiárias.
VIIRS, Sentinel-3	<ul style="list-style-type: none"> Apoiar o desenvolvimento de produtos L3 de dinâmica de incêndio. Dados de calibração para detecção de incêndios de pequena escala.
ECOSTRESS, SBG-TIR, FLEX*	<ul style="list-style-type: none"> Dados de suporte para derivar estimativas de função de ecossistema L3 e L4 para todos os climas. Dados de calibração para relações emergentes entre a estrutura e a composição da floresta e a função do ecossistema.

Na **Tabela 4**, destacamos uma variedade de sensores espaciais operacionais e futuros da NASA, suas necessidades de avanços nos trópicos que o PANGEA pode atender e a ciência que a equipe do PANGEA poderá avançar com o uso desses sensores em conjunto com as atividades planejadas do PANGEA. Essa tabela também inclui alguns sensores que são operados por agências espaciais que não são da NASA e cujos dados estão disponíveis abertamente. O PANGEA também explorará

conjuntos de dados comerciais disponíveis por meio do programa Commercial SmallSat Data Acquisition (CSDA) da NASA durante as fases de Definição e Implementação Científica do projeto.

6.2.4 Observações de sensoriamento remoto aéreo

As observações aéreas do PANGEA, incluindo aeronaves instrumentadas e drones, serão projetadas em conjunto com parceiros locais. Todas as solicitações de autorizações de país e permissões de voo serão coordenadas pelos programas aéreos da NASA e do JPL, trabalhando com o Escritório de Relações Internacionais e Interagências (OIIR) da NASA e com o Departamento de Estado dos EUA (consulte o **Quadro 2**). Ao usar aeronaves da NASA ou contratadas pela NASA, todos os processos de aeronavegabilidade apropriados e as aprovações e liberações de voo serão coordenados no nível do projeto PANGEA com os centros apropriados, a sede da NASA e o JPL. Os sensores e as aeronaves exatos serão determinados durante o desenvolvimento do Plano de Experimento Conciso.

O PANGEA aproveita e se baseia no histórico da NASA de campanhas aéreas internacionais bem-sucedidas, incluindo muitas na África. Mais recentemente, a NASA executou as campanhas AfriSAR 2016 e AfriSAR-2 2023/2024, nas quais o AfriSAR-2 expandiu o escopo inicial e os sucessos do AfriSAR no Gabão para coletar dados adicionais sobre Camarões, República Democrática do Congo (RDC), Gana, República do Congo e São Tomé e Príncipe. Em 2023, a campanha BioSCape voou em duas aeronaves da NASA integradas com quatro instrumentos de sensoriamento remoto aerotransportado, adquirindo observações contemporâneas de UV até VSWIR e faixa térmica, bem como dados lidar de

Quadro 2. Acordos internacionais e outros acordos

Os parceiros internacionais do PANGEA serão envolvidos desde o início e continuamente para garantir relacionamentos sólidos que apoiarão o sucesso das campanhas aéreas e de campo. Para cada paisagem do PANGEA, serão obtidos acordos e/ou permissões formais dos governos relevantes e dos líderes das comunidades indígenas. Assim que o PANGEA for selecionado, a equipe científica do PANGEA começará a envolver os parceiros institucionais para apoiar o desenvolvimento de discussões formais sobre os acordos diplomáticos necessários para realizar o trabalho de campo e implantar aeronaves em apoio à campanha TE da NASA. À medida que os caminhos com cada governo estrangeiro forem estabelecidos, a Equipe Científica do PANGEA trabalhará com o SMD da NASA por meio do Gerente do Programa TE para desenvolver acordos diplomáticos adequados para a realização de trabalho de campo e campanhas aéreas em cada país. Acordos diplomáticos (como memorandos de entendimento [MOUs], acordos de implementação [IAs] e/ou autorizações de voo) precisarão ser criados entre o governo dos EUA e a nação estrangeira em questão o mais cedo possível. Quando esses documentos forem necessários entre a NASA e um governo estrangeiro, a equipe científica do PANGEA e o gerente do programa TE, em colaboração com o OIIR da NASA, o SMD, os centros da NASA, incluindo o JPL, o escritório de suporte do CCE e o Departamento de Estado dos EUA, trabalharão por meio dos canais e protocolos diplomáticos adequados para estabelecer os documentos necessários para o sucesso das campanhas aéreas e de campo. A equipe científica do PANGEA também consultará a NASA, o Departamento de Estado, o Serviço Florestal dos EUA (USFS) e a Agência dos EUA para o Desenvolvimento Internacional (USAID) para identificar e buscar sinergias entre as atividades do PANGEA e os objetivos diplomáticos dos EUA, incluindo a cooperação científica e os laços entre países. A Equipe Científica do PANGEA, o Programa TE e o Escritório de Apoio da CCE trabalharão em conjunto para garantir que as terras indígenas e os territórios soberanos sejam co-desenvolvedores em qualquer processo de aprovação diplomática. A experiência da atual Equipe Científica do PANGEA com várias campanhas internacionais de campo e aéreas facilitará o estabelecimento dos acordos internacionais adequados para o projeto PANGEA.

forma de onda completa. Essa combinação de instrumentos foi acompanhada por uma extensa campanha de observação de campo, executada por uma equipe científica diversificada com aproximadamente 50% de participação local. O sucesso do AfriSAR e do BioSCape e a contínua capacitação serviram como um excelente exemplo de diplomacia científica e influenciaram positivamente a percepção do público sobre a NASA e os Estados Unidos na África.

Várias campanhas do Earth Venture Suborbital (EVS) e outras campanhas aéreas internacionais da NASA também demonstraram a viabilidade de aeronaves da NASA e aeronaves contratadas pela NASA serem implantadas internacionalmente com instrumentos de sensoriamento remoto e in situ em apoio a campanhas plurianuais de larga escala nos trópicos americanos. Em 2023, o JPL da NASA teve uma campanha bem-sucedida com o AVIRIS-NG coletando dados de sensoriamento remoto com uma aeronave contratada pela NASA sobre o Chile, a Colômbia e o Equador para observações de fontes pontuais de metano em coordenação com cada país. Isso se baseou em campanhas anteriores bem-sucedidas na região, incluindo, por exemplo, voos UAVSAR na Colômbia, Equador, Peru e Guiana Francesa; voos AVIRIS na Colômbia, Equador e Chile; com voos AVIRIS planejados no Panamá e na Costa Rica; e voos LVIS na Guiana Francesa. Todas essas campanhas representam décadas de experiência da sede da NASA e dos centros (incluindo o JPL) trabalhando em conjunto com universidades e colaboradores internacionais para adquirir com sucesso dados de sensoriamento remoto aéreo e in situ durante campanhas de campo globais.

À medida que o PANGEA desenvolve seu Plano de Experiência Conciso, ele continuará a aproveitar a experiência dos membros da equipe em campanhas internacionais anteriores.

É importante ressaltar que a coleta de dados aéreos do PANGEA não exige necessariamente a implantação de ativos ou aeronaves da NASA. As compras de dados comerciais e os voos em aeronaves estrangeiras e comerciais também são opções viáveis para as aquisições aéreas do PANGEA. Os sensores da NASA podem ser transportados em aeronaves comerciais. Por exemplo, os sensores AVIRIS geralmente fazem voos domésticos e internacionais em uma aeronave da Dynamic Aviation. As missões EVS Oceans Melting Greenland (OMG), Delta-X e Coral Reef Airborne Laboratory (CORAL) empregaram com sucesso aeronaves contratadas pelo JPL da NASA com instrumentos e membros da equipe do JPL. As aquisições de dados comerciais também expandirão muito os recursos aéreos. Por exemplo, os transectos lidar comerciais financiados pelos EUA adquiridos com o apoio da USAID por meio do Sustainable Landscapes Brazil abrangem grandes áreas do Brasil (dos Santos et al., 2019), e esforços semelhantes permitiram a amostragem de florestas na República Democrática do Congo (Xu et al., 2017), demonstrando a viabilidade em geografias importantes do PANGEA. O Airborne Research Facility for the Earth System (ARES), da Universidade de Zurique, é outro parceiro importante que apoia as aquisições aéreas do PANGEA. O ARES adquiriu dados com sucesso para campanhas colaborativas da NASA e da ESA. Os sensores a bordo do ARES incluem o espectrômetro de imagem AVIRIS-4, um lidar de forma de onda completa e uma câmera fotogramétrica de alto desempenho.

Há um forte alinhamento e interesse de aquisições de dados aéreos de agências espaciais parceiras (por exemplo, ESA, ISRO, JAXA). Por exemplo, uma série de campanhas da Amazônia 2025/26 coordenadas entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil e a Agência Espacial Europeia (ESA) planeja coletar dados de fluorescência aérea, metano e dados in situ, bem como possíveis dados de espécies e fluxo de carbono, incluindo CO₂ e CH₄ recuperados por meio de um

sensor HELiPOD transportado por um helicóptero. O Centro Aeroespacial Alemão (DLR) está planejando uma campanha coordenada no Brasil em 2026 com o objetivo de implantar um lidar de metano (CHARM- F) e sistemas de imagem para detecção de metano. A Agência Espacial Francesa (CNES) está envolvida, com um foco semelhante no metano, usando coleta de dados aéreos e terrestres. A ESA também está planejando atividades de campanha aérea sobre a África, com foco na validação de observações de gases de efeito estufa por satélite. Os planos da ESA estão em andamento e serão definidos com mais detalhes após um workshop conduzido pela ESA na primavera de 2025. Muitos dos atuais membros da equipe do PANGEA estão trabalhando em estreita colaboração com as equipes do INPE, da ESA, do DLR e do CNES. O PANGEA pode se beneficiar muito e contribuir para esses tipos de colaborações internacionais.

O PANGEA também aproveitará os recursos dos drones para complementar a coleta de dados de aeronaves e fazer aquisições de dados que exijam maior frequência temporal (por exemplo, mortalidade de árvores, fenologia). O PANGEA usará instrumentos de Nível de Prontidão Tecnológica (TRL) 9 lidar e RGB UAV. As ofertas comerciais atuais de hiperespectral baseadas em UAV geralmente apresentam desafios e tendem a cobrir apenas a faixa VNIR, perdendo a parte de ondas curtas do espectro, que é importante para medições relevantes do ecossistema. A equipe do PANGEA continuará a acompanhar a disponibilidade e a utilidade dessas tecnologias e criará protocolos para empregá-las conforme apropriado para apoiar as atividades científicas.

Algumas aquisições de dados do PANGEA exigirão medições de campo e observações aéreas quase simultâneas, possibilitadas pelo planejamento antecipado de campanhas de campo; métodos de comunicação claros e confiáveis entre as equipes de voo e de campo; e planos que incorporem flexibilidade de tempo. Na preparação e durante as campanhas, o PANGEA contará com ferramentas de rastreamento de voo e de observação rápida quase em tempo real, como as usadas no BioSCape (Cardoso et al., 2024), para otimizar a coleta de dados aéreos, facilitar melhores combinações de campo e aumentar a transparência.

O PANGEA também apóia a colaboração internacional inclusiva. Tomando emprestado o sucesso do BioSCape nesse sentido, o PANGEA implementará um esquema de priorização transparente para as regiões de interesse da Equipe Científica e solicitará feedback sobre o esquema de priorização antes da campanha aérea por meio de prefeituras, workshops, reuniões bilaterais e pesquisas. O PANGEA compartilhará planos de voo preliminares e implementará um processo iterativo para que a Equipe Científica e os parceiros locais possam contribuir para refinar o projeto de aquisição de dados, deixando claro para a Equipe Científica e os parceiros locais que nenhum dado aéreo é garantido e que todas as aquisições propostas são provisórias até que sejam executadas com sucesso. As informações sobre as atividades diárias de voo, inclusive as chamadas "go/no-go", serão transmitidas prontamente assim que as decisões diárias forem tomadas.

6.2.5 Observações e estudos de campo

As medições terrestres são necessárias para (1) validar as observações espaciais das propriedades do ecossistema, tanto do programa de registro da NASA quanto das missões recém-lançadas; (2) descobrir os fatores mecanicistas dos fluxos e padrões observados, que podem informar o desenvolvimento do modelo e a interpretação das observações espaciais; e (3) avaliar as dependências de escala dos processos ecológicos. Apesar da importância dos ecossistemas tropicais, eles são dramaticamente sub-representados com relação às medições de campo, o que pode levar a uma representação deficiente em produtos de dados de nível mais alto provenientes de missões de

satélite (consulte a **Tabela 3**), ressaltando a importância das medições e dos estudos baseados em campo do PANGEA. Os produtos de dados de campo incluem, em linhas gerais, o seguinte:

- **Os dados e conhecimentos manuais in situ** incluem todos os dados que devem ser medidos e/ou coletados diretamente por indivíduos no local e que não podem ser facilmente automatizados. Os exemplos incluem parcelas de inventário florestal, características de folhas e madeira, escaneamento a laser terrestre, medições de fluxo de câmara, identificação de espécies, eDNA, dados de movimentação de animais, medições de tipo e rendimento de culturas e conhecimento ecológico indígena, tradicional e local (IEK, TEK e LEK). Esses dados e bases de conhecimento são importantes para compreender as relações mecanicistas entre padrão e processo e para a validação de conjuntos de dados de drones, aeronaves e satélites.
- **Os dados automatizados in situ** incluem todas as medições de solo que apoiam a validação e a compreensão dos processos ecológicos, mas não exigem visitas frequentes ao local e são mais facilmente automatizados. Os exemplos incluem medições de dendrômetro, fluxo de seiva e umidade do solo, além de dados de armadilhas fotográficas e bioacústica. Semelhante à amostragem biológica, essas medições são importantes para desenvolver e compreender processos e validar observações remotas.
- **Os dados meteorológicos e de fluxo** incluem todos os dados coletados em uma torre de fluxo ou estação meteorológica, inclusive fluxos de carbono, água e energia, temperatura do ar, temperatura do solo, conteúdo volumétrico de água no solo, umidade relativa e precipitação. A técnica de eddy-covariance usa torres de andaimes acima do dossel da floresta e mede o vento de alta frequência e dados escalares (concentração de gás, energia, momento) para estimar os fluxos de água e carbono do ecossistema - onde o carbono se refere ao CO₂, CH₄ e fluxos laterais.
- **O sensoriamento remoto proximal baseado em torres** inclui todos os dados que podem ser coletados de plataformas montadas em torres. Essas medições complementarão as recuperações de sensoriamento remoto de drones e aeronaves para vincular mais diretamente as características e os fluxos do ecossistema às observações de satélite. As medições de sensoriamento remoto proximal baseadas em torres do PANGEA incluem refletância hiperespectral, fluorescência induzida pelo sol (SIF), radiação infravermelha térmica (TIR), retroespalhamento de micro-ondas, lidar, VOD (GNSS de banda L) e PhenoCams.
- **O sensoriamento remoto proximal baseado em drones** inclui lidar, imagens RGB para estrutura e espectros, dados multiespectrais e o possível desenvolvimento de um sensor hiperespectral baseado em drones. Há três aspectos principais do monitoramento baseado em drones: (1) ele permite a coleta de dados de alta frequência e o monitoramento contínuo de tendências temporais de uma forma que não é possível com aeronaves; (2) ele oferece a capacidade de capturar tendências mesmo em condições de nebulosidade, que são comuns em regiões de florestas tropicais; e (3) ele pode complementar as medições terrestres que podem não atingir o topo do dossel devido à oclusão em sistemas florestais e agroflorestais. Quando combinadas com a validação em solo, as aquisições baseadas em drones são essenciais para a quantificação de fenômenos como mortalidade de árvores, fluxos de carbono, fenologia e mudanças nas características funcionais com variação sazonal.

Vários fatores podem restringir ou limitar as medições de campo em florestas tropicais. Primeiro, o acesso a terrenos densos e difíceis de navegar e a áreas remotas pode limitar a capacidade de implantar e manter equipamentos de campo em vários locais. Da mesma forma, condições climáticas

extremas, como chuvas fortes durante as estações de monções e calor e umidade extremos, criam ambientes de trabalho difíceis, que podem limitar a duração e a extensão do trabalho de campo. Além disso, muitas florestas tropicais estão localizadas em regiões onde há instabilidade política, conflitos ou disputas pelo uso da terra, o que pode representar riscos para os pesquisadores e dificultar a realização de estudos de longo prazo. Além disso, o financiamento e os recursos para a ciência vêm principalmente do norte global, limitando os recursos para financiar diretamente o trabalho de campo nos trópicos. Historicamente, essas limitações resultaram na implementação de campanhas de medição intensiva em apenas alguns locais nas florestas tropicais. As medições nos trópicos não podem ser generalizadas facilmente porque os ecossistemas tropicais são altamente biodiversos, e os dados podem ser representativos apenas das condições locais.

O PANGEA abordará essas limitações criando parcerias duradouras, mutuamente benéficas e colaborativas com organizações tropicais locais para alavancar, reforçar e preencher as lacunas da infraestrutura e dos esforços existentes (**Tabela 5**). Os parceiros foram envolvidos no processo de definição do escopo e estarão envolvidos em todo o PANGEA, inclusive durante o desenvolvimento do Plano Conciso de Experimentos do PANGEA. Consulte a *Seção 8, Estratégia de envolvimento da comunidade*, para obter mais informações. O PANGEA planeja desenvolver relacionamentos com todos esses parceiros para abordar os objetivos científicos do projeto. Observamos, em particular, que os locais de fluxo, como os da rede global de torres de fluxo de covariância de Foucault (FLUXNET), normalmente têm infraestrutura e fornecimento de energia suficientes para hospedar medições de suporte adicionais, como o sensoriamento remoto próximo. Por esse motivo, o PANGEA priorizará as medições de campo que são parceiras dos locais da FLUXNET para fazer uso da infraestrutura existente e criar colaborações. Também observamos que o NGEE-Tropics será encerrado no momento em que o PANGEA entrar em sua fase mais ativa. O PANGEA se baseará diretamente nos esforços de coleta de dados do NGEE-Tropics, estendendo medições semelhantes para a África e coletando dados de sensoriamento remoto localizados, além de se basear nos esforços de modelagem do NGEE-Tropics (consulte a *Seção 6.3*).

Tabela 5. Organizações parceiras com pesquisas e atividades de campo em andamento que são sinérgicas ao PANGEA.

AMMA-CATCH: African Monsoon Multidisciplinary Analysis Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique (Análise Multidisciplinar da Monção Africana - Acoplamento da Atmosfera Tropical e do Ciclo Hidrológico). AndesFlux: torres de fluxo operadas pela PUCP. ForestGEO: Observatório Global da Terra para Florestas. GEM: Rede de Monitoramento de Ecossistemas Globais. PUCP: Pontifícia Universidade Católica do Peru. RAINFOR: Rede de Inventário Florestal da Amazônia.

ORGANIZAÇÕES	CONTRIBUIÇÕES POTENCIAIS
Aliança para a Ciência das Florestas Tropicais (ATFS)	<ul style="list-style-type: none"> • 11 redes de pesquisa (por exemplo, AfriTRON, ForestGEO, GEM, RAINFOR). • 11.656 parcelas de inventário florestal em 56 países. • Forte liderança no desenvolvimento de capacidades.
Observatório de torres altas da Amazônia (ATTO)	<ul style="list-style-type: none"> • Projeto conjunto Brasil-Alemanha. • Três torres de fluxo (incluindo uma de 325 m). • Dados auxiliares (ciclos biogeofísicos/biogeoquímicos e clima).
AndesFlux	<ul style="list-style-type: none"> • 6 torres de eddy flux e parcelas permanentes na Amazônia Ocidental. • Locais que abrangem um gradiente de duração da estação seca (0-6 meses).
Instituto da Bacia do Congo (CBI)	<ul style="list-style-type: none"> • 2 estações de campo biológicas em Camarões. • Redes organizacionais na Bacia do Congo. • CBI School for Indigenous and Local Knowledge (SILK).
Iniciativa Científica da Bacia do Congo	<ul style="list-style-type: none"> • Plataforma liderada por cientistas para investimento científico de longo prazo. • Esforços para desenvolver a capacidade científica local. • Iniciativas de desenvolvimento sustentável.
CongoFlux	<ul style="list-style-type: none"> • Estação de pesquisa tropical em Yangambi (República Democrática do Congo). • Fluxos de covariância de parasitas (CO₂, N₂O, CH₄, H₂O, calor sensível). • Dados adicionais para caracterizar o ciclo de carbono.
FLUXNET	<ul style="list-style-type: none"> • Rede internacional de redes (por exemplo, a rede de torres de fluxo de variação de Foucault das Américas [AmeriFlux], Sistema Integrado de Observação de Carbono [ICOS]). • Dados consolidados e padronizados de fluxo de covariância de Foucault.
GEO-TREES	<ul style="list-style-type: none"> • Rede de redes (por exemplo, AfriTRON, ForestGEO, GEM, RAINFOR). • Coordenou parcelas de inventário florestal e sensoriamento remoto aéreo. • Dados para calibrar estimativas de estoque de carbono a partir do espaço.
Aliança Global de Comunidades Territoriais (GATC)	<ul style="list-style-type: none"> • Rede de Povos Indígenas e Comunidades Locais. • Representa 35 milhões de pessoas em 24 países (África, Américas, Ásia). • Capacitação para gerenciamento sustentável e proteção cultural.
Guyafor e Guyaflux	<ul style="list-style-type: none"> • Guyafor: Rede de 54 parcelas de longo prazo em 17 locais na Guiana Francesa. • Guyaflux: Torre de covariância de Foucault de longo prazo (21 anos) na Guiana Francesa.
LBA	<ul style="list-style-type: none"> • Programa permanente do governo brasileiro. • Plataforma de apoio à infraestrutura e colaboração em pesquisa na Amazônia.
NGEE-Trópicos	<ul style="list-style-type: none"> • Projeto decadal e multi-institucional do Departamento de Energia dos EUA (DOE). • Locais intensivos na Austrália, Brasil, Malásia, Panamá e Porto Rico. • Coleta de dados com o objetivo de aprimorar a modelagem de diversas florestas.
Rede de Fluxo da África Ocidental	<ul style="list-style-type: none"> • 3 torres de fluxo de Foucault: 2 de floresta (Bellefoungou e La Lama), 1 de cultura mista (Nalohou) • Bellefoungou e Nalohou: Covariância de Foucault e medições meteorológicas de longo prazo (16 anos), águas superficiais (rede AMMA-CATCH) e amostras de solo que abrangem gradientes de topografia e geomorfologia. • La Lama: Levantamento de espécies disponível no GBIF

6.3 Modelagem, síntese de dados e análises integrativas

6.3.1 Abordagem de modelagem e integração de dados

A modelagem e a síntese de dados são componentes fundamentais do PANGEA. As atividades de modelagem e síntese de dados abrangerão todos os temas científicos (Seção 2) e serão fundamentais para responder às principais perguntas científicas do PANGEA (Seção 3). Durante todo o projeto, o PANGEA priorizará conjuntos de dados terrestres e aéreos que possam ser sintetizados em várias escalas e integrados por modelos, seja para inicialização, condições de limite ou avaliação. Essa abordagem foi implementada com sucesso em projetos anteriores de integração de dados e modelos (por exemplo, ABoVE e Ngee-Tropics), e planejamos desenvolver esses projetos. As metas de modelagem e síntese de dados são

- Identificar os principais processos que estão mal representados e as regiões no domínio do PANGEA que geram incerteza das principais variáveis e processos nos modelos existentes.
- Desenvolver atividades semelhantes aos experimentos de simulação de sistemas de observação (OSSEs) que ajudarão a informar os melhores locais e gradientes necessários para maximizar a representatividade dos locais intensivos no domínio do PANGEA.
- Sintetizar e dimensionar medições de paisagens para os domínios PANGEA principal e ampliado usando sensoriamento remoto e modelagem.
- Implementar novos processos e técnicas, bem como aprimorar os já existentes, que aproveitem a integração de dados e modelos de sensoriamento remoto e aplicá-los para responder às perguntas científicas do PANGEA.

Nas últimas décadas, os modelos da biosfera terrestre expandiram o escopo e incorporaram muitos processos novos que não puderam ser abordados durante o LBA (**Figura 19**). Por exemplo, os modelos baseados em processamento agora resolvem a diversidade estrutural e funcional, uma ampla variedade de dinâmicas de distúrbios naturais e antropogênicos e um forte acoplamento com os ciclos biogeoquímicos (Fisher et al., 2018; Fisher e Koven, 2020; Negrón-Juarez et al., 2020). Estamos agora em um momento em que os processos ecológicos em diversos ecossistemas que impulsionam o ciclo de energia, água, carbono e nutrientes na Terra devem ser levados em conta (Bonan et al., 2024). Da mesma forma, várias classes de modelos têm aproveitado cada vez mais a ampla gama de observações de sensoriamento remoto e, em todo o PANGEA, teremos a participação de uma ampla gama de modelos que podem usar o sensoriamento remoto para inicialização, quantificação de incertezas e assimilação de dados (**Tabela 6**). Além disso, novas tecnologias, como a inteligência artificial, podem avançar a calibração do modelo (Li et al., 2023) e se tornar parte integrante da modelagem preditiva (Schneider et al., 2017; Reichstein et al., 2019; Eyring et al., 2024). No entanto, à medida que os modelos evoluem, a abordagem de desafios futuros, como aclimação, limitação de nutrientes, mudanças na composição funcional, contabilização das emissões de metano e particionamento da alocação de carbono entre a biomassa acima e abaixo do solo, será cada vez mais importante para manter a precisão do modelo.

A projeção da trajetória futura dos ecossistemas tropicais representa um desafio significativo para os ESMs, pois esses modelos devem representar com precisão dinâmicas físicas, biogeoquímicas e ecossistêmicas complexas. Projetos de intercomparação de modelos como CMIPs (Taylor et al., 2012; Eyring et al., 2016) e TRENDY (Friedlingstein et al., 2023; Sitch et al., 2024) são cruciais para acompanhar o desenvolvimento de modelos baseados em processos e identificar áreas que precisam ser aprimoradas (Arora et al., 2020). Embora o benchmarking e a validação dos ESMs tenham se

tornado mais comuns nos últimos anos (Fisher et al., 2018), ainda é raro avaliar sistematicamente o desempenho dos modelos de ciclo de carbono depois que eles foram atualizados (Fer et al., 2021). No entanto, essas comparações com conjuntos de dados observacionais são essenciais para testar hipóteses e avaliar a precisão da previsão (Negron-Juarez et al., 2015, Fisher et al., 2018). O projeto ILAMB fornece ferramentas para rastrear e comparar o desempenho do modelo usando um método abrangente de pontuação de habilidade e incorpora vários conjuntos de dados observacionais para levar em conta a incerteza do modelo (Hoffman et al., 2017; Collier et al., 2018; Braghiere et al., 2023). Uma melhor concordância entre as simulações históricas e as observações pode indicar que os componentes do modelo podem ser refinados para representar melhor os processos, aumentando assim a confiança nas projeções futuras. Além de representar os processos com precisão, o desempenho do modelo pode ser significativamente influenciado pela qualidade e representatividade das condições iniciais e de contorno (Hurtt et al., 2004; Antonarakis, 2014; de Frenne et al., 2021). Os dados coletados por meio do PANGEA serão usados para expandir as ferramentas de benchmarking usando a integração de dados de observação terrestre e de sensoriamento remoto, e para fornecer condições iniciais e de contorno que sejam representativas do estado real dos ecossistemas florestais tropicais.

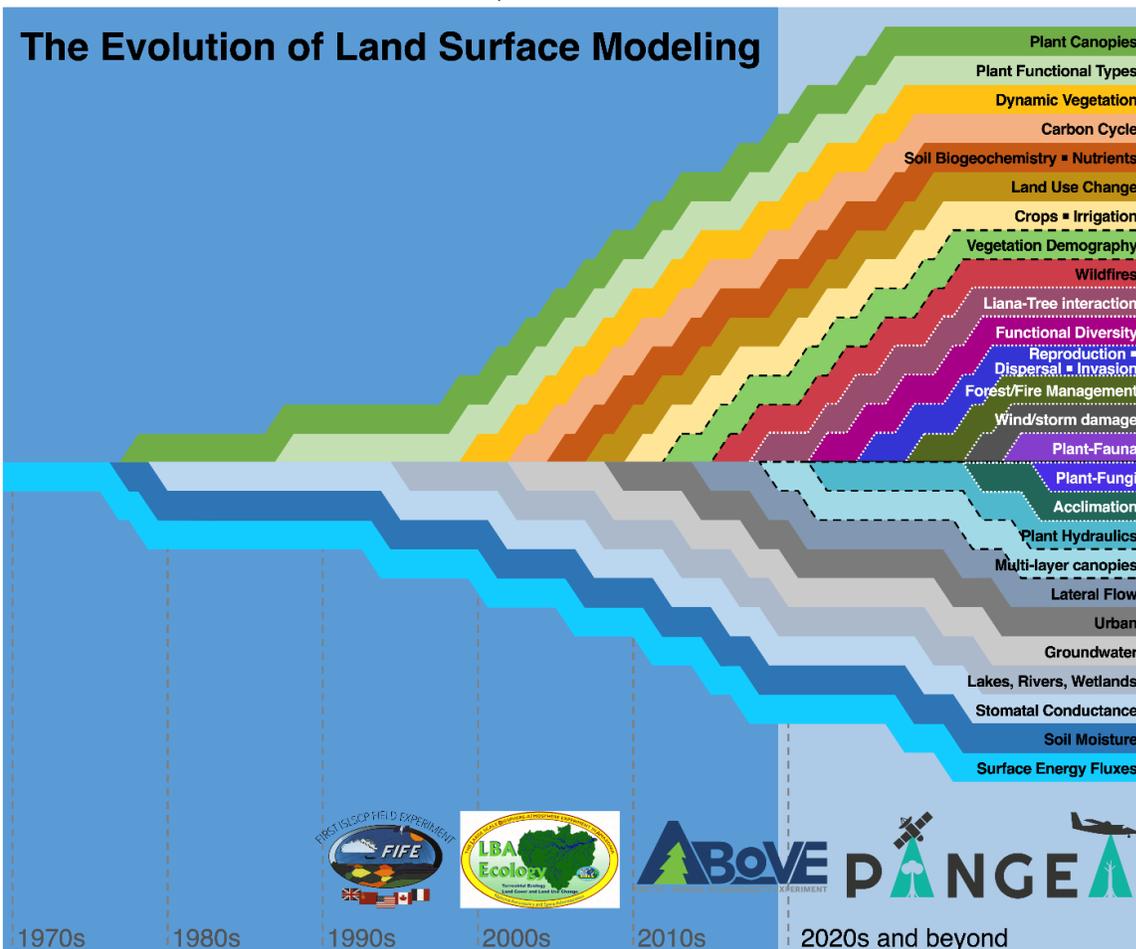


Figura 19. Mudança nos processos resolvidos pelos modelos da biosfera terrestre ao longo das décadas, juntamente com as campanhas anteriores de Ecologia Terrestre da NASA. Linhas tracejadas pretas: processos implementados, ainda em desenvolvimento significativo. Linhas pontilhadas brancas: processos que estão começando a surgir e que devem surgir nos próximos anos. Fonte da figura original: Fisher e Koven (2020).

Tabela 6. Lista não exaustiva de modelos que podem integrar os dados do PANGEA e ajudar a responder perguntas científicas e testar as hipóteses do PANGEA.

Classes de modelos: PBM, modelos de biosfera terrestre baseados em processos; HM, modelos híbridos orientados por dados; TDM, modelos top-down; AI/ML, modelos baseados em aprendizado de máquina de inteligência artificial; e ABM, modelos baseados em agentes. Subclasses de modelos PBM: IBM, modelos baseados em indivíduos; CBM, modelos baseados em coortes; DGVM, modelos dinâmicos de vegetação global (excluindo IBMs e CBMs). CLiMA: Aliança de Modelagem Climática.

MODELOS					EXEMPLOS DE OPORTUNIDADES DE INTEGRAÇÃO DE MODELOS DE DADOS		PERGUNTAS CIENTÍFICAS ABORDADAS
CLASS E	SUBCLASSE	EXEMPLOS	REFERÊNCIAS	EXEMPLOS DE PROCESSOS DE INTERESSE	AÉREO/ESPACIAL SENSORIAMENTO REMOTO	MEDIÇÕES DE CAMPO	
PBM	IBM	FORMIND TROLL	Fischer et al. (2016) Maréchaux & Chave (2017)	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques e fluxos de carbono • Diversidade estrutural/funcional • Taxas demográficas • Taxas de perturbação 	ESTRUTURA FLORESTAL/ESTOQUES DE CARBONO: <ul style="list-style-type: none"> • Lidar aerotransportado • GEDI, EDGE*, NISAR*, BIOMASSA* • Landsat, Sentinel1-, -Sentinel2 COMPOSIÇÃO DA FLORESTA: <ul style="list-style-type: none"> • Hiperespectral aerotransportado • DESIS, EMIT, PACE, PRISMA, SBG* OUTROS: <ul style="list-style-type: none"> • Fluxos de água/energia: ECOSTRESS • Fluxos de C: FLEX, OCO-2/3, TROPOMI • Água do solo: SMAP, SMOS, SWOT • Conteúdo de água do dossel: AMSR-E, EMIT • Fenologia: Landsat; Sentinel-2; drone RGB • Nuvem/precipitação: GOES-R, GPM • Cobertura do solo: Landsat; Sentinel-2 • Área queimada: Landsat, Sentinel-2, VIIRS 	<ul style="list-style-type: none"> • Parcelas de inventário florestal • Lixo/detrritos grossos de madeira • Escaneamento a laser terrestre • Características funcionais das plantas • Dados meteorológicos • Fluxos de covariância de parasitas • COS/Isótopos • Sapflow • Umidade/temperatura do solo • Câmaras de fluxo do solo • Dados GNSS baseados em torres • PhenoCams 	Q1-Q27
	VDM	BioMaE ED/ED3 ED2 Ent TBM FATOS 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"> • Estoques e fluxos de carbono • Diversidade estrutural/funcional • Taxas demográficas • Taxas de perturbação • Ciclo de água/energia • Ciclo de nutrientes • Mudança na cobertura/uso da terra • Área queimada/emissões de fogo 			
	DGVM	CLM ELM JSBACH JULES LPJ ORQUÍDEA	Lawrence et al. (2019) 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"> • Estoques e fluxos de carbono • Taxas de perturbação • Ciclo de água/energia • Ciclo de nutrientes • Mudança na cobertura/uso da terra • Área queimada/emissões de fogo 			
HM		CARDAMOM CLiMA NASA-CASA	Bloom et al. (2016) Braghiere et al. (2023) Potter et al. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques e fluxos de carbono • Ciclo de água/energia • Mudança na cobertura/uso da terra • Área queimada/emissões de fogo 			Q1-Q4; Q6; Q8; Q9; Q14-Q16; Q18; Q22-Q27
TDM		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"> • Fluxos de carbono • Ciclo de água/energia • Área queimada/emissões de fogo 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxos de C: FLEX, OCO-2/3, TROPOMI • Fluxos de água/energia: ECOSTRESS • Área queimada: Landsat, Sentinel-2, VIIRS 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxos de covariância de parasitas • Dados meteorológicos • COS/isótopos • Câmaras de fluxo do solo • PhenoCams 	Q1-Q2; Q4; Q6; Q9; Q14; Q17

MODELOS				EXEMPLOS DE OPORTUNIDADES DE INTEGRAÇÃO DE MODELOS DE DADOS		PERGUNTAS CIENTÍFICAS ABORDADAS	
CLASS E	SUBCLASSE	EXEMPLOS	REFERÊNCIAS	EXEMPLOS DE PROCESSOS DE INTERESSE	AÉREO/ESPACIAL SENSORIAMENTO REMOTO		MEDIÇÕES DE CAMPO
AIML		MapBiomass Fire MetaFlux	Alencar et al. (2022) Nathaniel et al. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> • Estoques e fluxos de carbono • Ciclo de água/energia • Área queimada/emissões de fogo 	ESTOQUES DE CARBONO: <ul style="list-style-type: none"> • Lidar/hiperespectral aerotransportado • GEDI, EDGE*, NISAR*, BIOMASSA* • Landsat, Sentinel-1 e -2 OUTROS: <ul style="list-style-type: none"> • Fluxos de água/energia: ECOSTRESS • Fluxos de C: FLEX, OCO-2/3, TROPOMI • Área queimada: Landsat, Sentinel-2, VIIRS 	<ul style="list-style-type: none"> • Características funcionais das plantas • Dados meteorológicos • Fluxos de covariância de parasitas • COS/isótopos • Câmaras de fluxo do solo • Dados GNSS baseados em torres • PhenoCams 	Q1-Q2; Q4; Q6; Q9; Q14; Q17
ABM		ABSOLUTO SimPachamama RepastSymphony	von Essen & Lambin (2023) Andersen et al. (2017) North et al. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura da terra/mudança no uso da terra • Estado/dinâmica do domicílio • Métricas bioeconômicas • Taxa de reprodução do gado 	ESTOQUES DE CARBONO: <ul style="list-style-type: none"> • Lidar/hiperespectral aerotransportado • GEDI, EDGE*, NISAR*, BIOMASSA* • DESIS, EMIT, PACE, PRISMA, SBG* • Landsat, -Sentinel1 e -2 OUTROS: <ul style="list-style-type: none"> • Cobertura do solo: Landsat; -Sentinel2 • Área queimada: Landsat, Sentinel2-, VIIRS 	<ul style="list-style-type: none"> • Parcelas de inventário florestal • Dados de gerenciamento florestal • Rendimentos de safra/madeira • Dados sobre a dinâmica do gado • Limites do território • Dados do censo humano • Dados da pesquisa • Dados do experimento de escolha 	Q21; Q28

Quadro 3. Exemplo de abordagem de integração de dados de modelagem e sensoriamento remoto do PANGEA

Usando a Pergunta 6 do PANGEA (variabilidade de características funcionais entre continentes e efeitos no ciclo de carbono tropical) e o modelo FATES como um exemplo, a equipe do PANGEA usará abordagens de incerteza de parâmetros (por exemplo, por meio de conjuntos de simulação usando o PECAn) para identificar quais características foliares e hidráulicas mensuráveis impulsionam a sensibilidade do modelo de fluxos de CO₂ e H₂O no FATES (doravante, características principais). Em seguida, a equipe caracterizará as principais características em locais de interesse por meio de trabalho de campo e sensoriamento remoto em gradientes de perturbação e clima em ambos os continentes. Eles usarão os dados coletados para restringir as distribuições de parâmetros nos gradientes de interesse. Eles usarão medições de fluxos de torres e recuperações de sensoriamento remoto para estabelecer relações emergentes entre gradientes de características e fluxos derivados de sensoriamento remoto nos mesmos gradientes como referências. Em seguida, usarão o modelo restrito para investigar como os ecossistemas em diferentes regimes de precipitação e severidades de distúrbio respondem a secas extremas e quais processos (por exemplo, limitação da umidade do solo ou déficit de pressão de vapor) impulsionam as respostas a secas extremas. Ao usar uma abordagem integrada entre modelos e aquisição de dados, o PANGEA permitirá um avanço significativo da capacidade de previsão dos modelos para quantificar a vulnerabilidade das florestas tropicais às mudanças globais.

As atividades de síntese de dados do PANGEA facilitarão o aumento da escala das medições do solo da paisagem e das observações aéreas descritas nas Seções 6.2.4 e 6.2.5 para escalas regionais e pantropicais. Ao sintetizar as principais variáveis usando conjuntos de dados de sensoriamento remoto aéreo emparelhados com medições no solo (por exemplo, umidade do solo, características funcionais da planta, fluxos), podemos estabelecer relações empíricas robustas usando modelos estatísticos para interpolar variações de parede a parede em variáveis críticas. Por exemplo, as medições do solo sobre as perdas de carbono da biomassa devido a secas em vários locais podem ser usadas para desenvolver modelos estatísticos que prevejam mudanças na biomassa em resposta à variação da umidade do solo, VPD, frequência de secas e grupos funcionais de plantas. O produto derivado pode então ser usado para mapear os impactos pantropicais sobre a biomassa florestal após cenários específicos de seca, melhorando nossa compreensão das respostas do ecossistema aos estressores ambientais em diversas paisagens tropicais. Além disso, a combinação de vários produtos de síntese de dados pode ser usada para explorar as relações emergentes dos ecossistemas florestais tropicais. Por exemplo, os mapas de altura do dossel antes das secas podem ser contrastados com os índices de estresse evaporativo durante as condições de seca. Esses conjuntos de dados podem ser aplicados como restrições e referências adicionais para modelos baseados em processos.

O PANGEA aproveitará os modelos de inteligência artificial e aprendizado de máquina (IA/ML) para a síntese de dados devido à sua robustez em lidar com não linearidades e interações entre processos multifatoriais e preditores. A IA/ML pode ser usada ainda para emular modelos baseados em processos (Swaminathan et al., 2024) e explorar com mais eficiência o espaço paramétrico dos modelos ou executar previsões de curto/longo prazo (Li et al., 2023; Meunier et al., 2024). Para melhorar a interpretabilidade e os insights sobre os processos ecológicos subjacentes dos modelos de IA/ML, o PANGEA implementará técnicas como (1) Análise de Importância de Recursos, que

quantifica e destaca os fatores mais influentes que impulsionam as previsões do modelo; e (2) Gráficos de Dependência Parcial, que podem ser empregados para visualizar como as alterações em variáveis específicas afetam os resultados previstos. Além disso, o PANGEA empregará técnicas que não sejam de IA, incluindo inferência causal (Venelli Pyles et al., 2022), análise de séries temporais (Bullock et al., 2020), incluindo Breaks For Additive Season and Trend Monitor (BFAST; DeVries et al., 2015; Verbesselt et al., 2012) e estatística bayesiana (Goulamoussène et al., 2017), que produzem percepções sobre relações de causa e efeito, revelam padrões temporais e quantificam a incerteza nas previsões e análises. Essas estratégias também fornecerão percepções valiosas e fluxos de trabalho eficazes que podem ser integrados a modelos baseados em processos para reduzir a incerteza dos parâmetros e aumentar a precisão das previsões (Dietze et al., 2013; Meunier et al., 2021).

Um desafio significativo na compreensão da dinâmica das florestas tropicais em grandes escalas é a série temporal relativamente curta da maioria dos produtos de dados relacionados à estrutura, composição, estoques de carbono e função da floresta. Para superar esse desafio e obter dados de crescimento de biomassa florestal de alta resolução e de longo prazo, trabalhos anteriores usaram uma abordagem de substituição de espaço por tempo, que calcula as taxas de recuperação de variáveis de interesse (por exemplo, biomassa, altura do dossel) a partir de um tempo de referência em áreas que sofreram distúrbios em anos diferentes (e conhecidos) (Heinrich et al., 2021; Rappaport et al., 2018). Essa abordagem, juntamente com os modelos de IA/ML e as técnicas tradicionais de síntese de dados, garante que o PANGEA possa avaliar e prever de forma robusta a dinâmica das florestas tropicais em várias escalas e períodos de tempo, apoiando o uso de registros de satélite de longo prazo como resultado das aquisições de dados e dos avanços metodológicos do PANGEA. As cronossequências têm sido usadas para restringir modelos baseados em processos que caracterizam as distribuições de idade desde o último distúrbio (Ma et al., 2017).

6.3.2 Coordenação com outras comunidades de modelagem e integração de dados

A coordenação com comunidades estabelecidas de modelagem, síntese de dados e integração de dados será fundamental para ampliar o impacto do PANGEA além do fornecimento de observações de campo e de satélite. Por exemplo, o projeto TRENDY (Sitch et al., 2024), que coordena as simulações globais do ciclo de carbono, representa outra parceria potencialmente importante. Os dados detalhados do PANGEA específicos do local para florestas tropicais serão essenciais para melhorar a parametrização e o desempenho dos modelos TRENDY, especialmente para a dinâmica e os fluxos regionais de carbono em biomas tropicais. Da mesma forma, o CMIP (Eyring et al., 2016), líder global em modelagem climática, se beneficiará das observações do PANGEA, especialmente no contexto do aprimoramento da representação dos ecossistemas tropicais. Esses conjuntos de dados serão muito valiosos para avaliar e aprimorar os modelos usados em esforços globais, incluindo os componentes terrestres do CMIP. Essa parceria aprimorará a representação dos ecossistemas tropicais nos modelos do sistema terrestre, fornecendo parâmetros de referência especificamente adaptados às florestas tropicais, ajudando os modelos globais a obter maior precisão em suas previsões.

O PANGEA garantirá que seus dados e descobertas contribuam para os esforços em andamento para melhorar o desempenho do modelo de terra e reduzir as incertezas nas projeções globais como resultado das respostas das florestas tropicais às mudanças climáticas e de uso da terra. Por exemplo,

um parceiro importante do PANGEA é o projeto ILAMB (Collier et al., 2018). Os dados coletados por meio do PANGEA e os produtos derivados desenvolvidos por meio da síntese de dados podem se tornar novas referências em processos que atualmente apresentam alta incerteza entre os conjuntos de dados (por exemplo, produtividade primária bruta) ou estão ausentes no ILAMB (por exemplo, demografia da vegetação, hidráulica da planta). Da mesma forma, o PANGEA colaborará com o PEcAn (Predictive Ecosystem Analyzer; LeBauer et al., 2013), que se concentra em aproveitar os conjuntos de dados de campo e de satélite para otimizar os parâmetros do modelo e melhorar as previsões de fluxo de carbono e água (Dokoochaki et al., 2022; Meunier et al., 2021). O PANGEA colaborará com comunidades de modelos baseados em processos que integraram com sucesso observações de sensoriamento remoto da demografia da vegetação, como o Ecosystem Demography Model (ED2; Antonarakis et al., 2014; Longo et al., 2020). Outro parceiro importante é o NGEE-Tropics, que, embora esteja programado para terminar na época em que o PANGEA entrar em sua fase mais ativa, fornece uma base rica de ferramentas de modelagem, incluindo o modelo FATES (Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator; Koven et al., 2020), e uma vasta experiência em projetar e executar campanhas de campo para coletar dados com o objetivo de reduzir a incerteza do modelo. O PANGEA também pode contar com a parceria de uma equipe transdisciplinar de cientistas e tecnólogos, recentemente financiada pelo programa AIST (Advanced Information Systems Technology) da NASA, que desenvolverá um ESDT (Earth System Digital Twin) intitulado "Central Africa Carbon Storage and Biodiversity Corridors". Esse ESDT integra extensos dados avançados de sensoriamento remoto sobre carbono e biodiversidade, dados socioeconômicos e modelos de movimentação de animais em modelos do sistema terrestre. Seu objetivo é avaliar a situação atual e projetada dos estoques de carbono florestal e da biodiversidade, avaliar a eficácia das estratégias de conservação e analisar os possíveis impactos de ações globais, como o Acordo de Paris e o REDD+, nos ecossistemas da África Central. Por fim, o Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) pode complementar os esforços do PANGEA com técnicas avançadas de assimilação de dados que podem ser usadas para referências e condições de limite para modelos preditivos da dinâmica de florestas tropicais. Exemplos de produtos incluem os produtos SMAP Nível 4 sobre temperatura e umidade do solo na zona de enraizamento (Reichle et al., 2019) e a Análise Retrospectiva da Era Moderna para Pesquisa e Aplicações, Versão 2 (MERRA-2, Gelaro et al., 2017).

Além das comunidades que desenvolvem modelos baseados em processos, produtos de síntese de dados e fluxos de trabalho de benchmarking, o PANGEA pretende colaborar com iniciativas que assimilam diretamente dados de sensoriamento remoto em previsões de modelos. Por exemplo, a modelagem inversa desempenhará uma função essencial na estratégia de coordenação do PANGEA, oferecendo uma estrutura para reconciliar discrepâncias entre fluxos de ecossistemas observados e simulados. Essa técnica ajudará a assimilar conjuntos de dados em larga escala derivados de satélites com medições de campo, permitindo previsões refinadas da dinâmica do carbono e da água em biomas tropicais (Liu et al., 2016). O PANGEA também visa colaborar com esforços inovadores de modelagem, como o NASA-CASA (modelo de ecossistema NASA Carnegie-Ames-Stanford; Potter et al., 1993; 2012) e o CARDAMOM (CARbon DAta-MODEl fraMework; Bloom et al., 2020), que combinam aquisições de satélite e terrestres para assimilação e modelagem de dados do ciclo de carbono e foram efetivamente aplicados em OSSEs (Philip et al., 2019). Por fim, a colaboração com a CliMA (Climate Modeling Alliance; Schneider et al., 2017), que está desenvolvendo um modelo de sistema terrestre de ponta que integra técnicas de aprendizado de máquina e assimilação de dados, aumentará a capacidade do PANGEA de dimensionar observações de florestas tropicais. Essas colaborações ajudarão a preencher a lacuna entre a coleta de dados de campo e a modelagem

preditiva, gerando novas percepções sobre o funcionamento dos ecossistemas tropicais e sua função no sistema terrestre.

6.3.3 Atividades de modelagem e integração de dados

As atividades de modelagem e síntese de dados ocorrerão durante todo o PANGEA. No entanto, essas tarefas mudarão de foco à medida que o projeto avança. Assim que uma Equipe Científica for selecionada para o PANGEA, será criado um Grupo de Trabalho de Modelagem e Síntese de Dados (SWG). Esse grupo identificará as principais áreas e processos que atualmente geram incerteza nos modelos baseados em processos relacionados aos ciclos de carbono, água, energia e nutrientes, bem como à biodiversidade e às interações humanas em florestas tropicais úmidas. O grupo desenvolverá esforços de intercomparação de modelos usando benchmarking estabelecido (por exemplo, TRENDY, FLUXCOM) e ferramentas (por exemplo, ILAMB) para informar a elaboração do projeto. O SWG também buscará respostas rápidas por meio do uso de abordagens baseadas em experimentos de simulação de sistemas de observação (OSSEs) usando modelos e drivers existentes para fornecer uma primeira avaliação das principais áreas de incerteza e áreas que não têm representatividade nas observações existentes.

Após as avaliações iniciais e os esforços de OSSE, o foco do SWG mudará para objetivos múltiplos e complementares. As atividades vinculadas aos modelos baseados em processos se concentrarão na implementação dos principais mecanismos ausentes identificados durante a Fase 1, o que aumentará a compreensão dos fatores determinantes dos padrões observados nos ciclos de carbono, água, energia e nutrientes nas campanhas de campo. As atividades ligadas à síntese permitirão a ampliação das descobertas das escalas local e regional para a global. A pesquisa de síntese de dados se concentrará no uso dos conjuntos de dados do PANGEA para gerar produtos em escalas que possam ser assimilados por modelos inversos e híbridos, bem como usados para aferição de modelos baseados em processos. As abordagens de síntese incluirão, mas não se limitarão a, inteligência artificial, aprendizado de máquina e substituição espaço-por-tempo. Os membros do grupo que trabalham com modelos inversos e híbridos usarão os conjuntos de dados do PANGEA e os produtos de síntese derivados para quantificar a incerteza na quantificação em escala de variáveis e fluxos de estado. Os esforços não se concentrarão em um único conjunto de modelos e técnicas, mas reunirão métodos que permitam o dimensionamento de medições limitadas no espaço e no tempo para toda a região pantropical, juntamente com estimativas robustas de incerteza.

Durante uma síntese final, o PANGEA se concentrará em estudos que usem os modelos restritos e aprimorados e os produtos de dados desenvolvidos anteriormente para abordar diretamente as questões científicas do PANGEA e testar as principais hipóteses. As pesquisas que usam modelos baseados em processos nesse estágio devem identificar e atribuir as causas e os fatores determinantes das mudanças no funcionamento da floresta, aproveitando os conjuntos de dados do PANGEA para a inicialização e a quantificação da incerteza. A síntese de dados e os esforços de modelagem inversa se concentrarão na descrição de como os principais eixos de variabilidade nas florestas tropicais úmidas impulsionam a heterogeneidade dos fluxos de carbono, energia, água e nutrientes, bem como a biodiversidade dentro e entre continentes. Juntas, essas atividades aumentarão a compreensão da resiliência das florestas tropicais sob as mudanças globais e fornecerão respostas integradas entre os Temas Científicos (Seção 3).

7 Capacitação, treinamento e educação

O fortalecimento da capacidade dos participantes dos EUA e dos países tropicais por meio do investimento em treinamento, educação e troca de conhecimento é fundamental para o sucesso do PANGEA e crítico para preparar a próxima geração de cientistas com a experiência e as ferramentas necessárias para aproveitar totalmente o Sistema de Observação da Terra (EOS) da NASA e o conhecimento de sistemas socioecológicos, métodos científicos, gerenciamento e análise de dados e desenvolvimento de modelos científicos. A capacitação, o treinamento e a educação do PANGEA envolverão as comunidades de pesquisa e força de trabalho sediadas nos EUA e as comunidades locais e nacionais dos países com florestas tropicais que fazem parceria com o PANGEA. A experiência adquirida durante os projetos de campo anteriores do TE, especialmente o LBA, demonstrou que a capacitação aumentou a longevidade dos projetos e justificou os projetos para os países anfitriões. O PANGEA fará parceria com os programas existentes da NASA, bem como com instituições colaboradoras locais e internacionais, para planejar e se envolver em atividades de intercâmbio de conhecimento, capacitação, treinamento e educação que sejam apropriadas para uma gama de participantes em potencial, incluindo estudantes, cientistas em início de carreira, a força de trabalho mais ampla, povos indígenas e comunidades locais (IPLCs) e cientistas. A capacitação, o treinamento e a educação se concentrarão no incentivo à participação de IPLCs, da força de trabalho em geral e de um grupo de estudantes de graduação e pós-graduação.

As atividades de capacitação, treinamento e educação do PANGEA serão projetadas de acordo com cada público específico. Durante o desenvolvimento do Plano de Experimentos Conciso e, em seguida, de forma intermitente ao longo do PANGEA, serão realizadas avaliações para determinar o que os diferentes membros da comunidade do PANGEA exigem e desejam em termos de capacitação, treinamento e atividades educacionais. A avaliação identificará os possíveis beneficiários e os alinhará com os recursos disponíveis. O treinamento é um alvo preferencial para muitas oportunidades de cofinanciamento (consulte a *Seção 10.2, Oportunidades de cofinanciamento*).

7.1 Desenvolvimento da força de trabalho

O PANGEA promoverá as metas delineadas na Visão 2030 do Conselho Nacional de Ciências (NSB) ao fomentar o desenvolvimento da força de trabalho nas áreas STEM. Por meio de tecnologias avançadas de sensoriamento remoto, desenvolvimento e aplicações de modelos de sistemas terrestres e extenso trabalho de campo internacional, o PANGEA cultivará uma força de trabalho com formação em STEM, equipada com conhecimento especializado em pesquisa fundamental de ciência e engenharia e ML/AI, incluindo aprendizagem profunda, modelos de linguagem grande, visão computacional e assimilação de dados, para enfrentar desafios ecológicos e sociais críticos em regiões pantropicais e habilidades aplicáveis globalmente. O PANGEA oferece oportunidades de treinamento prático para estudantes e cientistas em início de carreira, unindo a ciência fundamental com ferramentas aplicadas e tomada de decisões orientadas para soluções, além de garantir a inclusão por meio do envolvimento de instituições que atendem a minorias (MSIs). Além de apoiar os esforços existentes de treinamento e desenvolvimento da força de trabalho da NASA por meio do ARSET, DEVELOP e da Iniciativa dos Povos Indígenas da NASA, os programas de treinamento do PANGEA se alinham bem com a Inteligência Artificial para Previsibilidade do Sistema Terrestre (AI4ESP) do DOE e com os programas de Pesquisa, Inovação, Sinergias e Educação (RISE) e Oportunidades de Geociência para Liderança em Diversidade (GOLD-EN) da NSF (**Tabela 1**). Ao

integrar parceiros de instituições acadêmicas, governamentais e internacionais, o PANGEA promoverá a pesquisa fundamental e a preparação da força de trabalho em alinhamento com a Visão 2030 do NSB.

7.2 Como educar um grupo de alunos de pós-graduação

O PANGEA oferecerá uma oportunidade única para uma geração de estudantes de graduação e pós-graduação dos Estados Unidos e dos países tropicais anfitriões desenvolverem pesquisas altamente integradas e transdisciplinares. As metas científicas do PANGEA permitirão que os alunos compreendam os ecossistemas tropicais e sua importância para o planeta, valorizem os sistemas socioecológicos e realizem projetos de pesquisa com uso intensivo de dados, utilizando observações de campo e conjuntos de dados de sensoriamento remoto, e desenvolvam habilidades essenciais em síntese de dados (incluindo inteligência artificial, aprendizado de máquina e assimilação de dados), bem como modelagem baseada em processos. Equipar os alunos com as habilidades para entender a importância e promover a conservação e o gerenciamento sustentável de paisagens de florestas tropicais, gerenciando "big data", inteligência artificial e modelagem computacionalmente intensiva, preparará os alunos para várias oportunidades de carreira na academia, no governo e no setor. Além disso, a implementação do projeto PANGEA será inerentemente colaborativa e reunirá cientistas de várias instituições e universidades, tanto nos EUA quanto internacionalmente. Ao participar de atividades de campo e eventos científicos, os alunos de graduação e pós-graduação interagirão e colaborarão diretamente com pesquisadores da NASA e de outras agências dos EUA (por exemplo, DOE, USFS, USGS). Isso abrirá possibilidades para que os alunos sigam carreiras de longo prazo nessas agências e busquem atividades empresariais e do setor privado em setores relacionados. O PANGEA permitirá que os alunos desenvolvam as habilidades de pensamento crítico colaborativo necessárias para parcerias multi-institucionais e internacionais.

O PANGEA também dará continuidade à função fundamental da NASA de promover uma forte capacitação internacional, com base na experiência do LBA, durante a qual a capacitação foi mutuamente benéfica para a contribuição do Programa de Ecologia Terrestre da NASA para a primeira fase dos esforços do LBA (LBA-ECO) e para os anfitriões brasileiros sul-americanos da NASA. O Brasil exigiu um componente de treinamento e educação para cada investigação do LBA, definido pelos recursos disponíveis e geralmente vinculado a programas acadêmicos no Brasil. O maior grupo de estudantes treinados no LBA foi o de estudantes brasileiros de graduação que foram pagos para participar de projetos científicos. Embora esses alunos realizassem principalmente trabalhos técnicos, muitos se tornaram coautores de artigos e alguns foram até mesmo autores principais. Esse programa ajudou a identificar os alunos envolvidos na obtenção de diplomas de mestrado e doutorado. Cerca de 500 estudantes brasileiros obtiveram diplomas de mestrado e doutorado associados às investigações do LBA. Embora uma pequena parte dos estudantes financiados tenha sido paga por projetos de pesquisa da NASA (principalmente para estudantes que obtiveram seus diplomas nos EUA), a maioria das bolsas de estudo foi concedida por meio de mecanismos brasileiros existentes em seus ministérios nacionais de educação e ciência e por meio de fundações de pesquisa em nível estadual. Embora o investimento total em dólares tenha sido inferior a 5% do investimento da NASA no LBA-ECO e em outras atividades de pesquisa no exterior, o retorno imediato e de longo prazo foi enorme. No Brasil, muitos graduados do LBA realizaram trabalhos importantes na área ambiental em universidades, em agências governamentais municipais, estaduais e nacionais e em ONGs, superando as expectativas brasileiras quanto ao impacto do treinamento e da educação do LBA.

A maior oportunidade de capacitação e treinamento do PANGEA está na equipe científica. Seguindo os modelos do LBA e do BioSCape, a NASA pode incentivar ou exigir que as propostas sejam desenvolvidas em conjunto com pesquisadores locais. Essas exigências garantiram que cerca de 50% da equipe científica do BioSCape fosse de instituições sul-africanas. Da mesma forma, os anúncios de financiamento do PANGEA podem exigir ou incentivar fortemente o treinamento, a educação e a capacitação como parte das atividades propostas, de forma semelhante ao que foi feito durante o LBA. O PANGEA pode trabalhar diretamente com iniciativas existentes, como o Instituto de Tecnologia da Amazônia (AmIT), a equipe da Fase 3 do LBA, a Iniciativa Científica da Bacia do Congo (CBSI), a Rede de Pesquisa Florestal da África Central (R2FAC) e o programa de Pesquisa Aplicada em Ecologia e Ciências Sociais (RESSAC) para atingir esse objetivo.

A abordagem do PANGEA em relação à ciência equitativa, à capacitação e ao treinamento enfrentará diretamente a questão das campanhas de sobrevoo e da ciência de paraquedas. Com base nos sucessos do LBA, acreditamos que o PANGEA pode publicar 100 artigos de primeira autoria de cientistas da África, o que contribuirá para fechar a lacuna do Índice de Paraquedas na África Central (Culotta et al., 2024). Esses cientistas africanos continuarão o legado do PANGEA, em colaboração com colegas internacionais nos trópicos, bem depois do fim do projeto.

Outra meta importante da estratégia de capacitação do PANGEA é fortalecer e aumentar a comunidade de usuários de dados da NASA Earth nos trópicos, incluindo povos indígenas e comunidades locais. As atividades aéreas do PANGEA gerarão muito entusiasmo em torno do potencial do sensoriamento remoto para muitas aplicações, incluindo aplicações voltadas para a mitigação das mudanças climáticas e o monitoramento de carbono, a conservação da biodiversidade, a agricultura sustentável e a prevenção e o monitoramento de riscos de desastres. O grupo diversificado de usuários se beneficiará muito dos avanços metodológicos do PANGEA para usar os recursos de satélite da NASA. O PANGEA usará o impulso criado pelas campanhas aerotransportadas para catalisar e promover uma aplicação mais ampla dos conjuntos de dados espaciais da NASA, especialmente aqueles que são adequados para serem examinados juntamente com os produtos de dados aerotransportados, por exemplo, EMIT, PACE, ECOSTRESS, GEDI e, no futuro, NISAR e SBG. Trabalhando com parceiros regionais, o PANGEA colaborará com os países anfitriões no desenvolvimento de bancos de dados nacionais para que o conhecimento emergente do PANGEA possa ser integrado e aplicado às demandas regionais e nacionais de promoção socioeconômica e desenvolvimento de políticas. A abordagem do PANGEA para a capacitação pretende criar grupos de usuários Early Adopter da NASA nos trópicos - particularmente para o NISAR e o SBG, bem como para missões da ESA como BIOMASS, CHIME e FLEX. O PANGEA se baseará na estratégia Earth Science to Action da NASA para "desenvolver capacidade por meio de um conjunto extenso e diversificado de parcerias, tanto tradicionais quanto novas" (St Germain, 2024 - [Plano Estratégico ES2A](#)). Os parceiros do PANGEA incluirão "agências governamentais nacionais e internacionais, universidades, organizações não governamentais e internacionais, o setor privado e filantropos", de acordo com essa estratégia. O PANGEA fará parceria com os programas existentes da NASA e com os esforços de treinamento liderados por parceiros, de acordo com a meta de "alavancar as iniciativas existentes de ampliação de valor" que "podem ser nacionais ou internacionais" para "alcançar profundidade e ampla amplitude em nosso impacto e apoio à humanidade, ao mesmo tempo em que é econômico" (St Germain, 2024 - [Plano Estratégico ES2A](#)). Exemplos estão incluídos na **Tabela 7**.

Em última análise, o PANGEA é uma oportunidade de melhorar a colaboração e o entendimento entre continentes, deixar um legado de conhecimentos e conjuntos de dados e apoiar ações diretas agora para conservar as florestas tropicais e mitigar as mudanças climáticas. Talvez o legado mais provável e duradouro seja o núcleo básico de especialistas treinados e apoiados que contribuirão para liderar a próxima geração em avanços científicos e tecnológicos e ações orientadas para soluções para enfrentar os desafios mais urgentes da Terra.

8 Estratégia de envolvimento da comunidade

O PANGEA se envolverá com diversas comunidades para tratar de questões científicas, identificar sinergias com prioridades de pesquisa locais e implementar o PANGEA de forma benéfica nas paisagens e nos países que participarão dessa pesquisa, além de estabelecer e fortalecer parcerias de longo prazo entre instituições internacionais e sediadas nos EUA. A estratégia se baseia no conhecimento, na especialização e nas experiências compartilhadas durante o estudo de escopo do PANGEA, que envolveu mais de 800 pessoas e 300 organizações de 42 países em 5 continentes por meio de (a) workshops consultivos, (b) eventos de divulgação, (c) discussões em grupos de trabalho, (d) reuniões bilaterais e (e) pesquisas na Web. Nos Estados Unidos, o PANGEA se envolveu com mais de 110 agências federais e instituições americanas em 30 estados e em Washington, DC. Uma descrição mais detalhada dos métodos de engajamento usados durante o estudo de escopo é fornecida no *Apêndice C*. Aqui, apresentamos uma lista das comunidades priorizadas para o envolvimento no PANGEA, os princípios que sustentam os esforços de envolvimento do PANGEA e a estratégia do PANGEA para envolver as comunidades locais e cultivar um legado positivo e de longo prazo durante e após o projeto.

Tabela 7. Parceiros e provedores em potencial que poderiam colaborar com o PANGEA em atividades de treinamento e capacitação.

PARCEIRO	ATIVIDADE	PÚBLICO-ALVO
AI4ESP	Trabalhar com a AI4ESP (Inteligência Artificial para Previsibilidade do Sistema Terrestre) para integrar a IA aos modelos de ES para aprimorar os recursos de previsão, enfrentar desafios científicos e melhorar a integração de dados e as técnicas de observação.	Pesquisadores e estudantes, tomadores de decisão
AIMS	Treinamento de pós-graduação, pesquisa e envolvimento público em matemática, ciências e aprendizado de máquina. A rede AIMS tem 5 centros de excelência que ensinam o African Masters in Machine Intelligence (AMMI), inclusive em Camarões, Gana e Ruanda. A rede AIMS tem mais de 2.400 ex-alunos de 44 países africanos, dos quais 33% são mulheres.	Estudantes africanos
ARSET	Série de webinars de treinamento em várias partes, com base no modelo de treinamento presencial testado durante a BioSCape.	Tomadores de decisão, acadêmicos, cientistas
ATBC	Treinamentos, workshops e networking entre pesquisadores, pantropicamente com a Association for Tropical Biology and Conservation (ATBC), que promove pesquisa, educação e comunicação sobre biologia tropical e conservação. A ATBC tem cerca de 1.000 membros de 70 países e apóia o desenvolvimento de capacidades e organiza reuniões internacionais.	Membros do ATBC de mais de 70 países
DAACs	Cadernos de treinamento e workshops modelados com base naqueles já apresentados em conferências (por exemplo, AGU, ESA, ATBC) que facilitam o acesso ao EOS da NASA.	Pesquisadores em todos os estágios da carreira
DESENVOLVER	Estabelecer parcerias com tomadores de decisão que estejam interessados em usar os dados terrestres da NASA para apoiar seu trabalho. Cada parceiro terá uma equipe de DESENVOLVIMENTO de 4 a 5 pessoas trabalhando com ele durante 10 semanas (renováveis) para desenvolver a capacidade de usar os dados da NASA Earth para atender às suas necessidades.	Tomadores de decisão e a força de trabalho em geral
FLUXNET	Treinamento e ferramentas para usar/analisar dados de torres de fluxo de covariância de Foucault, inclusive em vários idiomas (atualmente em espanhol e inglês). O PANGEA trabalhará com a FLUXNET para ampliar a tradução para o francês e o português e desenvolver novos materiais de treinamento que integrem sensoriamento remoto e dados de torres de fluxo.	Pesquisadores e estudantes
GLOBO	Atividades educacionais adaptadas localmente para alunos do ensino fundamental e médio, professores e cidadãos, incluindo elementos de treinamento de instrutores que permitem a multiplicação. Oportunidade de canalizar o entusiasmo das campanhas aéreas e dos dados de observação da Terra.	Alunos do ensino fundamental e médio, professores e cidadãos
INICIATIVA DOS POVOS INDÍGENAS	Colaborar com as comunidades indígenas para aprimorar o uso do EOS para a tomada de decisões informadas. O PANGEA desenvolveu parcerias com organizações de alianças indígenas nos trópicos, incluindo o GATC e o RRI, e coordenará com a Iniciativa de Povos Indígenas da NASA para ampliar os esforços de co-desenvolvimento de treinamentos, apoio a projetos liderados por indígenas, fortalecimento de relacionamentos e criação de oportunidades para a inclusão indígena na ESD da NASA.	Comunidades indígenas
NSF RISE	Promover colaborações transdisciplinares que envolvam a comunidade mais ampla de geociências para impulsionar descobertas e inovações no desenvolvimento da força de trabalho.	Pesquisadores e estudantes
SELPER	Identificar oportunidades de parceria com a SELPER, a Sociedade Latino-Americana de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Espaciais, para desenvolver atividades de pesquisa e treinamento em sensoriamento remoto nos países da América Latina. A SELPER promove essas atividades em workshops, simpósios e cursos de curta duração, muitas vezes em parceria com a comunidade internacional mais ampla.	Membros do SELPER e participantes de reuniões científicas
SERVIR	Coordenar com os centros SERVIR para desenvolver serviços personalizados para as necessidades específicas de tomada de decisão das organizações parceiras locais, com base no Kit de Ferramentas de Planejamento do SERVIR para fornecer instruções regionalmente direcionadas sobre como avaliar e fornecer agricultura impactante, restauração florestal e outras intervenções.	Centros SERVIR, parceiros de implementação (governos locais e nacionais, ONGs)

8.1 Co-desenvolvimento e parceiros do PANGEA

A pesquisa do PANGEA sobre florestas tropicais complementarará e expandirá muitos dos esforços existentes. Os dados adquiridos durante as campanhas de campo do PANGEA serão usados para inicializar, avaliar e restringir as previsões de vários modelos de ecossistemas terrestres baseados em processos e modelos do sistema terrestre em florestas tropicais. Exemplos de modelos incluem o FATES, um modelo cujo desenvolvimento é apoiado pelo DOE por meio do NGEE-Tropics, bem como vários modelos com apoio atual e anterior da NASA, como o BiomeE (NASA-GISS), ED2 (liderado pela Universidade de Harvard), ED3 (Universidade de Maryland), o componente terrestre do CLIMA (Instituto de Tecnologia da Califórnia e JPL) e o CARDAMOM (JPL) (Seção 6.3). O PANGEA aprimorará os esforços da SilvaCarbon ao incorporar uma gama mais ampla de locais de campo e dados de sensoriamento remoto, oferecendo percepções mais profundas sobre a dinâmica do carbono e os processos florestais em escalas regional e global e, ao mesmo tempo, fortalecendo suas análises de monitoramento, relatório e verificação (MRV). A compreensão e a análise aprimoradas da dinâmica do carbono e das funções do ecossistema serão elementos fundamentais para informar o Programa Internacional do USDA USFS no desenvolvimento de estratégias de gerenciamento e conservação florestal com organizações internacionais. Alguns desses esforços são limitados a pequenas áreas geográficas ou representam redes de locais individuais. Outros, como a iniciativa One Forest Vision (OFVi) e a GEO-TREES, têm ambições pantropicais, como o PANGEA. A gama de oportunidades de parceria é ilustrada com exemplos na **Tabela 5** e na **Tabela B-1**. O *Apêndice B* descreve com mais detalhes as comunidades com as quais o PANGEA se envolverá, lista os atuais parceiros do PANGEA de acordo com o tipo de comunidade e discute considerações mais específicas sobre o envolvimento de cada um.

O PANGEA interpreta a palavra *comunidade* de forma ampla para abranger uma grande variedade de grupos formais e informais de pessoas que se percebem como membros de um grupo, que podem compartilhar interesses, experiências, recursos, atividades, profissões, meios de subsistência, cultura, geografia, origens, idioma ou qualquer combinação dos itens acima. The scoping study identified ten types of communities with which PANGEA will prioritize engagement: (1) NASA; (2) other U.S. government agencies; (3) international space agencies and support facilities; (3) U.S. (3) agências governamentais americanas e estrangeiras, incluindo formuladores de políticas e institutos nacionais de pesquisa; (4) comunidade acadêmica, instituições científicas e sociedades científicas; (5) iniciativas coordenadas de pesquisa internacional; (6) sociedade civil, incluindo organizações de conservação (CSOs); (7) povos indígenas e alianças e organizações de comunidades locais; (8) comunidade de doadores; (9) setor privado, incluindo indústrias agrícolas e madeireiras; e (10) agências intergovernamentais.

O PANGEA se comprometerá a envolver as comunidades de forma inclusiva e não hierárquica. Cada comunidade desempenhará um papel no planejamento, na implementação e no legado de longo prazo do PANGEA. O envolvimento respeitoso e equitativo com os Povos Indígenas e as OSCs, por exemplo, é essencial para aprender sobre os ecossistemas e as necessidades locais, acessar os locais de pesquisa, capacitar a coleta de dados de longo prazo com base no solo e conectar a pesquisa do PANGEA à tomada de decisões locais de gestão de terras. O PANGEA deve se envolver com instituições científicas locais e internacionais para desenvolver seu trabalho, identificar sinergias e alavancar cofinanciamento e recursos para realizar mais de forma colaborativa, além de investir em treinamento formal e currículos para que as gerações atuais e futuras de cientistas possam se beneficiar do PANGEA. O apoio dos órgãos governamentais será fundamental para os esforços de coleta de dados aéreos e terrestres do

PANGEA e para as estratégias do Earth Action. Os órgãos governamentais nacionais e subnacionais também estão bem posicionados para aplicar as principais descobertas da pesquisa do PANGEA para melhorar o monitoramento e os relatórios sobre o clima e a biodiversidade em todo o país e para desenvolver estratégias de adaptação e mitigação da mudança climática e da perda de biodiversidade mais bem informadas. A colaboração com organizações intergovernamentais e doadores preocupados com o clima pode permitir que o PANGEA apoie atividades que não seriam possíveis usando apenas o financiamento da NASA, incluindo o envolvimento com instituições locais de uma maneira mais inclusiva e equitativa do ponto de vista financeiro. Muitas empresas privadas e associações do setor estão ansiosas para saber mais sobre seus ambientes em transformação e para coletar dados terrestres, aéreos e espaciais para entender seu impacto e garantir a sustentabilidade de seus produtos agrícolas e cadeias de suprimentos de outros produtos. Embora os interesses, objetivos e possíveis pontos de envolvimento e colaboração variem muito, todas essas comunidades podem contribuir para o sucesso e o legado positivo de longo prazo do PANGEA.

8.2 Estratégia de engajamento

As atividades do PANGEA serão coordenadas com projetos existentes e futuros de outras agências e outras nações. Com base nas lições aprendidas com o programa LBA liderado pelo Brasil, o PANGEA promoverá um comitê científico internacional de direção (SSC). O SSC reforçará e coordenará as organizações, alianças e atividades existentes para garantir que o PANGEA apoie o desenvolvimento de uma rede de redes de longo prazo que aprimore e sustente a acessibilidade, a usabilidade, a transferibilidade e os benefícios dos dados, métodos, modelos e conhecimentos sobre ecossistemas tropicais. O SSC do PANGEA co-desenvolverá estratégias para garantir que cientistas, instituições locais e comunidades trabalhem juntos durante todo o projeto PANGEA para colaborar efetivamente em diversos contextos geográficos e culturais. Durante o LBA, o SSC se reuniu duas vezes por ano e serviu como um centro de intercâmbio de informações entre os projetos nacionais. Esse comitê tinha várias atribuições, inclusive a recomendação de projetos para inclusão no LBA com base em critérios como o assunto, a adequação dos acordos de contrapartida e os planos de capacitação. O SSC arcou com grande parte do ônus que, de outra forma, poderia ter recaído sobre os gerentes das agências nacionais. As organizações existentes, como a Iniciativa Científica da Bacia do Congo e o LBA brasileiro existente, estão preparadas para servir como parceiras na coordenação dos estudos científicos do PANGEA. Da mesma forma, o PANGEA estabeleceu relações com o GATC durante o processo de definição do escopo. O GATC, criado ao longo de 10 anos por comunidades indígenas tropicais, representa 24 países e mais de 35 milhões de pessoas que ocupam mais de 958 milhões de hectares de terra. A parceria com o GATC apoiará a capacidade do PANGEA de envolver as comunidades indígenas de forma significativa e mutuamente benéfica.

Durante a ABoVE, o Escritório de Ecossistemas e Ciclo de Carbono da NASA iniciou consultas com as Primeiras Nações Canadenses e grupos indígenas do Alasca antes de reunir a equipe de definição científica. A ABoVE se envolveu proativamente com os membros das Primeiras Nações para finalizar o projeto experimental na Fase 1, antes do início das atividades de campo. A equipe da ABoVE continuou a se envolver com os membros das Primeiras Nações para atualizá-los sobre as atividades, especialmente relacionadas a distúrbios relevantes (por exemplo, incêndios). Por exemplo, a ABoVE priorizou a revisão das áreas queimadas e o fornecimento de informações para ajudar as comunidades a entender, adaptar-se e superar os desastres. O PANGEA se baseará nas importantes lições aprendidas com a ABoVE.

O processo de coprodução começou durante a definição do escopo do PANGEA e a redação deste white paper, que foi realizado em colaboração com líderes indígenas da Aliança Global de Comunidades Territoriais (GATC). Se o PANGEA for selecionado, a coprodução com os povos indígenas e as comunidades locais começará imediatamente e será mantida durante todo o processo.

O PANGEA também fará parceria com muitas instituições científicas localizadas ou com experiência em pesquisa em florestas tropicais. O PANGEA estabelecerá uma rede pioneira de especialistas em pesquisa, cientistas em início de carreira e instituições científicas. Um interesse especial dessa parceria é facilitar o co-desenvolvimento de conhecimento e apoiar a transferência de tecnologia para gerar capacidade em instituições locais e regionais. Um foco específico da rede PANGEA será incluir, envolver e treinar a próxima geração de cientistas e a força de trabalho técnica. O PANGEA envolverá as instituições científicas parceiras das seguintes maneiras:

- Co-desenvolver pesquisas, análises e possíveis aplicativos.
- Identificar locais de campo, infraestrutura de pesquisa e recursos essenciais para as metas de pesquisa do PANGEA.
- Coproduzir, compartilhar e gerenciar dados; apoiar o desenvolvimento de infraestrutura de dados, equipamentos e experiência em gerenciamento em instituições locais e regionais; apoiar a criação de bancos de dados regionais ou nacionais para organizar dados de campo e de sensoriamento remoto e resultados de modelos numéricos para que o conhecimento emergente possa ser integrado e aplicado às demandas regionais e nacionais para o desenvolvimento socioeconômico e o desenvolvimento de políticas.
- Fortalecer e ampliar a infraestrutura e a instrumentação de pesquisa para que as instituições científicas locais e regionais possam desenvolver e realizar pesquisas de longo prazo.
- Projetar e implementar estratégias para apoiar a capacitação do corpo docente e dos pesquisadores em início de carreira em universidades e institutos de pesquisa.

Os aplicativos do PANGEA também têm um forte potencial para envolver o setor privado, incluindo, entre outros, (a) agronegócios e cooperativas que cultivam e/ou colhem produtos agrícolas, madeireiros e florestais não madeireiros; (b) indústrias extrativas; (c) empresas de energia; (d) empresas de big data; (e) conglomerados e instituições financeiras que investem, compram e/ou vendem qualquer um dos tipos de empresas mencionados acima; e (f) empresas envolvidas em ecoturismo. O perfil das empresas presentes em cada paisagem onde o PANGEA for implementado variará, indo de corporações a pequenas e médias empresas, cooperativas e associações.

9 Capacitando as Ciências da Terra para a ação

O PANGEA enfatiza biomas tropicais historicamente pouco estudados e capacita uma das regiões mais vulneráveis do planeta a lidar com as consequências das mudanças climáticas e de uso da terra, ao mesmo tempo em que reconhece e documenta as contribuições globais da biodiversidade tropical para a resiliência no sistema terrestre interconectado. O PANGEA priorizará os esforços estratégicos do Earth Science to Action (ES2A) da NASA que eliminam a lacuna entre o rápido avanço da tecnologia e as necessidades da sociedade de acessar plataformas de tomada de decisões com base científica.

A realização dos objetivos científicos e de medição do PANGEA promoverá a capacidade de monitoramento em biomas de florestas tropicais de forma a atender às necessidades diretas do usuário final, onde as lacunas de dados e conhecimento limitam a utilidade de sensores de satélite novos e futuros. Esta seção apresenta as maneiras pelas quais o PANGEA possibilitará o Earth Science to Action (ES2A) em áreas críticas como mudança climática e monitoramento de carbono, conservação da biodiversidade, agricultura sustentável e meios de subsistência. A aceitação dos produtos de pesquisa requer um envolvimento significativo do usuário final, portanto, esta seção também detalha os processos atuais e futuros que o projeto emprega para garantir a aceitação dos resultados da pesquisa pelos usuários. O envolvimento precoce, intensivo e diversificado dos parceiros do PANGEA durante a fase de definição do escopo para o co-design é fundamental para garantir a aceitação e o uso dos produtos de dados. O envolvimento de possíveis usuários finais em diversos fóruns, como a COP 16 de Biodiversidade na Colômbia, demonstrou interesse nos produtos do PANGEA por parte de uma grande variedade de possíveis usuários finais, incluindo o setor privado, o governo, ONGs e atores acadêmicos. Com base no feedback da fase de definição do escopo (consulte os Apêndices C e F), os produtos de dados do PANGEA serão altamente acessíveis e fáceis de usar, e incluirão informações sobre abordagens de escalonamento, oferecerão materiais educacionais e continuarão um diálogo bidirecional que aumenta a conscientização sobre o PANGEA e seus produtos, ao mesmo tempo em que coleta feedback sobre as necessidades dos usuários. O PANGEA planeja avançar nas metodologias para entrelaçar o conhecimento local, tradicional e ecológico com os dados de sensoriamento remoto, o que oferece oportunidades para melhorar a compreensão científica e descobrir novas rotas para colocar os produtos do PANGEA nas mãos dos tomadores de decisão e de ação.

9.1 Aplicações dos resultados da pesquisa do PANGEA

9.1.1 Estabilidade do sequestro de carbono e fluxos de metano

Tabela 9. Aplicações de pesquisa do PANGEA para estabilidade de sequestro de carbono e fluxos de metano. GCF-TF: Força-Tarefa dos Governadores para o Clima e as Florestas. OSFAC: Observatório de Satélite das Florestas da África Central.

PERGUNTAS SOBRE CIÊNCIAS	APLICATIVO DE PESQUISA	PARCEIROS E/OU PONTOS DE VENDA POTENCIAIS PARA O IMPACTO
Q1, Q2, Q3, Q8, Q15, Q16, Q18-Q20, Q25, Q27	Mapeamento e quantificação da estabilidade de longo prazo do sequestro de carbono (ou seja, permanência nos mercados de carbono)	Centro de GEE dos EUA, GEO-TREES, CTrees, Laboratório de Terras e Carbono (WRI), OSFAC, GCF-TF, Woodwell, SilvaCarbon, IPCC
Q1, Q2, Q3, Q18, Q27	Mapeamento e quantificação das previsões de fluxo de metano tropical	Centro GHG dos EUA, SERVIR, WRI

Mapeamento e monitoramento de estoques e fluxos de carbono tropical: Essas atividades são essenciais para fechar o orçamento global de carbono, restringir as projeções climáticas e melhorar a medição, a comunicação e a validação (MRV) dos créditos de carbono. Para isso, é necessário melhorar as projeções climáticas, diminuindo a incerteza em torno dos fluxos de carbono das florestas tropicais, das mudanças no uso da terra tropical e das respostas das florestas tropicais às mudanças

climáticas. Os resultados do PANGEA podem melhorar nossa compreensão do orçamento de carbono, apoiar os mercados de carbono e melhorar a compreensão das emissões de CH₄. O PANGEA se coordenará com a atividade do Centro de Gases de Efeito Estufa dos EUA para determinar as áreas de alinhamento e as oportunidades para que o PANGEA contribua com dados e entendimentos que atendam às necessidades das partes interessadas (National GHG MMIS Strategy, 2023).

Compreensão das contribuições das florestas tropicais para o orçamento de carbono: O

aprimoramento das projeções de mudanças climáticas, especialmente a diminuição da incerteza em torno dos fluxos de carbono das florestas tropicais, das mudanças no uso da terra tropical e das respostas das florestas tropicais às mudanças climáticas, é fundamental, de acordo com o relatório de março de 2023 do Comitê de Ação Rápida (FTAC) do Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia (NSTC) sobre Serviços Climáticos. O 6º Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR6) observou a promessa do sensoriamento remoto de melhorar a precisão das estimativas de carbono florestal, mas listou a incerteza nas estimativas das Observações da Terra como uma lacuna significativa ([IPCC AR6](#)). O PANGEA oferece uma oportunidade de abordar diretamente essa limitação, por exemplo, fornecendo ao Grupo de Trabalho III do IPCC as respostas às Perguntas Científicas 2, 3, 8, 13, 14 e 25-27 durante o desenvolvimento dos sétimo e oitavo relatórios de avaliação, o que poderia diminuir a incerteza e melhorar as estimativas de carbono.

Melhorar o mercado de financiamento de carbono: As abordagens de financiamento de carbono ganharam popularidade em comunidades tropicais e envolvem entidades poluidoras que transferem pagamentos para governos e comunidades locais para várias remediações de emissões de carbono, incluindo proteção florestal, reflorestamento, gestão florestal aprimorada e estabelecimento de plantações florestais (Anderegg et al., 2020; Morita & Matsumoto, 2023). No entanto, os mercados de carbono são limitados pela falta de confiança nos métodos, pelos altos custos de monitoramento e pelas crescentes preocupações relacionadas à sua viabilidade de longo prazo (Anderegg et al., 2020; Pan et al., 2024). Os avanços do PANGEA no entendimento baseado em processos, no mapeamento de estoques e fluxos de carbono tropical e nas previsões de modelos espacialmente explícitos e restritos do futuro sumidouro de terras tropicais podem apoiar diretamente as ferramentas de mapeamento e quantificação da estabilidade de longo prazo do sequestro de carbono de florestas tropicais, incluindo

- Colaboração com o GATC para permitir que as comunidades locais e indígenas combinem as descobertas do PANGEA sobre os fluxos de carbono em seus territórios com o monitoramento comunitário das mudanças na terra para estimar o sequestro de carbono para validação e comercialização de créditos;
- Parceria com a Força-Tarefa dos Governadores para o Clima e as Florestas (GCF-TF) para apoiar a implementação de seu Projeto de Nova Economia Florestal, fornecendo estoques de carbono, fluxos e dados de biodiversidade interconectados que avaliam o impacto das estratégias jurisdicionais de descarbonização; e
- Trabalhar com o Forest Stewardship Council (FSC) para aproveitar as descobertas do PANGEA e os avanços nos métodos sobre estoques de carbono florestal e respostas de fluxo às mudanças climáticas e interações planta-animal para desenvolver um sistema de apoio à decisão que ajudará os detentores de certificados a mitigar os impactos climáticos sobre a silvicultura nos trópicos e a gerenciar as florestas de forma mais eficaz para obter resultados combinados de sequestro de carbono e conservação da biodiversidade.

Mapeamento e quantificação das previsões de fluxo de metano: A incerteza na previsão de futuras emissões de metano dos trópicos pode levar a previsões climáticas globais imprecisas, dificultando a avaliação do escopo completo dos impactos das mudanças climáticas. Ao melhorar nossa compreensão dos fluxos de metano tropical, podemos refinar os orçamentos globais de carbono, prever melhor as mudanças climáticas futuras e informar estratégias de mitigação mais eficazes para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O PANGEA avançará nas capacidades de monitoramento do fluxo de metano tropical natural e antropogênico usando sensoriamento remoto por satélite, em alinhamento com as necessidades e atividades emergentes do U.S. Greenhouse Gas Center. Esses esforços serão realizados em colaboração com parceiros como os centros regionais SERVIR e o Laboratório de Terra e Carbono, liderado pelo World Resources Institute, para avançar os recursos de conhecimento técnico local para mapeamento global e aplicações de monitoramento.

9.1.2 Conservação da biodiversidade

Tabela 10. Aplicações da pesquisa do PANGEA para a conservação da biodiversidade.

PERGUNTAS SOBRE CIÊNCIAS	APLICATIVO DE PESQUISA	PARCEIROS E/OU PONTOS DE VENDA POTENCIAIS PARA O IMPACTO
Q5, Q6, Q7, Q10, Q11, Q12, Q13, Q17	Mapeamento da biodiversidade para apoiar a conectividade da paisagem, a implementação de corredores e a restauração de florestas tropicais (em alinhamento com o Atlas do Ecossistema)	Instituto de Pesquisa de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Aliança Bioiversity CIAT, OSFAC, Conservation International, Agência Espacial Europeia, Escritórios Regionais da IUCN, AFR100
Q5, Q6, Q10, Q11, Q12, Q13, Q17, Q23-24, Q26, Q28,	Capacitação e elevação das comunidades indígenas, locais e tradicionais por meio da integração de IEK, LEK e TEK com o sensoriamento remoto	Iniciativa de Povos Indígenas da NASA, Aliança Global de Comunidades Territoriais, Iniciativa de Direitos e Recursos, Escola de Conhecimentos Indígenas e Locais do Instituto da Bacia do Congo, MapBiomias, Woodwell Climate Research Center

A primeira meta da Estrutura Global de Biodiversidade 2030 é "Planejar e gerenciar todas as áreas para reduzir a perda de biodiversidade", respeitando os direitos dos povos indígenas e das comunidades locais (CBD, 2030). Para isso, é necessário um projeto na escala do PANGEA. As Metas 2 e 3 são restaurar 30% de todos os ecossistemas degradados e conservar 30% de toda a terra, água e mar. No entanto, a escassez de dados e as preocupações com a qualidade limitaram a capacidade de avaliar o progresso em relação a essas metas ([Forest Declaration Assessment](#), 2024). O PANGEA apoiará a conservação da biodiversidade de três maneiras:

Melhor compreensão da biodiversidade: O PANGEA aumentará a compreensão da biodiversidade em uma série de escalas. O esforço do Atlas Global de Ecossistemas do Grupo de Observações da Terra (GEO), apoiado pela Convenção sobre Diversidade Biológica (CBD) e pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), está trabalhando para unir mapas de ecossistemas globais, regionais e nacionais de alta qualidade em um único recurso on-line aberto. O Atlas Global de Ecossistemas está priorizando o mapeamento da "estrutura e função dos ecossistemas do mundo em detalhes sem precedentes". **O PANGEA preencherá as principais lacunas de dados de calibração e validação no bioma mais diversificado da Terra e apoiará diretamente esse esforço em colaboração com o U.S. Geological Survey (USGS), a European Space Agency (ESA), a International Union for Conservation of Nature (IUCN), o Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI) e outros.** Da mesma forma, o PANGEA catalisará o sensoriamento remoto da NASA de Variáveis Essenciais de Biodiversidade (EBVs), como os efeitos biológicos do fogo e da inundação irregular,

para atender às lacunas de dados de alta prioridade identificadas pelo Grupo de Observação da Terra da Rede de Observação da Biodiversidade (GEO BON; Skidmore et al., 2021). O PANGEA entende que a combinação de diversas fontes de conhecimento melhora a compreensão geral e priorizará especificamente o envolvimento com alianças e organizações de Povos Indígenas e Comunidades Locais para capacitar e elevar as comunidades indígenas, locais e tradicionais por meio da **integração do conhecimento indígena, local e tradicional (IEK, LEK, TEK) com o sensoriamento remoto**. O PANGEA apoiará os esforços iniciados e liderados pela Global Alliance of Territorial Communities (GATC), cujo movimento de mulheres já está realizando treinamento de coleta de dados com drones, e pela Rights and Resources Initiative (RRI), que já fez parceria com a Woodwell no passado para quantificar e estimar o carbono armazenado em terras indígenas, afrodescendentes e de comunidades locais ([Policy Brief](#), [Research Report](#)). Há um grande interesse em iniciativas semelhantes que enfatizem a biodiversidade.

Facilitando as ações de conservação da biodiversidade: A conservação da biodiversidade pode progredir consideravelmente com observações em larga escala nos gradientes de perturbação. Por exemplo, o PANGEA pode trabalhar com o órgão de coordenação ambiental regional da Bacia do Congo, a Comissão de Florestas da África Central (COMIFAC), e seu escritório regional de sensoriamento remoto, o OSFAC, para fornecer mapas atualizados das prováveis respostas das florestas às mudanças climáticas, o que permitirá que os planejadores de uso da terra identifiquem possíveis corredores de vida selvagem de alto valor para a conservação transfronteiriça. Usuários locais como o Centro Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica do Gabão (CENAREST), o Ministério de Florestas e Fauna de Camarões (MINFOF) e o Instituto Congolês de Conservação da Natureza (ICCN) podem usar essas ferramentas, dados e percepções para orientar e monitorar as atividades de conservação. Da mesma forma, os esforços de restauração florestal exigem uma melhor compreensão das interações entre plantas e animais, incluindo quais espécies podem apoiar efetivamente os esforços de restauração e onde. Ao abordar as Perguntas Científicas 10-13, 18 e 27, o PANGEA delineará processos complexos que sustentam paisagens de florestas tropicais em regeneração. Esses resultados podem ser compartilhados com as inúmeras iniciativas de plantio de árvores nos trópicos para melhorar sua eficácia e eficiência. Esse trabalho é fundamental para iniciativas como a AFR100, a Iniciativa Africana de Restauração de Paisagens Florestais para restaurar as terras degradadas e desmatadas da África, e a 30x30.

Monitoramento e aprimoramento dos esforços de conservação da biodiversidade: Além disso, as parcerias com os principais colaboradores identificados no estudo de escopo acelerarão o monitoramento da biodiversidade e o desenvolvimento de plataformas de usuários. Por exemplo, o advento de esforços inovadores de gestão de terras, como Outras Medidas Eficazes de Conservação (OECMs), promete atingir metas internacionais como a 30x30, mas o impacto desses novos tipos de gestão sobre a biodiversidade é desconhecido. Organizações como a IUCN e a Campaign for Nature podem usar os dados e as metodologias do PANGEA que melhoram a avaliação e a identificação das mudanças no uso da terra para avaliar a eficácia das OECMs como ferramentas de conservação da biodiversidade. Da mesma forma, o PANGEA pode fazer parcerias com iniciativas de financiamento da natureza, como o Fund for the Amazon e o Tropical Forests Forever Fund, para desenvolver abordagens abrangentes e de baixo custo para monitorar se o seu financiamento está impactando a biodiversidade.

9.1.3 Agricultura e meios de subsistência sustentáveis

Tabela 11. Aplicações da pesquisa do PANGEA para agricultura sustentável e meios de subsistência.

PERGUNTAS SOBRE CIÊNCIAS	APLICATIVO DE PESQUISA	PARCEIROS E/OU PONTOS DE VENDA POTENCIAIS PARA O IMPACTO
Q6, Q9, Q14, Q17	Intensificar a produção agrícola e melhorar os rendimentos	SERVIR, IITA, NASA Harvest, Land and Carbon Lab (WRI)
Q14, Q16, Q17, Q19	Avanço da produção agrícola sustentável , incluindo a influência do clima	SERVIR, IITA, Alliance Bioversity e CIAT
Q3, Q16, Q19	Melhoria da rastreabilidade da cadeia de suprimentos de commodities agrícolas	Aliança Bioversity & CIAT, WRI, setor privado, órgãos de certificação, reguladores
Q3, Q8, Q14, Q15, Q16, Q27	Melhorar os alertas e a resposta a desastres (por exemplo, incêndios, enchentes, secas)	SERVIR, IITA, Alliance Biodiversity & CIAT, MapBiomias, Observatório Nacional de Mudanças Climáticas de Camarões

Os ecossistemas tropicais são o lar de 3 bilhões de pessoas e produzem commodities agrícolas que são exportadas e consumidas globalmente. Identificar alternativas de bioeconomia para a produção agrícola e, ao mesmo tempo, intensificar a agricultura nas regiões tropicais, tornando-a mais sustentável e resistente às mudanças climáticas, e aumentar a capacidade de rastrear as commodities agrícolas até sua origem são essenciais para reduzir a pressão do desmatamento nas florestas tropicais e, ao mesmo tempo, atender às crescentes demandas globais. O PANGEA apoiará esses esforços das seguintes maneiras:

Intensificação aprimorada: O monitoramento de culturas por satélite oferece a possibilidade de avaliar os níveis de produção quase em tempo real, comparando áreas de intervenção e controle em distâncias significativas para fornecer dados essenciais sobre a eficácia dos esforços de intensificação e apoiar a tomada de decisões dos agricultores. Na Bacia do Congo, onde a maioria das fazendas é pequena, intercalada em um mosaico de florestas e de difícil acesso, o sensoriamento remoto pode ajudar a entender a penetração de novos métodos e tecnologias à distância. O PANGEA aumentará a capacidade de usar o sensoriamento remoto por satélite para a agricultura de precisão nos trópicos, incluindo o mapeamento aprimorado do tipo de cultura, o mapeamento da eficiência do uso de nutrientes e água e a estimativa da produtividade da cultura. Esse trabalho será feito em colaboração com os principais parceiros que trabalham nessa área, incluindo o trabalho com o World Resources Institute (WRI) para apoiar o Land and Carbon Lab.

Aumento da sustentabilidade e da capacidade de adaptação: A agricultura sob as mudanças climáticas exigirá que os agricultores cultivem mais alimentos em circunstâncias cada vez mais imprevisíveis, incluindo a mudança dos regimes de precipitação e períodos de calor intenso. Como um dos principais contribuintes para a mudança climática, há também um movimento para tornar a agricultura mais sustentável, por meio da diminuição do uso de fertilizantes e pesticidas, da redução do uso de água e do aumento dos esforços para controlar a erosão com base no sensoriamento remoto das necessidades das culturas. Essa "agricultura de precisão" já é comum nos EUA, mas não existe em grande parte dos trópicos porque os dados e métodos subjacentes são incompletos. O PANGEA trabalhará com colegas do Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA), da Aliança Bioversity-CIAT e do Instituto Internacional de Gerenciamento de Água (IWMI) para desenvolver e

implantar técnicas como o monitoramento espacialmente explícito da saúde das plantações em escala de fazenda, que permitirá que essas organizações identifiquem rapidamente as ameaças à segurança alimentar e respondam com medidas atenuantes.

Melhoria da rastreabilidade: Há uma demanda crescente em todo o mundo para vincular as commodities agrícolas à fazenda exata onde foram cultivadas, impulsionada tanto pela demanda dos consumidores quanto pela pressão regulatória de novos regimes de políticas, como o Regulamento de Commodities Livres de Desmatamento da União Europeia (EUDR) e um projeto de lei semelhante em análise nos EUA. O PANGEA permitirá o uso de novos sensores, como NISAR, BIOMASS e SBG, para detectar várias formas de expansão agrícola em florestas tropicais, o que facilitará para as empresas de commodities agrícolas avaliarem o impacto da mudança no uso da terra de suas cadeias de valor. Empresas como a Satelligence usarão os dados do PANGEA para demonstrar a conformidade com a EUDR para algumas das maiores empresas de alimentos do mundo. Os aprimoramentos metodológicos da aquisição de dados do PANGEA também podem melhorar nossa capacidade de usar ferramentas de sensoriamento remoto para distinguir entre agroflorestas complexas e florestas secundárias, atualmente uma lacuna importante que prejudica a capacidade de reconhecer e mapear fazendas de café e cacau que usam métodos de sombreamento mais sustentáveis. O PANGEA trabalhará com parceiros como a Alliance Bioversity CIAT para aplicar essas melhorias a fim de ajudar os agricultores e as cooperativas de agricultores a demonstrar conformidade e comercializar produtos de alto valor. Essas atividades também posicionam o PANGEA para impactar outros setores de subsistência, como pagamentos por serviços de ecossistema, bioeconomia e produtos florestais não madeireiros.

Melhores alertas e respostas a desastres: Secas, inundações, pragas e calor extremo ameaçam a produção agrícola nos trópicos. Em locais onde a adaptação agrícola às mudanças climáticas é insuficiente, políticas e práticas como sistemas de alerta antecipado, alertas de desastres e produtos de seguro aprimorados para pequenos agricultores são essenciais. Os esforços do PANGEA para mapear as atividades de uso da terra e as mudanças no uso da terra, entender os impactos climáticos na fenologia e estimar remotamente as concentrações de nutrientes nas plantas darão suporte a essas soluções políticas. Por exemplo, o sensoriamento remoto aprimorado dos limites das fazendas, do tipo de cultura e do rendimento da cultura em escala de campo reduzirá os custos de monitoramento dos produtos de seguro voltados para o clima para pequenos agricultores.

Para obter ganhos potenciais para a segurança alimentar e os meios de subsistência, o PANGEA envolveu parceiros de pesquisa agrícola como a NASA Harvest, SERVIR, o Grupo Consultivo para Pesquisa Agrícola Internacional (CGIAR), incluindo o IITA, e parceiros que trabalham no nexo entre florestas e agricultura, incluindo o CIAT, o World Resources Institute e o Centro Internacional de Pesquisa Florestal e Agroflorestal Mundial (CIFOR-ICRAF). As informações compartilhadas por esses parceiros durante o processo de definição do escopo do PANGEA informaram diretamente as questões científicas do PANGEA para potencializar os resultados da Earth Action. Parceiros como o IITA e o CIAT são especializados na tradução de resultados de pesquisas para a prática e se baseiam em décadas de experiência com parceiros do setor privado e do governo.

9.2 Processo para capacitar as Ciências da Terra para a ação

9.2.1 Envolvimento do usuário

O interesse substancial por si só não é suficiente para garantir que os produtos da NASA sejam usados. A aplicação eficaz da pesquisa exige que as comunidades de usuários finais sejam identificadas e envolvidas desde o início e devem ser parceiras no projeto de pesquisa e no desenvolvimento de ferramentas. Isso requer planejamento avançado, intenção e recursos. É por isso que o PANGEA tem investido desde o início da fase de definição do escopo para estabelecer as bases da tradução da pesquisa. Especificamente, o PANGEA aborda os seguintes Princípios Orientadores da Estratégia ES2A da NASA (2024-2034):

- **Ampliar o impacto por meio de parcerias:** O investimento do PANGEA no envolvimento da comunidade atraiu um conjunto diversificado de parceiros, incluindo governos internacionais, doadores e comunidades locais (consulte a *Seção 8* para obter detalhes sobre o envolvimento da comunidade). Esses parceiros incluem usuários em potencial, contribuintes de dados e financiadores em potencial para aplicações - o último dos quais ajudará a tornar o trabalho do PANGEA econômico, complementando os recursos de Ciências da Terra da NASA com fundos para apoiar a capacitação, o envolvimento da comunidade e a tradução da pesquisa (consulte a *Seção 10.2, Oportunidades de cofinanciamento*, para obter informações adicionais). O PANGEA também traz amplas parcerias internacionais, desde agências espaciais nacionais que poderiam fornecer dados complementares até comunidades tropicais que participarão da coleta de dados e, potencialmente, do uso e da ação. O PANGEA envolveu esses parceiros no início do processo para aumentar seu investimento e sua contribuição no co-desenvolvimento de possíveis produtos finais.
- **Envolver uma força de trabalho diversificada e uma comunidade mais ampla de Ciências da Terra:** As metas transdisciplinares do PANGEA contam com o apoio de uma equipe diversificada, que vai de cientistas de dados a economistas, oriundos da NASA, do meio acadêmico, de organizações sem fins lucrativos, de outras agências federais e de governos de todo o mundo. O amplo envolvimento internacional do PANGEA também oferece oportunidades de trabalhar e recrutar as melhores mentes do mundo para os esforços de Ciências da Terra da NASA, enquanto os esforços de capacitação e treinamento (consulte a *Seção 7*) ajudam a preparar a próxima geração de cientistas.

Durante a fase de definição do escopo, o PANGEA realizou uma ampla divulgação para os possíveis usuários (consulte o *Apêndice B*) e se envolveu com os possíveis usuários sobre quais perguntas e dados são mais valiosos para eles. Como resultado, o PANGEA tem trabalhado desde a sua criação para preencher a difícil lacuna entre as perguntas científicas que estão sendo feitas e o que os usuários finais precisam para a tomada de decisões. O envolvimento da comunidade é fundamental para a estratégia ES2A do PANGEA (consulte a *Seção 8* para obter detalhes sobre como o PANGEA envolverá a comunidade). Estamos cientes de que o envolvimento da comunidade traz o risco de criar expectativas que não podem ser atendidas pelo projeto, em grande parte porque os dados aéreos que estão sendo coletados têm um escopo espaço-temporal limitado e serão mais episódicos do que o necessário para atender a muitos aplicativos de usuários e necessidades de tomada de decisões. O PANGEA fará todos os esforços para transmitir repetida e claramente as limitações dos dados do projeto, que são necessariamente limitados espacial e temporalmente. O PANGEA também se esforçará para aproveitar o impulso criado por um período de projeto breve, mas intenso, para criar,

aumentar e fortalecer uma comunidade de usuários nova e mais diversificada para os dados terrestres da NASA. A profundidade e o alcance do envolvimento do PANGEA dependerão do financiamento e são uma prioridade nas oportunidades de cofinanciamento.

Especificamente, o PANGEA garantirá que todas as atividades de envolvimento da comunidade enfatizem as ligações entre os dados de campo e aéreos do PANGEA e os sensores de satélite do Observatório da Terra da NASA (atuais e planejados). Como os usuários se beneficiarão dos produtos derivados de observações espaciais, as prioridades do PANGEA ES2A se concentram no avanço das necessidades e capacidades específicas de monitoramento que usam serviços em andamento, ou seja, missões de satélite (consulte o *Apêndice D*). Os dados da campanha aérea darão suporte ao treinamento de parceiros com foco em dados operacionais antes, durante e depois dos avanços de escala do PANGEA, que podem ser usados para recuperar produtos derivados de satélite. Os exemplos incluem treinamento e prontidão em SAR e hiperespectral em colaboração com o SERVIR. Ao fazer isso, o PANGEA criará comunidades NISAR e SBG para os primeiros usuários nos trópicos.

O PANGEA também priorizou a busca de uma gama diversificada de parceiros de financiamento, reconhecendo que a NASA é adequada para apoiar a coleta de dados, a análise e o desenvolvimento de ferramentas/plataformas, enquanto outros patrocinadores estão mais bem posicionados para apoiar projetos de conservação que aplicam dados e formas específicas de treinamento e capacitação. A fase de definição do escopo também incluiu um exercício de visão, no qual diversas equipes colaboraram para traçar caminhos de tradução que incluíram aquisição de dados, casos de uso em potencial, co-desenvolvimento de produtos e identificação de parceiros.

9.2.2 Apoio à aplicação da pesquisa do PANGEA

O PANGEA aproveitará o envolvimento de seus parceiros existentes e planejados para integrar o ES2A de forma holística ao projeto. Isso inclui a realização de uma avaliação das necessidades do usuário como parte do Plano de Experimentos Concisos e a realização de uma varredura ambiental para identificar as ferramentas existentes que poderiam integrar os dados. Isso é particularmente importante porque a integração com as ferramentas existentes geralmente aumenta a probabilidade de aceitação, uso e manutenção em longo prazo. **A Figura 20** demonstra a abordagem do PANGEA para o avanço dos resultados por meio dos níveis de prontidão de aplicativos (ARLs) da NASA, que dependerá da combinação de um forte alinhamento do assunto com um engajamento cuidadoso, antecipado e inclusivo do parceiro. Embora o exemplo seja exibido como um processo linear usando a estrutura ARL da NASA, o PANGEA espera que nossas atividades ES2A sejam iterativas e, às vezes, não lineares, o que representa as complexidades que definem a política e a tomada de decisões no mundo real.

A NASA, juntamente com outras agências nacionais e internacionais, está desempenhando cada vez mais um papel de liderança no desenvolvimento e na implementação de sistemas de apoio à decisão. Esses sistemas são projetados para incorporar os resultados das atividades de pesquisa em uma estrutura de modelagem, a fim de fornecer informações aos administradores de terras, governos subnacionais e nacionais, entre outros, que precisam de informações em um contexto específico. O Portal de Informações do PANGEA (PIP) fornecerá uma plataforma para a realização de mais pesquisas sobre o uso de produtos de informações de satélite para apoiar a tomada de decisões. Será uma plataforma essencial para os pesquisadores do PANGEA interagirem em vários níveis com cientistas e gerentes de agências responsáveis por avaliar os impactos das mudanças climáticas em regiões tropicais, bem como com a mídia e o público em geral. A Estrutura de Modelagem Integrada do

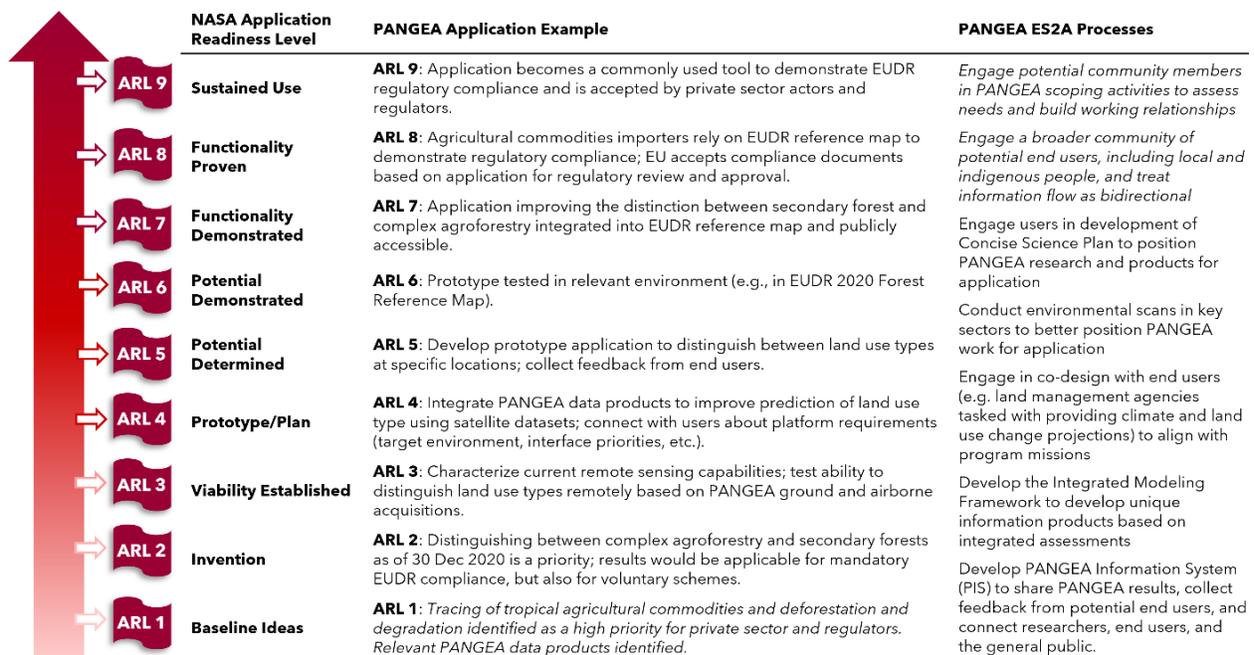


Figura 20. Exemplo de estratégia de Nível de Prontidão de Aplicativo para o PANGEA com foco no apoio à Regulamentação de Desmatamento da União Europeia (EUDR). Uma regulamentação semelhante está sendo considerada nos EUA.

PANGEA fornecerá outro suporte para as atividades do ES2A, criando produtos de informação exclusivos com base em avaliações integradas.

A NASA e outras agências norte-americanas e internacionais estão reconhecendo cada vez mais a necessidade de co-desenvolver sistemas de apoio à decisão para trocar informações e análises com gerentes de terras, governos e outros responsáveis por políticas e decisões. O PANGEA desenvolverá produtos em conjunto com esses parceiros, que são responsáveis pelo fornecimento dos dados necessários para o monitoramento das mudanças climáticas e de cobertura da terra. Os modelos orientados por processos que serão o foco da pesquisa no PANGEA se alinham bem com as missões desses escritórios. Os pesquisadores desses escritórios participaram do processo de definição do escopo do PANGEA, e suas contribuições informaram as questões de pesquisa e geraram ideias para a aplicação dos resultados do PANGEA na pesquisa.

O PANGEA também oferece a oportunidade de se envolver em trabalhos e aplicações transdisciplinares, especialmente devido à natureza inter-relacionada das mudanças climáticas, da conservação da biodiversidade e da produção agrícola, que são algumas das principais aplicações dos produtos do PANGEA. **A Figura 21** demonstra a potencial sobreposição desses tópicos e destaca uma pequena seleção dos parceiros que já estão envolvidos em trabalhos na interseção dos diferentes assuntos.

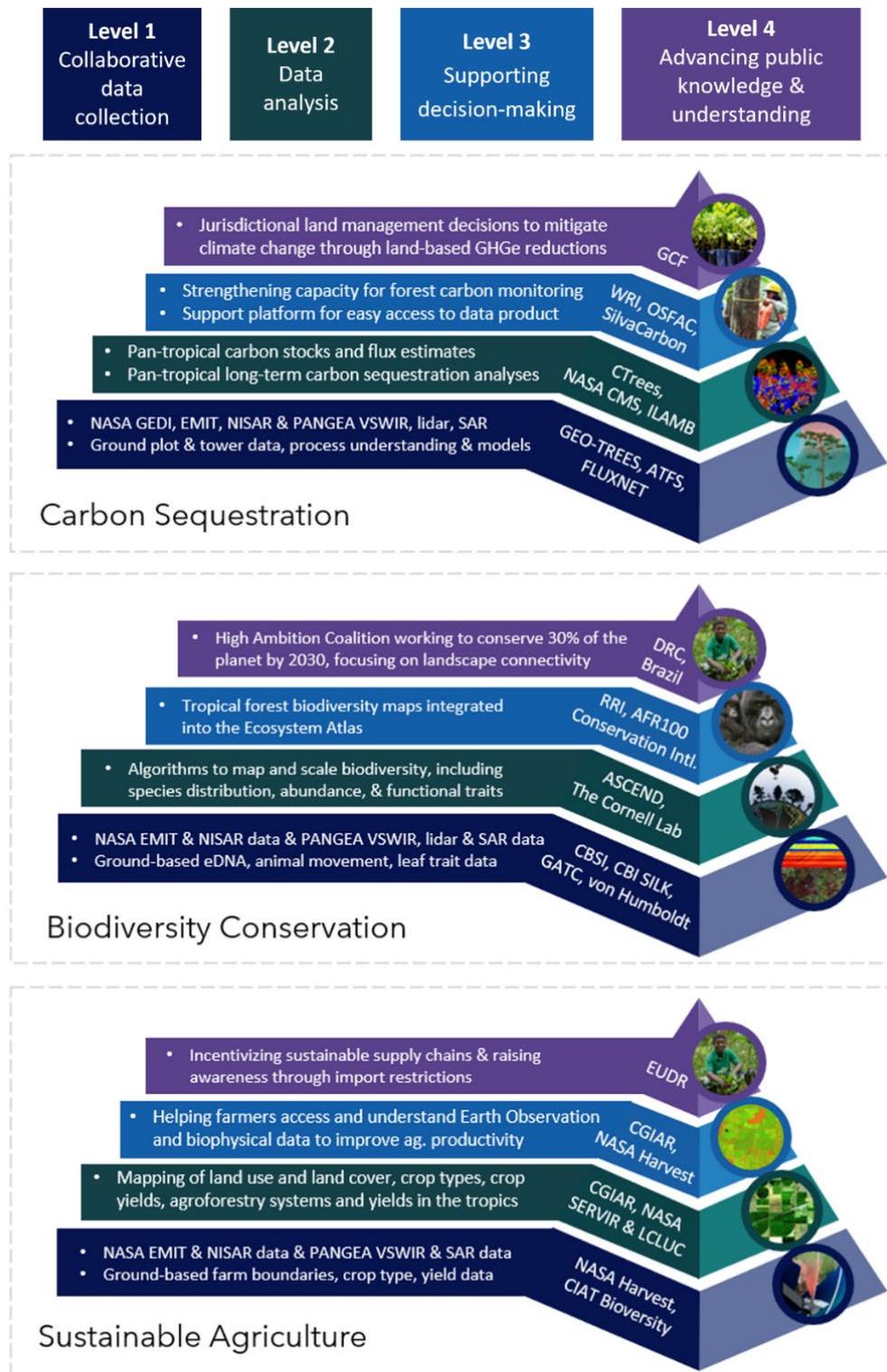


Figura 21. Exemplo de implementação da estratégia do PANGEA Earth Science to Action, com foco no sequestro de carbono, na conservação da biodiversidade e na agricultura sustentável e exemplos de parceiros já envolvidos em atividades relacionadas.

10 Viabilidade técnica e logística

O PANGEA aproveitará o histórico da NASA de campanhas internacionais de campo e aéreas bem-sucedidas, incluindo campanhas recentes nas Américas, na África e na Ásia. Várias campanhas do Earth Venture Suborbital (EVS) e outras campanhas aéreas internacionais da NASA também demonstraram a viabilidade de aeronaves da NASA e aeronaves contratadas pela NASA serem implantadas internacionalmente com instrumentos de sensoriamento remoto e in situ em apoio a campanhas plurianuais de larga escala nos trópicos americanos. Em 2023, o JPL da NASA teve uma campanha bem-sucedida com o AVIRIS-NG coletando dados de sensoriamento remoto com uma aeronave contratada pela NASA sobre o Chile, a Colômbia e o Equador para recuperação de fontes pontuais de metano em coordenação com cada país. Isso se baseou em campanhas anteriores bem-sucedidas na região, incluindo, por exemplo, voos UAVSAR na Colômbia, Equador, Peru e Guiana Francesa; voos AVIRIS na Colômbia, Equador e Chile; e LVIS na Guiana Francesa. A NASA também planejou voos do AVIRIS no Panamá e na Costa Rica para 2025. Além disso, a NASA tem feito muitas pesquisas na África, incluindo SAFARI, AfriSAR-1, AfriSAR-2 e BioSCape. Atualmente, há também imensos investimentos na África que darão suporte a importantes elementos de viabilidade do PANGEA, incluindo a Iniciativa Científica da Bacia do Congo (CBSI), CongoFlux, One Forest Vision, o Painel de Ciências para o Congo, o African Masters of Machine Intelligence (AMMI) por meio do Instituto Africano de Ciências Matemáticas (AIMS), a colaboração existente da NASA com a Agência Espacial Gabonesa (AGEOS) e o Observatório de Satélites das Florestas da África Central (OSFAC) e o GEO-TREES. A equipe do PANGEA tem entrado em contato com o Bureau of Oceans and International Environmental and Scientific Affairs do Departamento de Estado dos EUA, que apoia entusiasticamente o PANGEA e os benefícios que ele traria para a diplomacia ambiental e científica.

O PANGEA exigirá implantações internacionais que poderão ocorrer em vários países. Os desafios previstos incluem a implantação e a manutenção da instrumentação in situ, a obtenção de permissão de voo internacional para a aquisição de dados aéreos, a obtenção de vistos e permissões de pesquisa para pesquisadores americanos e internacionais, o acesso aos locais de campo, interações/conflitos entre humanos e animais, agitação política ou de outra natureza e a saúde e a segurança dos cientistas e dos participantes (consulte a *Seção 10.5* para a *Avaliação de Risco*). A construção dos relacionamentos necessários para obter autorizações de voo para os países e locais de campo selecionados que fazem parte do domínio do PANGEA será uma prioridade inicial (consulte a *Seção 6.2.4, Observações de Sensoriamento Remoto Aerotransportado*). Para obter autorizações de voo, o PANGEA trabalhará com o OIIR da NASA para desenvolver os pacotes de autorização diplomática necessários para implantações aéreas internacionais. Antes de solicitar as autorizações de voo, o PANGEA trabalhará em estreita colaboração com a NASA e o Departamento de Estado dos EUA para estabelecer relações com parceiros no país, como agências governamentais, ONGs e líderes de territórios indígenas, a fim de desenvolver acordos que garantam as autorizações de voo e as permissões de campo adequadas.

Nos casos em que as aeronaves da NASA não puderem obter permissão de sobrevoo ou adquirir dados usando sua própria instrumentação, o PANGEA implantará ativos comerciais ou outros, como ALS comercial, instrumentação baseada em UAV comercial ou instrumentos e aeronaves locais para adquirir os conjuntos de dados aéreos necessários. Isso é particularmente importante no Brasil, onde a NASA historicamente tem encontrado restrições para observações terrestres usando instrumentos e aeronaves não brasileiros. O PANGEA se baseará nos precedentes empregados pela NASA e pelo

governo dos EUA de usar provedores de dados aéreos comerciais para coletar os conjuntos de dados necessários (consulte a Seção 6.2.4, *Observações de Sensoriamento Remoto Aerotransportado*).

10.1 Organização e gerenciamento

A organização e a coordenação do PANGEA serão determinadas pelo Gerenciamento de Programas da NASA. Apresentamos um conceito de organização e gerenciamento que reflete um modelo bem-sucedido usado no ABoVE e no LBA-ECO (**Figura 22**). Essa estrutura permitirá a organização e o gerenciamento de um projeto de longo prazo com investimento significativo de parcerias e colaborações transdisciplinares em escala nacional e internacional.

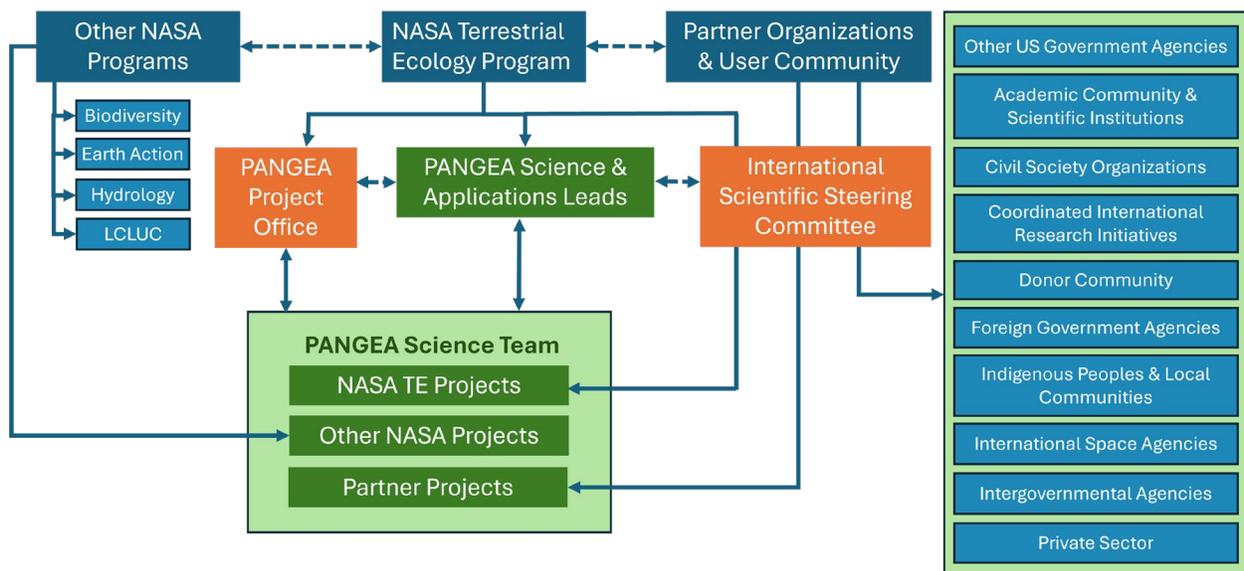


Figura 22. Estrutura organizacional proposta para o PANGEA.

10.1.1 Gerenciamento de programas

O Gerenciamento do Programa de Ecologia Terrestre da NASA organizará e supervisionará o PANGEA com o apoio do *Escritório de Projetos do PANGEA*. Eles trabalharão dentro da Divisão de Ciências da Terra da NASA para selecionar e financiar projetos de pesquisa conduzidos pela *Equipe Científica* do PANGEA para participação no PANGEA e para alocar recursos para o *Escritório do Projeto PANGEA*, incluindo o *Cientista do Projeto PANGEA* e o *Cientista Adjunto do Projeto* (em conjunto com a *Liderança Científica [SL]*), que também são selecionados pelo Gerenciamento do Programa. O Gerenciamento do Programa será responsável por representar as atividades do PANGEA na NASA, incluindo outros programas da NASA que possam apoiar as atividades do PANGEA. O Gerenciamento do Programa coordenará as atividades do PANGEA com outros parceiros de pesquisa de agências nacionais e estrangeiras.

10.1.2 Escritório de Projetos

A implementação do PANGEA será apoiada por um *Escritório de Projetos* liderado pelo *Gerente de Projetos* nomeado pelo Gerenciamento do Programa e apoiado por um membro da equipe do

projeto. O *Cientista do Projeto* PANGEA e o *Cientista Adjunto do Projeto* atuarão como membros *ex officio* do Escritório do Projeto. O Escritório do Projeto (a) supervisionará e gerenciará as atividades e os projetos de pesquisa aérea e de campo do PANGEA patrocinados pelo Programa de Ecologia Terrestre da NASA e por outros escritórios de programas da NASA; (b) coordenará e fornecerá apoio logístico para a pesquisa de campo patrocinada pela NASA e para as campanhas de sensoriamento remoto aéreo, incluindo a supervisão da segurança e do gerenciamento de riscos; (c) fornecerá apoio logístico aos grupos de trabalho e de coordenação do PANGEA, incluindo o apoio a reuniões e workshops; e (d) desenvolverá e manterá o Sistema de Informações do PANGEA. O Escritório do Projeto terá interações importantes com as partes interessadas locais e regionais e compartilhará a responsabilidade por essas interações com a Liderança Científica. O Escritório do Projeto ajudará os membros da Equipe Científica com os pedidos de licença às autoridades apropriadas. Dependendo das necessidades da Equipe Científica, o Escritório do Projeto também pode providenciar a coleta de dados variáveis essenciais e a instalação de infraestrutura nos locais de campo. O Escritório de Projetos será responsável pelo gerenciamento das campanhas científicas aéreas. Os membros da Equipe Científica trabalharão em estreita colaboração com o Escritório do Projeto e contarão com a orientação de sua equipe para atividades de campo, comunicações com as partes interessadas e autoridades locais e nacionais e uso da ciberinfraestrutura do PANGEA.

O PANGEA priorizará a coordenação estreita entre a Equipe Científica do PANGEA e as atividades do Earth Science to Action. O Gerente do Projeto designará um ponto de contato (POC) no Escritório do Projeto para as aplicações científicas do PANGEA. Esse POC monitorará as expectativas que os parceiros de aplicações têm em relação à Equipe Científica do PANGEA. A comunicação regular e transparente com os possíveis parceiros de aplicação continuará em todos os estágios do PANGEA, e as atualizações sobre as decisões de prosseguir ou não com as possíveis aplicações serão comunicadas prontamente. A reputação internacional da NASA depende da correspondência cuidadosa entre as necessidades dos usuários e os investimentos e recursos da NASA, bem como do gerenciamento das expectativas de todos os parceiros.

10.1.3 Definição de ciência

Antes do início das investigações científicas do PANGEA, um grupo de cientistas e líderes científicos selecionados pelo Escritório do Programa trabalhará com o Escritório do Projeto para elaborar o *Plano de Experimento Conciso*. Esse plano apresentará um refinamento das ideias apresentadas neste documento de escopo. O objetivo do plano refinado é combinar o escopo científico com os recursos disponíveis. Recomendações específicas sobre locais de pesquisa, necessidades de infraestrutura científica de campo (incluindo instrumentação) e requisitos para sensoriamento remoto aéreo serão definidas no plano conciso. O Plano de Experimento Conciso atenderá às necessidades do Gerenciamento do Programa para solicitar investigações científicas e servirá à Equipe Científica selecionada como um guia para suas investigações integradas para responder às perguntas científicas do PANGEA.

10.1.4 Implementação do projeto

O projeto PANGEA será implementado pela equipe científica selecionada do PANGEA, com o apoio do Escritório do Projeto, durante um período nominal de seis a nove anos, conforme previsto no anúncio A.4 da NASA de 2022. Um *Plano de Implementação* do Projeto será elaborado com base no Plano de Experimento Conciso. O Escritório do Projeto será responsável pelo Plano de

Implementação, incluindo atualizações regulares, cuja frequência será determinada em consulta com a Equipe Científica e o Gerenciamento do Programa. O plano de implementação deve detalhar as atividades de pesquisa a serem realizadas e especificar as funções e responsabilidades dos pesquisadores envolvidos nessas atividades durante a execução do PANGEA. Um cronograma teórico para a implementação do projeto é apresentado na *Seção 10.4 (Tabela 14)*. No início do projeto, aproximadamente um ano será gasto na preparação das atividades de coleta de dados de campo e aéreos. O período principal de coleta de dados se estenderá de três a seis anos, dependendo da duração e do escopo geral do projeto. A análise dos dados coletados será contínua durante todo o projeto. Esperamos que a coleta de dados seja encerrada gradualmente um a três anos antes da conclusão do projeto para dar tempo à análise, integração e síntese dos dados. O PANGEA deixará um legado de dados e ciência aberta que dará suporte a futuras investigações científicas que responderão às perguntas científicas do PANGEA e a novos temas científicos.

10.1.5 Equipe científica e liderança científica

A *Equipe Científica*, liderada por um Cientista do Projeto e um Cientista Adjunto do Projeto, será composta por Pesquisadores Principais (PIs) e Co-Investigadores (Co-Is) de investigações selecionadas, bem como por cientistas recrutados por esses PIs e Co-Is, incluindo cientistas e estudantes de pós-doutorado. Em estreita coordenação com a Equipe Científica do PANGEA, o Escritório do Projeto e a Gerência do Programa, o Cientista do Projeto e o Adjunto convocarão e organizarão as agendas das reuniões regulares da Equipe Científica do PANGEA. A Equipe Científica se reunirá regularmente, nominalmente com uma reunião presencial por ano. Para reuniões virtuais, o PANGEA se esforçará para organizar reuniões que levem em consideração os fusos horários das pessoas representadas. Essas reuniões promoverão o planejamento da Equipe Científica, a troca de resultados iniciais e facilitarão muito as interações entre os participantes do projeto. As reuniões são uma oportunidade particularmente importante para que estudantes e cientistas de pós-doutorado se encontrem com os cientistas seniores de outros projetos. Os locais das reuniões serão selecionados para facilitar a viagem e minimizar as complicações relacionadas à obtenção de vistos. O Cientista do Projeto e o Adjunto se reunirão com a Gerência do Programa e a gerência do Escritório do Projeto, no mínimo trimestralmente, para analisar o progresso, resolver problemas e discutir as próximas etapas da implementação.

A experiência com projetos anteriores nos informa que a comunicação oportuna é importante para gerenciar as expectativas da Equipe Científica do PANGEA e dos pesquisadores de projetos e organizações parceiras. A Liderança Científica (SL) do PANGEA comunicará os objetivos e os resultados da pesquisa da Equipe Científica financiada pela NASA a diversos públicos. A SL trabalhará com parceiros locais para definir as expectativas do PANGEA. A SL comunicará com precisão e presteza as atualizações do projeto aos parceiros de pesquisa locais. As apresentações, webinars e prefeituras empregarão serviços de interpretação e os materiais do projeto serão disponibilizados nos idiomas dos países participantes. Depois que os dados do PANGEA tiverem sido coletados e à medida que os produtos de dados científicos forem disponibilizados, o SL será responsável por garantir que os parceiros locais continuem a receber atualizações regulares. O SL definirá o tom do PANGEA e estará atento para dar o exemplo ao restante da Equipe Científica sobre a colaboração

inclusiva e respeitosa e o valor da coprodução de pesquisas. O SL e todos os membros da Equipe Científica do PANGEA seguirão as Diretrizes da Comunidade do PANGEA .¹

As investigações científicas do PANGEA serão gerenciadas pela liderança científica e realizadas pela equipe científica. Conforme observado, os membros da Equipe Científica incluirão pesquisadores selecionados pela NASA e pesquisadores recrutados pelos PIs e Co-Is da Equipe Científica. As investigações do PANGEA abrangerão vários países nos trópicos. Com base na experiência da NASA no LBA, recomendamos que *todas as* pesquisas tenham pesquisadores contrapartes em países com florestas tropicais úmidas e que se esforcem para treinar cientistas e técnicos em início de carreira de países onde a pesquisa do PANGEA está ativa e de outros países dos trópicos úmidos. Isso deve se aplicar até mesmo a investigações que não tenham um componente de campo. Durante o LBA, a NASA descobriu que essa abordagem trazia muitos benefícios. Na prática, ela ofereceu um incentivo para que os países anfitriões apoiassem o trabalho da NASA no país, devido à capacidade que estava sendo desenvolvida pelos pesquisadores. Os pesquisadores descobriram que os países anfitriões muitas vezes proporcionavam uma alavancagem significativa para seus projetos de pesquisa por meio de contribuições em espécie e financiadas, especialmente bolsas de estudo. Décadas após o término da presença da NASA na América do Sul para o LBA, a NASA ainda tem uma grande rede de colaboradores amigáveis na comunidade científica sul-americana. O impacto desses pesquisadores na ciência em seus países de origem tem sido enorme. Para obter mais informações, consulte a Seção 7, *Capacitação, Treinamento e Educação*.

O PANGEA enfatizará e priorizará a diversidade, a equidade e a inclusão em todos os aspectos do projeto, incluindo a representação diversificada em sua liderança.

A equipe científica do PANGEA priorizará a representação diversificada em termos de conhecimento científico, especialidades técnicas, nacionalidade, raça, gênero, idioma nativo, estágios de carreira e outros. Pesquisadores em início de carreira têm participado ativamente do desenvolvimento desta proposta de escopo e participarão de todas as etapas do projeto, assim como representantes dos países participantes onde a pesquisa de campo será realizada. Os membros da equipe devem se comprometer com interações respeitosas com os colaboradores locais e com a diversidade cultural, além de tomar cuidado extra para manter a reputação da NASA internacionalmente.

A liderança e o envolvimento durante o processo de definição do escopo do PANGEA demonstraram um apoio excepcional ao projeto e à diversidade de participantes com capacidade e interesse em contribuir com o PANGEA.

Durante o processo de definição do escopo, os co-líderes de trabalho temático do PANGEA incluíram 22 pessoas do Norte e do Sul do mundo. Os dados demográficos a seguir ilustram vários eixos de diversidade representados pela equipe de liderança do PANGEA e pelos co-líderes dos grupos de trabalho:

- 42% do sexo feminino (n = 14 de 33)

¹ As Diretrizes da Comunidade PANGEA são um documento vivo encontrado em <https://tropicalforestscooping.com/community-guidelines/>. As diretrizes derivadas dos guias institucionais existentes podem ser examinadas pela NASA e modificadas de acordo com as necessidades do gerenciamento do programa.

- 60% não brancos (n = 20 de 33)
- 30% do Sul global (n = 10 de 33)
- 27% em início de carreira (n = 9 de 33)

É importante observar que a equipe de definição de escopo do PANGEA trabalhou para conseguir uma maior representação do Sul global em nossa liderança. Devido aos recursos limitados que podem ser alocados para apoiar diretamente os participantes do Sul global, ficamos restritos. Muitas pessoas altamente qualificadas do Sul global estavam sobrecarregadas e não puderam ajudar a liderar o esforço de definição de escopo sem compensação. No entanto, bem mais de 50% das pessoas envolvidas no esforço de definição de escopo por meio de workshops, reuniões, prefeituras e simpósios eram de países do Sul global. As lições aprendidas durante o processo de definição do escopo informaram as buscas de cofinanciamento para o projeto PANGEA. O esforço de definição do escopo também exemplificou a capacidade do PANGEA de implementar a diplomacia científica internacionalmente.

10.1.6 Habilidades disciplinares necessárias

O PANGEA foi concebido como um projeto transdisciplinar. Os cientistas envolvidos na pesquisa do PANGEA podem se identificar com uma ou várias disciplinas. Esperamos a participação de cientistas ligados às ciências físicas, biológicas e sociais. As habilidades e os conhecimentos associados a uma série de disciplinas estarão representados na equipe científica do PANGEA. Como parte do Programa de Ecologia Terrestre, esperamos que a ecologia em vários níveis de organização (ecossistema, comunidade, população) esteja fortemente representada. A biogeoquímica e a química atmosférica estão há muito tempo associadas às campanhas de TE da NASA, assim como a fisiologia e a ecofisiologia das plantas. A Equipe Científica incluirá as habilidades e o conhecimento de outras disciplinas relacionadas, incluindo sistemas terrestres, meteorologia, hidrologia e ciências sociais. Os especialistas em sensoriamento remoto estarão bem representados na Equipe Científica.

10.2 Oportunidades de cofinanciamento

Os níveis de medição de Linha de Base, Limiar e Descópio definidos na Seção 6.2.1 representam projetos autônomos da NASA, sem dependências. Entretanto, dada a urgência e a importância do tópico, há um grande potencial para aumentar ou até mesmo exceder as contribuições da NASA. Durante o esforço de definição do escopo, a equipe de liderança do PANGEA fez avanços significativos no sentido de garantir diversas fontes de financiamento para aproveitar um investimento da NASA. Várias agências do governo dos EUA, fundações privadas, governos internacionais e filantropos expressaram interesse em apoiar as atividades relacionadas ao PANGEA que estão dentro e fora do escopo da NASA, incluindo o apoio direto a parceiros internacionais e a implementação do Earth Science to Action. As oportunidades de alavancar apoio adicional de parceiros interessados em trabalhar em conjunto com a NASA incluem exemplos de parceiros listados na **Tabela 12**. Para obter mais detalhes, consulte o *Apêndice A, Cartas de apoio*.

Assim como em outros projetos de campo do TE, como BOREAS, LBA e ABoVE, a equipe do PANGEA trabalhará com patrocinadores de fora da NASA para incorporar suas contribuições ao Plano de Experimentos Concisos do PANGEA. Esse processo incluirá (1) a definição de atividades e financiadores para garantir que o suporte seja complementar e não duplicado; (2) a simplificação do gerenciamento, da comunicação e da supervisão entre os patrocinadores; e (3) a abordagem das

questões de segurança de dados. O PANGEA se baseará na experiência anterior do TE, que combinou com sucesso recursos da NASA e de fora da NASA para atender às lacunas críticas de conhecimento das ciências da Terra e servirá como um protótipo para a NASA avançar com essas parcerias no futuro.

Tabela 12. Oportunidades potenciais de cofinanciamento e apoio em espécie do PANGEA.

USFS-IP: Programas Internacionais do Serviço Florestal dos EUA. ONACC: Observatório Nacional de Mudanças Climáticas (Camarões).

ÁREA DO PROJETO	PROGRAMAS DA NASA	OUTRO GOVERNO DOS EUA	GOVERNO INTERNACIONAL	OUTROS
SENSORIAMENTO REMOTO	TE, programas relacionados	NOAA, NSF, USDA, USFS, USGS	AGEOS, ESA, INPE	Laboratório de Terras e Carbono, MapBiomas
HOSPEDAGEM DE DADOS	TE	DAACs, AmeriFlux (DOE)	ESA, ICOS	Global Forest Watch, Google, MoveBank, Planet
PESQUISA	TE, programas relacionados	DOE, NOAA, NSF	NERC do Reino Unido, UE, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), CNPq, Belmont Forum	Schmidt Sciences, Fundação Moore
TREINAMENTO E EDUCAÇÃO	ARSET, DEVELOP, SERVIR, GLOBE, Iniciativa dos Povos Indígenas	USAID, USFS-IP	FCDO (Reino Unido), Iniciativa One Forest Vision	AmIT, CBSI, R2FAC, Filantropias, Doadores
APLICATIVOS	Earth Action, SERVIR, Colheita	USAID, USFS-IP, USGS	UE, GCF-TF, ONACC, OSFAC	Bezos Earth Fund, NICFI, Fundação Moore, Setor privado

10.3 Ciência aberta - gerenciamento e compartilhamento de dados

O PANGEA facilitará a ciência de código aberto, promoverá a colaboração e maximizará o valor dos dados do PANGEA de forma ampla e a longo prazo, em alinhamento com a Estratégia para Ciência Aberta da NASA (Strategy for Data Management and Computing for Groundbreaking Science 2019-2024). Essa estratégia seguirá os princípios e práticas da comunidade e manterá em mente as diretrizes éticas e a sensibilidade cultural. O PANGEA também coordenará estreitamente com parceiros indígenas para garantir a soberania dos dados, incluindo especificamente a Soberania de Dados Indígenas (IDS). O PANGEA se baseará no sucesso de projetos de campo anteriores e aproveitará os novos avanços em conceitos e tecnologias de ciência aberta e gerenciamento de dados.

O PANGEA integrará fluxos de dados de vários sistemas de aquisição de dados, parceiros, países e paradigmas (por exemplo, paradigma da ciência ocidental, conhecimento ecológico indígena, conhecimento ecológico tradicional) (consulte a **Tabela 13**). O gerenciamento de dados do PANGEA seguirá os princípios de orientação Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable (FAIR) para melhorar a descoberta e a acessibilidade dos dados, promover a interoperabilidade e a integração dos dados e aprimorar a reutilização e a reprodutibilidade dos dados (Wilkinson et al., 2016). A coleta, o gerenciamento e o uso de dados do PANGEA também se alinharão aos princípios da CARE, que enfatizam a importância de considerar os direitos e os interesses dos povos indígenas e das comunidades locais ao gerenciar dados relacionados a suas comunidades, terras e recursos. Os

princípios CARE para Governança de Dados Indígenas complementam os princípios FAIR, concentrando-se nas dimensões éticas, culturais e sociais do gerenciamento de dados e refletindo a função crucial dos dados no avanço da inovação e da autodeterminação indígenas (Caroll et al., 2020).

A coleta, o gerenciamento e o uso dos dados do PANGEA também reconhecem a importância da soberania dos dados, o que exige parcerias ativas com os povos indígenas e as comunidades locais. A soberania dos dados é o gerenciamento de informações de forma consistente com as leis, as práticas e os costumes do estado-nação no qual elas estão localizadas. A soberania dos dados indígenas é o "direito dos Povos e Nações Indígenas de governar a coleta, a propriedade e a aplicação de seus próprios dados, decorrente do direito inerente das Nações Indígenas de governar seus povos, terras e recursos", e está posicionada como um direito coletivo dentro das estruturas internacionais de direitos indígenas (Cannon et al., 2024). Os detentores de conhecimento indígena retêm informações e dados culturalmente sensíveis. Para garantir que os esforços de coleta e gerenciamento de dados do PANGEA sejam éticos e respeitem os direitos dos Povos Indígenas e das Comunidades Locais, o PANGEA trabalhará com parceiros e Povos Indígenas e Comunidades Locais seguindo os princípios da CARE, conforme descrito na **Tabela 8**.

A participação na Equipe Científica do PANGEA exigirá o compromisso de fornecer acesso livre, aberto e transparente a todos os dados adquiridos como parte do PANGEA, de acordo com os princípios FAIR e CARE. Em colaboração com o Gerenciamento de Programas da NASA, a Equipe Científica do PANGEA, liderada por um Grupo de Coordenação de Ciência Aberta do PANGEA, trabalhará com agências governamentais, parceiros de governos estrangeiros e parceiros indígenas para estabelecer acordos e fluxos de trabalho de coleta, compartilhamento e manuseio de dados e informações em nível nacional, de agência internacional e territorial para delinear a propriedade dos dados, os direitos de uso e os planos de armazenamento em conformidade com os princípios da Ciência Aberta, FAIR e CARE. O PANGEA priorizará as publicações de primeira autoria de pesquisadores em início e meio de carreira dos trópicos e o avanço da pesquisa liderada por indígenas.

Tabela 13. Exemplos de atividades coordenadas de gerenciamento e compartilhamento de dados com parceiros.

PARCEIRO(S)	ATIVIDADE DE GERENCIAMENTO E COMPARTILHAMENTO DE DADOS
LBA	O LBA e o PANGEA trabalharão juntos para harmonizar protocolos para vários tipos de dados, incluindo inventário florestal, fluxos baseados em torres e aquisições de VANTs. A política de dados revisada do LBA, adotada recentemente (junho de 2024), baseia-se nos princípios e diretrizes da Ciência Aberta, uso justo e negociação justa, em conformidade com os princípios de dados FAIR. Os dados do LBA adotarão a licença Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-4.0; https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Expandir o acesso e a colaboração da comunidade científica com os dados do programa. Essas novas políticas de dados do LBA devem tornar os dados do LBA e do NASA PANGEA e as políticas de ciência aberta altamente compatíveis.
ALIANÇA PARA A CIÊNCIA DAS FLORESTAS TROPICAIS (ATFS)	Coordenar com os parceiros da rede de parcelas de florestas tropicais da ATFS para garantir que a coleta e o gerenciamento de dados terrestres e de drones sigam os padrões e protocolos existentes.

PARCEIRO(S)	ATIVIDADE DE GERENCIAMENTO E COMPARTILHAMENTO DE DADOS
PARCEIROS INDÍGENAS E DA COMUNIDADE LOCAL (POR EXEMPLO, GATC, RRI)	Envolver-se com os parceiros da IPLC durante o desenvolvimento do Plano de Experimento Conciso, bem antes de os dados serem coletados. Determine quem é responsável por conceder permissão para que partes externas acessem dados e/ou territórios indígenas para pesquisa. Crie etapas ou políticas para pesquisadores e/ou IPLCs para compartilhamento de dados e/ou solicitação de permissão para acessar dados ou territórios IPLC. Estabelecer um plano para coleta e/ou monitoramento de dados. Desenvolver capacidade e trabalhar com parceiros, incluindo os IPLCs, para garantir o financiamento do armazenamento e gerenciamento de dados indígenas liderados pelos IPLCs. Fornecer treinamento para criar ferramentas para os IPLCs que apoiariam a coleta, o gerenciamento e a divulgação de dados.
EQUIPES CIENTÍFICAS NEON, SBG E NISAR	Harmonizar os protocolos entre as comunidades de pesquisa para apoiar o dimensionamento. Exemplos de iniciativas existentes com as quais o PANGEA se envolverá incluem a equipe do algoritmo de vegetação terrestre SBG VSWIR e a rede NISAR cal/val. O PANGEA contribuirá para o desenvolvimento de protocolos de coleta de dados, estratégias de extração e processamento de dados aéreos e estruturas de banco de dados que permitirão que a coleta conjunta de dados aéreos e de campo gerados pela comunidade seja mais facilmente integrada aos conjuntos de dados de treinamento de modelos necessários para aprimorar os algoritmos para ecossistemas sub-representados.

O PANGEA seguirá as diretrizes da Especificação de Conteúdo de Preservação de Dados de Ciências da Terra da NASA² para preparar e preservar os dados, bem como as informações associadas, além da vida útil de um projeto. Isso permitirá que os futuros usuários entendam como os dados foram usados para obter informações, conhecimentos e recomendações de políticas, além de garantir a reprodutibilidade para verificar a validade e as possíveis limitações das conclusões alcançadas no passado e proporcionar confiança nas tendências de longo prazo que dependiam de dados de vários projetos. O documento Preservation Content Implementation Guidance (Orientação para implementação de conteúdo de preservação)³ fornece diretrizes e listas de verificação para atender às necessidades de PCS para diferentes tipos de projetos de pesquisa em ciências da Terra, incluindo investigações aéreas e de campo.

Em colaboração com os parceiros, o Escritório de Projetos do PANGEA desenvolverá um **Portal de Informações do PANGEA (PIP)** acessível ao público. Esse Portal de Informações delinear a estratégia de gerenciamento e compartilhamento de dados do PANGEA, fornecerá links diretos para dados, modelos e informações sobre as atividades planejadas e em andamento dos pesquisadores e colaboradores do PANGEA, incluindo inventários do local, do momento e dos tipos de dados coletados. A Equipe Científica e o Escritório de Projetos do PANGEA trabalharão em estreita colaboração com os proprietários de dados ao reunir e vincular-se às fontes de dados existentes para garantir que o compartilhamento de dados seja colaborativo e ético e respeite os direitos e a propriedade dos dados já coletados de acordo com os princípios FAIR e CARE. O PIP fornecerá fácil descoberta e acesso aos dados coletados pelo PANGEA e também aos dados existentes úteis para a pesquisa do PANGEA.

O suporte à visualização e ao GIS será fundamental para maximizar o valor dos dados do PANGEA para um público mais amplo. O PANGEA trabalhará com parceiros voltados para a ação, como a Global Forest Watch e a Rights and Resources Initiative, para desenvolver aplicativos que garantam que os dados sejam acessíveis a não cientistas. Mecanismos adicionais de relatório de dados e resultados serão uma parte importante do PANGEA para garantir a acessibilidade aos parceiros

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>

indígenas e da comunidade local. Os modos específicos de comunicação serão determinados em colaboração com os parceiros indígenas e da comunidade local e serão específicos para cada paisagem.

A proveniência e a reprodutibilidade dos dados são aspectos importantes da ciência de código aberto. Os protocolos de amostragem, os metadados, a limpeza de dados, os códigos, os algoritmos e os fluxos de trabalho associados à criação, ao processamento e à validação de dados do PANGEA serão disponibilizados abertamente. O PANGEA estabelecerá formatos e práticas consistentes para dados e metadados e otimização para acesso e análise baseados em nuvem, especialmente para tipos emergentes de dados, como conjuntos de dados baseados em drones. Essas atividades trabalharão com os esforços existentes específicos de dados e disciplinas, em vez de tentar replicá-los. As redes e os programas existentes, como FLUXNET, NEON, ICOS, OzFlux, TERN e SAEON, investiram na definição de padrões no processamento e na distribuição de dados e estão se movendo em direção à implementação do FAIR. As Redes Regionais também têm atividades em áreas tropicais; por exemplo, o ICOS está coordenando o projeto KADI (Knowledge and climate services from an African observation and Data research Infrastructure, <https://kadi-project.eu/>), que tem o objetivo de projetar e avançar em direção a um sistema de observação climática pan-africano.

As conversas para garantir o alinhamento com esses esforços já começaram. A coordenação será aprofundada após a seleção para garantir que dados terrestres, dados de torres de fluxo, dados de drones, dados de armadilhas fotográficas, dados bioacústicos, conhecimento ecológico tradicional e indígena, entre outros, sejam coletados, armazenados e compartilhados adequadamente e de acordo com as melhores práticas disponíveis. O PANGEA aproveitará e se integrará aos recursos e sistemas existentes e emergentes oferecidos pelos Sistemas de Dados de Ciências da Terra da NASA, tanto quanto possível. Isso inclui os Centros de Arquivo Ativo Distribuído (DAACs) para dados aéreos, ferramentas e serviços do DAAC para facilitar o uso de dados aéreos e orbitais na pesquisa de ecologia terrestre, a plataforma de Visualização, Exploração e Análise de Dados (VEDA) da NASA (<https://www.earthdata.nasa.gov/esds/veda>) e os esforços contínuos para coordenar a padronização e os protocolos de dados.

O PANGEA também adotará uma abordagem de código aberto para os modelos. Espera-se que os modelos que participam das atividades e dos projetos relacionados ao PANGEA tenham o código-fonte disponível abertamente por meio de plataformas colaborativas (por exemplo, GitHub) e que sejam lançados com licenças permissivas de acordo com o Science Mission Directorate (SMD) Open-Source Science Guidance. O PANGEA promoverá a governança do modelo para o envolvimento da comunidade, incluindo um código de conduta, notas técnicas e guias do usuário, um fórum ativo para discutir problemas de código e caminhos para contribuições com o desenvolvimento de modelos da comunidade científica em geral. Para estar em conformidade com os princípios de ciência aberta do PANGEA, os projetos que fazem parte do PANGEA depositarão a versão exata dos modelos publicados em repositórios de longo prazo com um DOI, juntamente com informações sobre parâmetros e dados necessários para reproduzir os resultados.

O PANGEA desenvolverá uma **plataforma aberta de análise de dados baseada em nuvem** para que os pesquisadores do PANGEA apoiem a pesquisa aberta e colaborativa. A plataforma de análise de dados do PANGEA será baseada em nuvens científicas bem-sucedidas implementadas pela ABoVE, SHIFT, BioSCape e pela Multi-Mission Algorithm and Analysis Platform (MAAP, <https://www.earthdata.nasa.gov/esds/maap>) da NASA. Esses esforços demonstram a colaboração internacional bem-sucedida de dados, inclusive entre a NASA e a ESA (MAAP), e aproveitando o

Programa de Responsabilidade Social da Amazon Web Services (BioSCape). A plataforma de computação baseada em nuvem do PANGEA reduzirá as barreiras de entrada, especialmente para os parceiros internacionais que provavelmente são limitados em termos de largura de banda, capacidade de armazenamento de dados e poder de computação. A plataforma de computação em nuvem também permitirá que os membros da equipe científica do PANGEA compartilhem facilmente as primeiras versões dos produtos de dados (antes de estarem prontos para o arquivamento) e solucionem problemas de análise de dados em conjunto. Além disso, os materiais de capacitação, especialmente os notebooks de codificação, podem ser desenvolvidos especificamente para o ambiente de computação em nuvem, permitindo que qualquer pessoa em qualquer lugar do mundo os execute e aplique abordagens semelhantes. A importância de um ambiente de computação em nuvem foi demonstrada durante a BioSCape, cujos membros da equipe científica sul-africana, de outra forma, teriam sido severamente limitados em sua capacidade de acessar, analisar e aplicar os dados da campanha.

O PANGEA fornecerá capacitação em ciência de código aberto e gerenciamento de dados durante todo o projeto, inclusive por meio de treinamentos e workshops sobre gerenciamento de dados em colaboração com os DAACs, FLUXNET, LBA, organizações parceiras indígenas e comunitárias locais, como a Aliança Global de Comunidades Territoriais, ATFS e outras. Muitos desses parceiros têm programas de treinamento existentes que serão aproveitados. O PANGEA priorizará treinamentos e workshops com parceiros para apoiar esforços independentes e coordenados de gerenciamento de dados, o que (1) aumenta a capacidade dos povos indígenas, das comunidades locais e das instituições tropicais; e (2) garante o alinhamento internacional que servirá de base para que os conjuntos de dados e a colaboração continuem após o projeto PANGEA. O cofinanciamento está sendo buscado para apoiar o investimento em infraestrutura necessário para garantir que a ciência de código aberto possa ser realizada de forma equitativa nas paisagens do PANGEA, incluindo o financiamento para apoiar a infraestrutura local de eletricidade e internet.

10.4 Horário

A equipe do PANGEA usou reuniões virtuais e híbridas para o envolvimento inicial de uma equipe de escopo científico diversificado. Temos abordagens que economizam tempo e podem reduzir bastante o cronograma necessário para desenvolver o Plano de Experimento Conciso e passar para a fase de Implementação. **A Tabela 14** descreve o cronograma proposto, supondo que as próximas atividades do PANGEA comecem no ano fiscal de 2025.

Tabela 14. Cronograma proposto para o PANGEA.

SDT: Equipe de Definição Científica. TE: Ecologia terrestre. CEP: Plano Conciso de Experimentos. PAC: Campanha Aérea do PANGEA. SATSM: Equipe de Ciências e Aplicações e Reunião de Partes Interessadas.

ANO DE ESTUDO	CEP		FASE I			FASE II			FASE III	
	FY25	FY26	1	2	3	4	5	6	7	8
ATIVIDADES DO ESCRITÓRIO DE PROJETOS	FY25	FY26	FY27	FY28	FY29	FY30	FY31	FY32	FY33	FY34
PANGEA selecionado. Início do planejamento detalhado: Seleção da Equipe de Definição Científica. CEP elaborado, aberto para análise da comunidade e concluído.										
O anúncio de oportunidade (NRA) do PANGEA é divulgado pela NASA. O Escritório de Projetos inicia os preparativos com base no CEP. As propostas da Fase 1 do PANGEA são concedidas. 1º SATSM.										
2º Workshop de Planejamento de Campanha Aérea e SATSM. Campanha Aérea I do PANGEA (PACI)										
3º PANGEA SATSM e Planejamento Aerotransportado. Campanha Aérea II do PANGEA (PACII). Propostas e seleção da NASA NRA PANGEA Fase 2.										
4º PANGEA SATSM e Planejamento Aerotransportado. Campanha Aerotransportada III do PANGEA (PACIII).										
5º PANGEA SATSM. Campanha Aerotransportada IV do PANGEA (PANIV).										
6º PANGEA SATSM. Campanha Aérea de Apoio V do PANGEA (PANV). Propostas e seleção da NASA NRA PANGEA Fase 3.										
7º PANGEA SATSM.										
8º PANGEA SATSM.										

10.5 Avaliação de risco

O PANGEA usará o gerenciamento proativo de riscos para mitigar todos os riscos de todas as atividades do projeto, incluindo viagens, trabalho de campo, uso de equipamentos e operações aéreas e de campo em toda a ampla gama de estudos tropicais necessários para fornecer ciência de alto impacto. O Escritório do Projeto compilará uma lista abrangente dos riscos do projeto, os avaliará com uma Matriz de Avaliação de Risco padrão, fornecerá essas avaliações de risco aos participantes e monitorará a conformidade. O projeto também se coordenará com os requisitos de saúde e segurança de cada instituição parceira. Para os casos de alto e médio risco, o projeto desenvolverá e implementará um plano de mitigação, que será revisado com o Escritório do Programa da NASA. O PANGEA espera que a maioria dos riscos se enquadre em três categorias: (1) saúde e segurança; (2) cumprimento dos objetivos científicos; e (3) cumprimento dos objetivos de envolvimento da comunidade e aplicações.

Saúde e segurança: O projeto seguirá as diretrizes de saúde e segurança de viagem emitidas pelo Bureau de Assuntos Consulares do Departamento de Estado dos EUA e os indivíduos seguirão as avaliações de risco específicas do projeto elaboradas pelo escritório do projeto PANGEA. O PANGEA também entrará em contato com as embaixadas e consulados locais dos EUA e seus escritórios regionais de segurança para obter orientação. Dada a natureza remota de muitos dos locais de estudo, o projeto desenvolverá planos para o transporte seguro até os locais de estudo de campo, seja por veículo off-road, barco ou outros métodos. O projeto também desenvolverá planos para a segurança da tripulação aérea e dos operadores de instrumentos durante as campanhas, seguindo as diretrizes da NASA para operações de aeronaves e no solo. Algumas regiões de estudo em potencial incluem riscos de malária, febre amarela e outras doenças; o projeto garantirá que os participantes sejam orientados sobre vacinas relevantes e outras profilaxias antes das visitas ao campo.

Atingir os objetivos científicos: O Escritório de Projetos trabalhará de forma proativa para envolver parceiros institucionais e desenvolver MOUs formais, com a ajuda do escritório OIIR da NASA, da ESPO e do Departamento de Estado dos EUA. As campanhas aéreas internacionais têm sido repetidamente afetadas pela lentidão das autorizações de pouso e pela burocracia associada, e muito disso pode ser evitado com o início precoce do processo formal de MOU. Embora o uso de aeronaves da NASA para observações aéreas tenha benefícios, o uso dessas aeronaves requer autorização diplomática nos países da área de estudo e durante o trânsito. Às vezes, a autorização diplomática só pode ser obtida perto da data de validade, portanto, partes de campanhas ou campanhas inteiras podem ser canceladas em curto prazo. Além disso, como as aeronaves da NASA são operadas por funcionários públicos dos EUA, há um risco demonstrado de que uma paralisação do governo dos EUA atrase ou cancele os voos científicos, especialmente no período de outubro a dezembro. O Escritório de Projetos do PANGEA levará em conta esses e outros riscos e poderá considerar o uso de aeronaves comerciais para mitigar esses riscos.

O clima também é uma consideração importante na aquisição bem-sucedida de dados aéreos e de campo para o PANGEA, especialmente para observações ópticas que exigem condições sem nuvens. Durante a fase de Definição Científica, o PANGEA executará uma análise climática para determinar a melhor época do ano para as observações aéreas. Durante as campanhas aéreas, o PANGEA trabalhará com os meteorologistas locais que entendem o clima local para facilitar as recuperações aéreas e as medições de campo bem-sucedidas.

O trabalho de campo apresenta vários riscos. Para aqueles que não trabalham em florestas tropicais, riscos como cobras venenosas e aranhas venenosas vêm à mente. Embora esses riscos biológicos sejam reais, o PANGEA pode gerenciá-los estabelecendo e aplicando diretrizes de segurança e educando os participantes. O maior risco para os participantes do projeto geralmente ocorre durante o transporte de ida e volta para os locais de campo. As viagens de caminhão e de barco foram o maior risco durante o LBA. O PANGEA pode mitigar esse risco garantindo que os motoristas sejam treinados e que os veículos recebam manutenção adequada. Outros riscos no campo incluem doenças e perda de equipamentos por roubo e violência. A profilaxia médica pode atenuar doenças endêmicas, como a malária, e a violência pode ser evitada por meio de boas relações com a comunidade, consciência situacional e comunicações. O PANGEA mitigará todos esses riscos realizando treinamentos de segurança de campo e conscientização cultural específicos para o local e estabelecendo boas relações com as comunidades locais.

Atingir os objetivos de aplicações e envolvimento da comunidade: O envolvimento com as comunidades locais e o desenvolvimento de resultados científicos e de aplicações que serão úteis para uma grande variedade de pessoas exigem coordenação e esforço genuíno. Um risco para o PANGEA é que os esforços de envolvimento não sejam bem-sucedidos e/ou que os aplicativos não sejam úteis. O PANGEA tomará várias medidas para mitigar esses riscos. O PANGEA co-produzirá planos de participação para cada paisagem durante o desenvolvimento do Plano de Experimento Conciso que inclui marcos, objetivos e métricas para avaliar o sucesso regularmente durante todo o projeto. O PANGEA adotará a inclusão e trabalhará ativamente para desenvolver e promover práticas inclusivas e de co-desenvolvimento durante todo o projeto. O co-desenvolvimento de projetos e o trabalho equitativo com todos os parceiros, incluindo povos indígenas e comunidades locais, pode levar muito tempo. O PANGEA continuará a trabalhar arduamente para construir relacionamentos de longa data. Entretanto, dada a duração limitada do trabalho de campo do PANGEA em cada local, existe o risco de o projeto não atingir essas metas. O PANGEA trabalhará com os parceiros para desenvolver planos de apoio contínuo além da duração do projeto. O PANGEA trabalhará para manter relacionamentos com os parceiros da comunidade durante todo o projeto e trabalhará com parceiros internacionais e industriais para garantir financiamento adicional para apoiar esses esforços, a fim de aumentar a profundidade e o significado desses relacionamentos.

11 Figura Créditos

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

Figura 2. O painel (a) foi adaptado de Schimel et al. (2015). O painel (b) foi criado por Alison Hoyt, Clarice Perryman e Fa Li.

Figura 3. Criada por Félicien Meunier. O painel (a) foi adaptado de Friedlingstein et al. (2014) (atualização de CMIP5 para CMIP6). O painel (b) foi redesenhado do IPCC AR6 com dados recentes.

Figura 4. A figura principal foi criada por Jamy Silver. O esquema de escala no lado direito da figura foi criado por Lizbeth de la Torre.

Figura 5. Criado por Yanlei Feng, Robinson Negron-Juarez e Hannah Stouter.

Figura 6. Criado por Hannah Stouter.

Figura 7. Criado por Elsa Ordway.

Figura 8. Criado por Sofia Shen.

Figura 9. Criado por Yanlei Feng, Hannah Stouter e Marcos Longo.

Figura 10. Criado por Elsa Ordway.

Figura 11. Criado por Ovidiu Csillik.

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

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

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

Figura 15. Criado por Hannah Stouter, Marius von Essen, Ane Alencar e Maria Santos.

Figura 16. Criado por Yanlei Feng e Hannah Stouter.

Figura 17. Criado por Marcos Longo.

Figura 18. Criado por Félicien Meunier e Elsa Ordway.

Figura 19. Figura original de Fisher e Koven (2020), novos processos incluídos por Marcos Longo e Renato Braghiera.

Figura 20. Criado por Virginia Zaunbrecher.

Figura 21. Criado por Adia Bey.

Figura 22. Criado por Michael Keller e Elsa Ordway

12 Glossário

Bioeconomia: Um sistema econômico impulsionado pela pesquisa e inovação em ciências da vida e biotecnologia, abrangendo aplicações transformadoras de base biológica e bioativadas em áreas como energia, produtos químicos, materiais avançados, remediação ambiental, agricultura, eletrônica e saúde. Ele é viabilizado por avanços tecnológicos em engenharia, computação e ciências da informação ([Schmidt Futures, 2022](#)).

Biodiversidade: A variedade de vida na Terra, incluindo sua variação em nível de genes, espécies, características funcionais e ecossistemas. Nas florestas tropicais, a biodiversidade é excepcionalmente alta dentro e entre as florestas, apoiando interações complexas e a função do ecossistema e causando heterogeneidade nas respostas climáticas e na resiliência.

Ciclos biogeoquímicos: Os ciclos biogeoquímicos abrangem o movimento e a transformação de elementos essenciais (por exemplo, carbono, nitrogênio e fósforo) na biosfera, na atmosfera, na hidrosfera e na litosfera da Terra. Nas florestas tropicais, esses ciclos são altamente dinâmicos, com rápida renovação de nutrientes e biomassa; no entanto, as florestas tropicais desempenham um papel significativo no armazenamento global de carbono.

Estoques e fluxos de carbono: Os estoques de carbono referem-se à quantidade total de carbono armazenado em um sistema (por exemplo, na vegetação, nos solos ou nos oceanos), enquanto os fluxos de carbono representam o movimento de carbono para dentro e para fora desses estoques por meio de processos como fotossíntese, respiração e decomposição, e incluem fluxos de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e fluxos laterais de carbono.

Interações e feedbacks climáticos: Interações bidirecionais entre os sistemas climáticos e os ecossistemas. As florestas tropicais regulam diretamente os ciclos de carbono, água e energia. As mudanças climáticas (como mudanças de temperatura e precipitação) e as mudanças no uso e na cobertura da terra (como incêndios e degradação florestal) podem alterar a dinâmica do ecossistema florestal, criando ciclos de feedback que afetam a estabilidade climática global.

Co-benefícios: Contribuições positivas conjuntas da biodiversidade e da diversidade cultural para os seres humanos e outras espécies. Essas contribuições estão associadas aos conceitos das contribuições da natureza para as pessoas e das contribuições das pessoas para a natureza (Levis et al, 2024).

Comunidade: Grupos formais e informais de pessoas que se percebem como membros e que podem compartilhar interesses, experiências, recursos, atividades, profissões, meios de subsistência, cultura, geografia, origens, idioma ou qualquer combinação dos itens acima.

Dinâmica de distúrbios: A dinâmica de distúrbios varia de acordo com o tipo, a intensidade e a frequência, e envolve eventos naturais ou induzidos pelo homem, como incêndios, tempestades, secas e exploração madeireira, que perturbam os ecossistemas e afetam sua estrutura e função. Nas florestas tropicais, esses distúrbios podem levar a mudanças no ciclo biogeoquímico, na biodiversidade e nos feedbacks do clima e dos sistemas socioecológicos.

Ecossistema: O PANGEA usa a definição de trabalho de ecossistema do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que inclui as pessoas como organismos-chave, incluindo, portanto, agroecossistemas e, de forma mais ampla, sistemas socioecológicos. Uma unidade funcional que

consiste em organismos vivos, seu ambiente não vivo e as interações dentro e entre eles. Os componentes incluídos em um determinado ecossistema e seus limites espaciais dependem da finalidade para a qual o ecossistema é definido: em alguns casos, eles são relativamente nítidos, enquanto em outros são difusos. Os limites dos ecossistemas podem mudar com o tempo. Os ecossistemas estão aninhados dentro de outros ecossistemas, e sua escala pode variar de muito pequena a toda a biosfera. Na era atual, a maioria dos ecossistemas contém pessoas como organismos-chave ou é influenciada pelos efeitos das atividades humanas em seu ambiente. (IPCC AR6 WGI, WGII, WGIII)

Serviços ecossistêmicos: Os serviços ecossistêmicos são os benefícios que os seres humanos obtêm dos ecossistemas naturais, incluindo o abastecimento (por exemplo, alimentos, água), a regulação (por exemplo, regulação do clima, controle de enchentes), o apoio (por exemplo, ciclagem de nutrientes, formação do solo) e os serviços culturais (por exemplo, recreação, valor espiritual).

Degradação florestal: Uma floresta é degradada quando a taxa de perturbação exógena excede a taxa média de perturbação exógena de longo prazo para o ecossistema e os efeitos dessa perturbação podem ser diferenciados da estrutura e/ou composição da floresta antiga. A exploração madeireira, o fogo, a mineração e a fragmentação são causas comuns de degradação florestal.

Atividades favoráveis à floresta: Atividades econômicas que usam recursos florestais de forma a preservar a integridade ecológica da floresta e apoiar os meios de subsistência sustentáveis das comunidades locais IUCN (2021).

Função da floresta: A função florestal refere-se aos papéis ecológicos das florestas, como a regulação do clima, o apoio à biodiversidade, o ciclo de nutrientes e o fornecimento de habitat, que contribuem para a saúde e a estabilidade gerais dos ecossistemas. As funções florestais incluem a produtividade primária bruta (GPP), a produtividade da madeira, a respiração do ecossistema e a evapotranspiração.

Estrutura da floresta: Biomassa, altura do dossel, densidade do tronco, heterogeneidade vertical da altura e distribuições verticais da densidade da área vegetal

Atividades humanas: Práticas e comportamentos econômicos, de subsistência, culturais e de desenvolvimento formais, informais, legais, ilegais e tradicionais por parte dos seres humanos que levam à exploração, alteração e degradação dos ecossistemas florestais, incluindo exploração madeireira, desenvolvimento de infraestrutura, agricultura, criação de gado, incêndios, mineração, caça e exploração da vida selvagem e produção de carvão vegetal.

Mudança no uso da terra: As mudanças no uso e na cobertura da terra referem-se à alteração da superfície da Terra, incluindo mudanças na forma como a terra é usada (por exemplo, agricultura, urbanização) e mudanças em sua cobertura física (por exemplo, desmatamento, reflorestamento, expansão urbana).

Resiliência: A capacidade dos sistemas sociais, econômicos e ecológicos interconectados de lidar com um evento perigoso, tendência ou distúrbio, respondendo ou se reorganizando de forma a manter sua função, identidade e estrutura essenciais. A resiliência é um atributo positivo quando mantém a capacidade de adaptação, aprendizado e/ou transformação (Arctic Council, 2016). (IPCC AR6 WGI, WGII, WGIII)

Sistemas socioecológicos: Sistemas interconectados de seres humanos e natureza, em que os componentes ecológicos e sociais interagem e se influenciam mutuamente. Nas florestas tropicais,

esses sistemas são moldados pelos meios de subsistência, práticas culturais e uso de recursos das comunidades locais e globais, enquanto as mudanças ecológicas afetam o bem-estar social, criando feedbacks complexos entre as atividades humanas e a estabilidade do ecossistema.

Comunidades vulneráveis: Comunidades que têm maior probabilidade de sofrer os efeitos adversos das mudanças climáticas e da degradação ambiental, incluindo povos indígenas, comunidades de baixa renda e aquelas que dependem de recursos naturais para sua subsistência. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) (2020).

Vulnerabilidade: A propensão dos sistemas sociais e ecológicos e suas práticas a serem afetados negativamente por mudanças, abrangendo sua sensibilidade a essas mudanças e sua capacidade de adaptação. Adaptado de (FAO 2013).

13 Acrônimos e abreviações

AboVE	Experimento de Vulnerabilidade Boreal do Ártico
ABSOLUG	Simulador de governança de uso da terra baseado em agentes
AGEOS	Agência de Estudos e Observações Espaciais (Gabão)
AGU	União Geofísica Americana
IA	Inteligência artificial
IA/ML	Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina
AI4ESP	Artificial Intelligence for Earth System Predictability (Inteligência artificial para previsibilidade do sistema terrestre)
AmeriFlux	Rede de torres de Fluxos de Foucault das Américas
AmIT	Instituto de Tecnologia da Amazônia
AMMA-CATCH	Análise Multidisciplinar da Monção Africana Acoplamento da Atmosfera Tropical e do Ciclo Hidrológico
AMMI	Mestres Africanos de Inteligência Mecânica
AMSR-E	Radiômetro avançado de varredura de micro-ondas para a missão EOS
AndesFlux	Torres de fluxo operadas pela PUCP
ARES	Instalação de pesquisa aérea para o sistema terrestre
ARLApplication	Readiness Level (Nível de prontidão do aplicativo)
ASTER	Radiômetro Avançado de Emissão e Reflexão Térmica Espacial
ATBC	Associação para Biologia Tropical e Conservação
ATFS	Aliança para a Ciência das Florestas Tropicais
ATTO	Observatório da Torre Alta da Amazônia (Presidente Figueiredo, Brasil)
BiomaE	Um modelo de vegetação demográfica NASA-GISS
BioSCape	Pesquisa de Biodiversidade do Cabo
BOREAS	Estudo do Ecossistema Boreal e da Atmosfera
CARAFECarbon	Airborne Flux Experiment (experimento de fluxo aéreo de carbono)
CarbonTracker	Sistema de assimilação de dados para rastreamento de CO ₂
CARDAMOM	Estrutura de modelagem de dados de carbono

CUIDADOS	Benefício coletivo, autoridade de controle, responsabilidade e ética
CBFP	Parceria Florestal da Bacia do Congo
CBI	Instituto da Bacia do Congo
CBSI	Iniciativa Científica da Bacia do Congo
CCE	Ciclo de Carbono e Ecossistemas (escritório da NASA)
CENAREST	Centro Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica (Gabão)
CEOS	Comitê de Satélites de Observação da Terra
CEP	Plano de experimento conciso
CFIS	Espectrômetro de imagem de fluorescência de clorofila
CGIAR	Grupo Consultivo para Pesquisa Agrícola Internacional
CH₄	Metano
CHIME	Missão Copernicus Hyperspectral Imaging para o Meio Ambiente
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CIFOR-ICRAF	Centro de Pesquisa Florestal Internacional e Agrofloresta Mundial
CLiMA	Aliança de Modelagem Climática
MVC	Modelo de Terreno Comunitário
CMIP	Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados
CMIP5	CMIP-Fase 5
CMIP6	CMIP-Fase 6
CMS-Flux	Sistema de inversão de fluxo do sistema de monitoramento de carbono
CNES	Agência Espacial Nacional Francesa
CO₂	Dióxido de carbono
COCCON	Rede colaborativa de observação da coluna de carbono
Co-investigador	Co-investigador
COMIFAC	COMIFAC
CongoFlux	Torre de fluxo de covariância de Foucault na Bacia do Congo
COS	Sulfeto de carbonila

CSDA	Aquisição de dados de SmallSat comercial
CUE	Eficiência no uso de carbono
DEI	Diversidade, equidade e inclusão
DGVM	Modelo de Vegetação Global Dinâmico
DLR	Centro Aeroespacial Alemão
DOE	Departamento de Energia
RDC	República Democrática do Congo
E3SM	Modelo do Sistema Terrestre em Exascale de Energia
EBV	Variável essencial da biodiversidade
ECOSTRESS	Experimento de Radiômetro Térmico Espacial de Ecossistema na Estação Espacial
DE	Demografia do ecossistema
ED2	Modelo de Demografia do Ecossistema versão 2
ED3	Modelo de Demografia do Ecossistema versão 3
EDGE	Earth Dynamics Geodetic Explorer (Explorador Geodésico de Dinâmica da Terra)
eDNA	Ácido desoxirribonucleico ambiental
ELM	Modelo de terreno E3SM
	Investigação da fonte de poeira mineral de superfície EMITEarth
ENSO	El Niño Oscilação Sul
Ent TBM	Modelo da Biosfera Terrestre
EOS	Sistema de Observação da Terra
ES2A	Estratégia de Ciências da Terra para Ação da NASA
ESA	Sociedade Ecológica da América
ESA	Agência Espacial Europeia
ESM	Modelo do Sistema Terrestre
ESRI	Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais, Inc.
ET	Evapotranspiração

EUDR	Regulamentos de commodities livres de desmatamento da União Europeia
FAIR	Encontrável, acessível, interoperável e reutilizável
FAO	Food and Agriculture Organization (Organização das Nações Unidas)
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FATES	Simulador de ecossistema terrestre montado funcionalmente
FIFE	Primeiro experimento de campo da ISLSCP
FLEX	Missão Fluorescence Explorer
FLUXNET	Rede global de torres de fluxo de covariância de Foucault
ForestGEO	Observatório Global da Terra para Florestas
ForestPlots	Rede para medir, monitorar e compreender as florestas do mundo
FORMIND	Modelo florestal Modelo baseado em indivíduos
FTAC	Fast Track Action Committee (sobre serviços climáticos)
GAO	Observatório Aéreo Global
GATC	Aliança Global de Comunidades Territoriais
GCF-TF	Força-Tarefa dos Governadores para o Clima e as Florestas
GEDI	Global Ecosystem Dynamics Investigation (Investigação da Dinâmica do Ecossistema Global)
GEM	Rede de monitoramento de ecossistemas globais
GEO BON	Group on Earth Observations Rede de Observação da Biodiversidade
GEO	Grupo de Observações da Terra
GEO-TREES	Grupo de Observações da Terra - Árvores
GHG	Gases de efeito estufa
GIS	Sistema de Informações Geográficas
GISS	Instituto Goddard de Estudos Espaciais (NASA)
GLOBE	Global Learning and Observations to Benefit the Environment (Aprendizado e observações globais para o benefício do meio ambiente)
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
GOES	Satélites Ambientais Operacionais Geoestacionários

GOSAT	Satélite de Observação de Gases de Efeito Estufa
GPM	Medição Global de Precipitação
PPB	Produtividade primária bruta
GPS	Sistema de Posicionamento Global
GPU	Unidade de processamento gráfico
GRACE	Experimento de Recuperação da Gravidade e do Clima
GRACE-FO	Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On mission (Missão de acompanhamento do experimento climático e de recuperação da gravidade)
GSFC	Centro de Voo Espacial Goddard
Guyaflux	Torre de fluxo de covariância Eddy na estação de campo de Paracou (Sinnamary, Guiana Francesa)
Guyafor	Rede de 54 parcelas de longo prazo em 17 locais na Guiana Francesa
H₂O	Water
HBCUs	Faculdades e Universidades Historicamente Negras
HiLDEN	Rede de Ecologia de Drones de Alta Altitude
SEDE	Sede social
HYSPLIT	Um modelo de dispersão e transporte atmosférico da NOAA
HyTES	Espectrômetro de emissão térmica hiperespectral
AI	Acordo de implementação
ICCN	Instituto Congolês de Conservação da Natureza
ICOS	Sistema Integrado de Observação de Carbono
IEK	Conhecimento ecológico indígena
IITA	Instituto Internacional de Agricultura Tropical
ILAMB	Projeto Internacional de Benchmarking de Modelos de Terras
INPA	Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Brasil)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Brasil)
IPBES	Plataforma Intergovernamental de Políticas Científicas sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos

IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPLCs	Povos indígenas e comunidades locais
IRD	Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento (França)
ISLSCP	Projeto Internacional de Climatologia da Superfície Terrestre por Satélite
ISRO	Organização de Pesquisa Espacial Indiana
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
IUCN	União Internacional para a Conservação da Natureza
JAXA	Agência de Exploração Aeroespacial do Japão
JSBACH	Esquema de Jena para acoplamento da biosfera-atmosfera no modelo de Hamburgo
JULES	Simulação conjunta do ambiente terrestre do Reino Unido
K34	Torre de covariância de Foucault do quilômetro 34 (Manaus, Brasil)
K67	Torre de covariância de Foucault do km 67 (Belterra, Brasil)
LAI	Índice de área foliar
LBA	Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia
LBA-ECO	A contribuição do Programa de Ecologia Terrestre da NASA para a primeira fase do LBA
LBNL	Laboratório Nacional Lawrence Berkeley
LCLUC	Mudança na cobertura e no uso da terra (NASA)
LEK	Conhecimento ecológico local
LPJ	Modelo dinâmico de vegetação global de Lund-Potsdam-Jena
LPJ-GUESS	Simulador geral de ecossistema LPJ
LST	Temperatura da superfície terrestre
LUH2	Projeto de Harmonização do Uso da Terra, versão 2
LVIS	Sensor de terra, vegetação e gelo
MAAP	Plataforma de Análise e Algoritmo Multi-Missão
MapBiomass	Iniciativa Biome Mapper
MASTER	Radiômetro de Emissão e Reflexão Térmica Espacial MODIS/ASTER

MetaFlux	Estrutura de meta-aprendizagem para ciências climáticas
MINFOF	Ministério das Florestas e da Fauna, Camarões
ML	Aprendizado de máquina
ModEX	Experimentação de modelos
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada)
MOU	Memorando de entendimento
MRV	Monitoramento, relatório e verificação
MSI	Instituição que atende a minorias
N₂O	Óxido nitroso
NASA	Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço
NASA-CASA	Modelo de ecossistema da NASA Carnegie-Ames-Stanford
NBE	Troca líquida da biosfera
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NEON	Rede Nacional de Observatórios Ecológicos
NGEE-Trópicos	Experimentos de Ecossistema de Próxima Geração - Trópicos
ONG	Organização não governamental
NISAR	Missão SAR NASA-ISRO
NOAA	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica
NOANET	Rede de Acesso Aberto do Noroeste
NPP	Produtividade primária líquida
NSB	Conselho Nacional de Ciências
NSC	Carboidrato não estrutural
NSF	Fundação Nacional de Ciências
NSTC	Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia
OCO-2/3	Observatório Orbital de Carbono-2 ou -3
OECMs	Outras medidas de conservação eficazes

OFVi	Iniciativa One Forest Vision
OIIR	Escritório de Relações Internacionais e Interagências da NASA
ONACC	Observatório Nacional de Mudanças Climáticas (Camarões)
ORQUÍDEA	Organização de carbono e hidrologia em ecossistemas dinâmicos
ORNL	Laboratório Nacional de Oak Ridge
OSFAC	Observatório de Satélite das Florestas da África Central
OSSE	Experimento de Simulação do Sistema de Observação
PAC	Campanha Aérea Pangea
PACEPlâncton	, Aerossol, Nuvem, Missão do Ecossistema Oceânico
PANGEA	Pesquisa tropical do PAN sobre bioquímica e adaptação ecológica
PecAn	Analisador Preditivo de Ecossistema
PFT	Tipo funcional da planta
PhenoCam	Câmera fenológica
PI	Pesquisador principal
PIP	Portal de informações do PANGEA
PUCP	Pontifícia Universidade Católica do Peru
QA/QC	Avaliação e controle de qualidade
R2FAC	Rede de Pesquisa Florestal da África Central
RAINFOR	Rede de Inventário Florestal da Amazônia
RepastSymphony	Kit de ferramentas de simulação de agente poroso recursivo com interface Symphony Java
RESSAC	Programa de Pesquisa Aplicada em Ecologia e Ciências Sociais
RGB	Vermelho verde azul
RRI	Iniciativa de Direitos e Recursos
RUBISCO	Redução das incertezas nas interações biogeoquímicas por meio de síntese e computação
SATSM	Reunião da equipe de ciências e aplicações e das partes interessadas
SBG	Missão de Biologia e Geologia de Superfície

SDTS	Equipe de definição da ciência
SERVIR	SERVIR é uma parceria entre a NASA e a USAID que apóia esforços liderados localmente para fortalecer a resistência climática, a segurança alimentar e hídrica, o gerenciamento de florestas e carbono e a qualidade do ar.
SES	Sistemas socioecológicos
SHIFT	Séries temporais de alta frequência SBG
SIF	Fluorescência induzida pelo sol (clorofila)
SILK	Escola de Conhecimento Indígena e Local
SimPachamama	Modelo de simulação híbrida para compensações socioambientais
SL	Liderança científica
SLA	Área foliar específica
SMAP	Umidade do Solo Ativo Passivo
SMOS	Umidade do solo e salinidade oceânica
SPUN	Sociedade para a Proteção de Redes Subterrâneas
SSC	Comitê de Direção Científica
SSP	Caminhos Socioeconômicos Compartilhados
SST	Temperatura da superfície do mar
STEM	Ciência, tecnologia, engenharia e matemática
STILT	Modelo de transporte lagrangiano invertido no tempo estocástico
STRI	Instituto de Pesquisa Tropical Smithsonian
SWOT	Missão de Topografia de Águas Superficiais e Oceanos
Tallo	Um banco de dados global de alometria de árvores e arquitetura de copas
TBD	A ser determinado
TCCON	Rede de observação da coluna de carbono total
TE	Ecologia Terrestre
TEK	Conhecimento ecológico tradicional
TERN	Rede de Pesquisa de Ecossistemas Terrestres
TIR	Radiação infravermelha térmica

TIR	Sensor térmico de infravermelho
TmFOT	Observatório de Florestas Tropicais Gerenciadas
TRISHNA	Satélite de imagens por infravermelho térmico para avaliação de recursos naturais de alta resolução
TRL	Nível de prontidão tecnológica
TROLL	Representação de árvore do modelo de nível de paisagem
TROPOMI	Instrumento de monitoramento da troposfera
TRY	Banco de dados de características de plantas Plant
EUA	Estados Unidos da América
UAV	Veículo aéreo não tripulado
UCLA	Universidade da Califórnia, Los Angeles
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
UN-SDSN	Rede de Soluções para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas
USAID	Agência dos EUA para o Desenvolvimento Internacional
USDA	Departamento de Agricultura dos EUA
USFS	Serviço Florestal dos EUA
USGS	Serviço Geológico dos EUA
VEDA	Visualização, exploração e análise de dados
VIIRS	Conjunto de Radiômetros de Imagem no Infravermelho Visível
COV	Composto orgânico volátil
VOD	Profundidade óptica da vegetação
VPD	Déficit de pressão de vapor
VPRM	Modelo de fotossíntese e respiração da vegetação
VSWIR	Infravermelho visível a ondas curtas
WRI	World Resources Institute (Instituto de Recursos Mundiais)
WUE	Eficiência no uso da água

14 Apêndices

- A. Cartas de apoio
- B. Parceiros do PANGEA e atividades de engajamento
- C. Envolvimento durante o estudo de escopo
- D. Atividades de pesquisa e monitoramento planejadas e em andamento
- E. Tabela de medições detalhadas do PANGEA
- F. Respostas ao feedback
- G. Tópicos além do escopo do PANGEA

Tabelas de modelos

Tabela X. Legenda da tabela PANGEA.

Nota da tabela PANGEA.

TÍTULO DA TABELA C PANGEA Preenchimento padrão do título da coluna: 198/224/220	TÍTULO DA TABELA C PANGEA Preenchimento alternativo de subtítulo cinza: 210/210/210	TÍTULO DA TABELA C PANGEA REDUZIDO MANUALMENTE PARA 8 PT Preenchimento alternativo de título azul do mesmo tom do verde: 194/225/241
TÍTULO DA TABELA L PANGEA Preenchimento de cabeçalho de linha padrão: 227/240/249	Texto da tabela PANGEA Preenchimento cinza alternativo: 239/239/239	Texto da tabela PANGEA reduzido manualmente para 8 pt-as provavelmente terá que ser feito em alguns lugares.
TÍTULO DA TABELA L PANGEA	Texto da tabela PANGEA	Texto da tabela PANGEA
TÍTULO DA TABELA L PANGEA	• Tabela Bullet PANGEA	Texto da tabela PANGEA
TÍTULO DA TABELA L PANGEA	Texto da tabela PANGEA	Texto da tabela PANGEA
TÍTULO DA TABELA L PANGEA	Texto da tabela PANGEA	Texto da tabela PANGEA
TÍTULO DA TABELA L PANGEA	Texto da tabela PANGEA	Texto da tabela PANGEA
TÍTULO DA TABELA L PANGEA	Texto da tabela PANGEA	Texto da tabela PANGEA

Nota da tabela PANGEA.

<p>Caixa X. Título da caixa PANGEA Texto em caixa PANGEA. Preenchimento de caixa azul: 228/232/251.</p>
--

<p>Texto em caixa alta PANGEA. Preenchimento da caixa verde: 217/234/211.</p>
--

Tabela fictícia de célula única para conter a figura e a legenda (sem quadros):

Figura em Figura PANGEA Estilo do Word.

Figura X. Legenda no estilo do Word da PANGEA da legenda da figura (com o número da figura manualmente em negrito).

A. Cartas de apoio

Instituto Alexander von Humboldt (Instituto Humboldt);

<https://www.humboldt.org.co/>

Aliança Bioersity e Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT);

<https://alliancebioersityciat.org/>

Rede de torres de fluxo de covariância de Foucault da AmeriFlux-Americas;

<https://ameriflux.lbl.gov/>

Instituto de Tecnologia da Amazônia (AmIT); <https://amit.institute/>

Amazon Tall Tower Observatory (ATTO); <https://www.attoproject.org/>

AndesFlux-torres de fluxo operadas pela Pontifícia Universidade Católica do Peru (PUCP)

Airborne Research Facility for the Earth System (ARES);

<https://www.uzhfoundation.ch/en/projects/sustainability/ares-airborne-research-facility-for-the-earth-system-1>

Rede Nacional de Observatórios Ecológicos de Batelle (NEON);

<https://www.neonscience.org/>

Pesquisa de Biodiversidade do Cabo (BioSCape); <https://www.bioscape.io/>

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

Centro de Pesquisa Florestal Internacional e Agrofloresta Mundial (CIFOR-ICRAF);

<https://www.cifor-icraf.org/>

Centro de Estudos da Amazônia Sustentável (CEAS); <https://ceas.usp.br/>

Climate Modeling Alliance (CLiMA); <https://clima.caltech.edu/>

Iniciativa Científica da Bacia do Congo (CBSI); <https://congobasinscience.net/>

CongoFlux- torre de fluxo de covariância de eddy na Bacia do Congo - equipe da Universidade de Ghent; <https://www.congo-biogeochem.com/congoflux>

Programa de pesquisa de medição e amostragem das terras de turfa do CongoPeat;

<https://congopeat.net/>

Comunidade de modelagem de Demografia de Ecossistemas (ED2);

<https://github.com/EDmodel/ED2>

Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) Acre;

<https://www.embrapa.br/en/international>

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

Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais, Inc. (ESRI); <https://www.esri.com/en-us/home>

FLUXNET CH4 - Iniciativa para compilar um banco de dados global de medições de fluxo de metano por covariância de Foucault; <https://fluxnet.org/data/fluxnet-ch4-community-product/>

Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO); <https://www.fao.org/fao-office-climate-change-biodiversity-environment/en>

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

ForestPlots - rede para medir, monitorar e compreender as florestas do mundo ; <https://forestplots.net/>

Agência Gabonesa de Estudos e Observações Espaciais (AGEOS); <http://spaceinafrica.com/2019/02/26/all-about-ageos-gabon-space-program/>

Grupo de Observações da Terra - Árvores (GEO-TREES); <https://geo-trees.org/>

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

Força-Tarefa dos Governadores para o Clima e as Florestas (GCF-TF); <https://www.gcftf.org/>

Torre de covariância de Guyaflux-eddy na Estação de Campo de Paracou (Sinnamary, Guiana Francesa); <https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyaflux-tower>

Guyafor - rede de 54 parcelas de longo prazo em 17 locais na Guiana Francesa; <https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyafor-network>

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

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

Mancomunidad Regional Amazónica (MRA) - Comunidade Regional da Amazônia
Iniciativa

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

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

Centro Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica do Gabão (CENAREST); <https://www.cenarest-gabon.org/>

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

Observatório Nacional de Mudanças Climáticas, Camarões (ONACC); <https://onacc.cm/>

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

One Forest Vision Initiative (OFVi); <https://www.oneforestvision.org/>

Universidade Estadual da Pensilvânia, Departamento de Meteorologia e Ciências Atmosféricas; <https://www.met.psu.edu/>

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

Predictive Ecosystem Analyzer (PecAn); <https://pecanproject.github.io/>

Rainforest Foundation Norway; <https://www.regnskog.no/en/>

Reducing Uncertainties in Biogeochemical Interactions through Synthesis and Computation (RUBISCO) (Reduzindo incertezas em interações biogeoquímicas por meio de síntese e computação);

<https://climatemodeling.science.energy.gov/projects/reducing-uncertainty-biogeochemical-interactions-through-synthesis-and-computation-rubisco>

Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento, França (IRD); <https://en.ird.fr/>

Observatório de Satélite das Florestas da África Central (OSFAC);
<https://www.osfac.net/>

Sociedade para a Proteção de Redes Subterrâneas (SPUN); <https://www.spun.earth/>

Rede de Soluções para o Desenvolvimento Sustentável da ONU (UN-SDSN);
<https://www.unsdsn.org/>

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

Universidad Nacional del Altiplano (UNAP) Peru; <https://www.portal.unap.edu.pe/>

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

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

Université catholique de Louvain, Bélgica - Earth and Life Institute (Instituto Terra e Vida); <https://uclouvain.be/en/research-institutes/eli>

Universidade da Califórnia, Los Angeles (UCLA) Escritório do vice-reitor para atividades de pesquisa e criação; <https://www.research.ucla.edu/>

Universidade de Energia e Recursos Naturais (UENR) de Gana, Gabinete do Vice-Reitor; <https://uenr.edu.gh/>

Programa Internacional do Serviço Florestal dos EUA (USFS-IP);
<https://www.fs.usda.gov/about-agency/international-programs>

Rede de Fluxo da África Ocidental

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

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

World Resources Institute (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

NIT 820000142-2 Sede principal: Calle 28A #15-09 Bogotá DC, Colombia PBX: (57)(1) 320 2767 www.humboldt.org.co

Instituto Humboldt

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



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

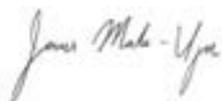
alliancebioversityciat.org/
www.cgiar.org

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,

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.

A blue ink signature of Eric G. Cosio, consisting of a stylized, cursive script.

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

A blue ink signature of Norma Salinas, consisting of a stylized, cursive script.

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.

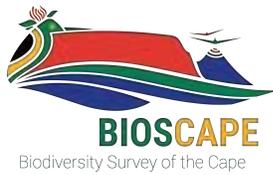
PANGEA will be crucial for assessing the resilience and vulnerability of tropical forests to climate change, and provide guiding data in biodiversity conservation, climate change adaptation, and mitigation.

Sincerely,



Paula Mabee, Ph.D.

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



BioSCAPE: The Biodiversity Survey of the Cape
% Adam Wilson
Department of Geography
University at Buffalo
Buffalo
NY, 14261, USA

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.

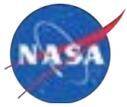
BioSCAPE was a huge success, and we hope to share the lessons we learned with PANGEA and support them in executing high-quality, inclusive international NASA science. Specifically, the BioSCAPE leadership team will support PANGEA by offering advice on:

- 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)



COLUMBIA UNIVERSITY
IN THE CITY OF NEW YORK

Center for Climate Systems Research,
Columbia University
NASA Goddard Institute for Space 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 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.

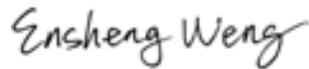
We foresee the synergistic activities and opportunities for collaboration between the land modeling group at GISS and PANGEA. Both projects aim at improving the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical 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 "E. Ubalijoro", written over a light blue horizontal line.

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. Braghiere
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

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

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

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

www.ugent.be

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

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



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





HARVARD

Faculty of Arts and Sciences

ORGANISMIC AND EVOLUTIONARY BIOLOGY

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

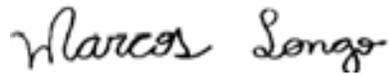
proposals to funding opportunities from the above US agencies that are related to PANGEA's overarching goals. We will also seek opportunities for contributing to capacity building and training of students on land-surface terrestrial ecosystem modeling, both within the US and in the tropics.

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



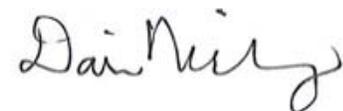
Paul R. Moorcroft
Harvard University
Professor of Organismic and Evolutionary Biology
Faculty Affiliate, Environmental Science and Engineering Program, Harvard University
Cambridge, MA 02138



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



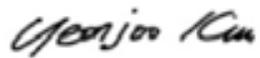
Abigail Swann
Professor
University of Washington
Department of Atmospheric and Climate Science
Seattle, WA 98195



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**.



Florestas

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 bioextrator 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 MORALES
Data: 04/12/2024 13:51:40-0300
Verifique em <https://validar.jti.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", written in a cursive style.

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



Robert B. Jackson, Douglas Provostial Professor
Department of Earth System Science
School of Earth, Energy & Environmental Sciences
Stanford, California 94305-4216

Phone: (650) 497-5841
Fax: (650) 498-5099
jacksonlab.stanford.edu

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,

Handwritten signature of Robert B. Jackson in black ink.

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

Handwritten signature of Alison M. Hoyt in black ink.

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



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.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

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.

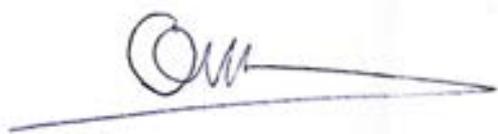
ForestPlots.net partner scientists are interested in diverse themes, such as tree mortality and its drivers, pan-tropical biodiversity and ecosystem function patterns and processes, and forest resilience to climate change. Our contributing networks are grounded in local partnerships, and especially active 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, consisting of a stylized 'O' followed by 'M' and a long horizontal line extending to the right.

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 collection 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 NDJOUNGUI
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 MapBiomass 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,



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



BOLIVIA Pando, Santa Cruz, Tarija | **BRAZIL** Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins | **COLOMBIA** Caquetá | **CÔTE D'IVOIRE** Bélier, Cavally | **ECUADOR** Pastaza, Morona Santiago, Zamora Chinchipe | **INDONESIA** Aceh, Central Kalimantan, East Kalimantan, North Kalimantan, Papua, West Kalimantan, West Papua | **MEXICO** Campeche, Chiapas, Jalisco, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Yucatán | **NIGERIA** Cross River State | **PERU** Amazonas, Huánuco, Loreto, Madre de Dios, Piura, San Martín, Ucayali | **SPAIN** Catalonia | **USA** California, Illinois

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.

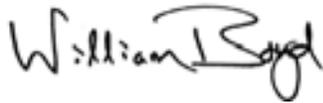
Established in 2009, the GCF Task Force is a unique coalition of 43 states and provinces from 11 countries working to establish and enhance jurisdiction-wide approaches to reducing deforestation and promoting sustainable land use. We work directly with the Governors, Secretaries, and civil servants in 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,

Handwritten signature of William Boyd in black ink.

William Boyd
Project Lead

Handwritten signature of Jason Gray in black ink.

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 that reads "D. Bonal". The signature is written in a cursive style and is underlined.

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', with a horizontal line striking through the middle of the letters.

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 PANGEA-related scientific and training activities.

We recognize the mutual benefits in coordinating with PANGEA 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 PANGEA campaign scoping team and hope that NASA's support of PANGEA 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 6336094
+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 6336094
+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.

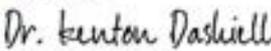
PANGEA initiative is led by the University of California, Los Angeles (UCLA) with which IITA has established an initiative named Congo Basin Institute (CBI) that aims to integrate the dual goals of biodiversity and forest conservation while improving local community livelihoods. Since 2015, CBI has developed 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:

4CB8BD4F06234C6...

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 está 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 MapBiomass 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 MapBiomass 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
MapBiomass 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,

A handwritten signature in blue ink that reads "Inbal Becker-Reshef".

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

21st 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,



Professor Alfred NGOMANDA



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

REPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR
LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

DIRECTION GENERALE

N° 000148 /L/ONACC/DG



REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland

NATIONAL OBSERVATORY
ON CLIMATE CHANGE

DIRECTORATE GENERAL

Yaoundé, le 26 NOV 2024

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.

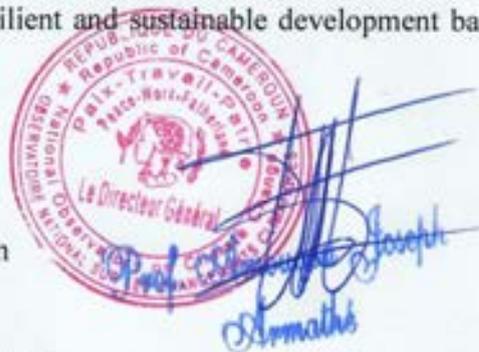
We see an opportunity for PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities in the tropics to further our goals, such as desired collaboration to enhance fire risk monitoring capabilities and develop fire monitoring tools to guide farmer land-use practices to support low-emissions agriculture, 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

One Cyclotron Road / Berkeley, California 94720 / phone 510-486-4000

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', with a long horizontal flourish extending to the right.

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 (PANGAEA)**

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 (PANGAEA). 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. PANGAEA 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 PANGAEA, in particular in the measurement and monitoring of forest composition, structure and biogeochemical cycling. We are keen to support PANGAEA 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



PennState

**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

Dr. Elsa Ordway
Department of Ecology and Evolutionary Biology
University of California, Los Angeles
410K Botany Building, Los Angeles, CA, 90095

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,



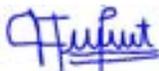
Erica Smithwick

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,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Michael C. Dietze". The signature is fluid and cursive, with the first name "Michael" being the most prominent part.

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 me at your earliest convenience.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Forrest Hoffman". The signature is written in a cursive style with a large, stylized initial "F".

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)

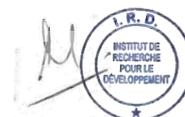
Dear Dr. Ordway,

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 MAVE

Society for the Protection of Underground Networks

3500 South DuPont Highway, Suite EI-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.



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



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

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.

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 Vicerectorado 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 Gaban, Sandia 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. Ariel Rogelio Velazco 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 Mendoza 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

UNIVERSIDAD LICENCIADA: Resolución de Consejo Directivo N° 033-2017-SUNEDU/CD.





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 Maicelo Quirana Ph.D.
Rector

JLMQ/Rector
C.c. Archivo

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. JOSÉ REMIGIO ARGÜELLO 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 written in a cursive style with a large, stylized 'R' and 'W'.

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:





Forest Service
U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE

INTERNATIONAL PROGRAMS | OFFICE OF THE CHIEF



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
Mezainis**

Digitally signed
by Valdis Mezainis
Date: 2024.11.22
08:30:34 -05'00'

Val Mezainis, PhD



Forest Service
U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE

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 (PANGAEA)

Dear Dr. Ordway,

This is to express my strong support for the proposed NASA PANGAEA (**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. PANGAEA 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, PANGAEA 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.



Ossénatou MAMADOU, PhD
Associate Professor, IMSP/UAC
Leader of the WAF-Net (West Africa Flux 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 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 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



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 blue 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,



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.

Dr. Fred Stolle
Director Innovation & Partnership GFW/LCL
World Resources Institute
10 G street, NE, Suite 800, Washington DC, 20002,

B. Parceiros do PANGEA e atividades de engajamento

Tabela B-1. Visão geral das estratégias de engajamento e exemplos de parceiros para cada grupo-alvo

COMUNIDADE	DESCRIÇÃO	RELEVÂNCIA PARA O PANGEA	ESTRATÉGIA E METAS DE ENGAJAMENTO	EXEMPLO DE PARCEIROS
NASA	Programas de Pesquisa e Análise e Ação Terrestre da NASA, Programa de Capacitação da NASA e iniciativas da NASA	A NASA é a força motriz por trás do PANGEA	Avançar a compreensão científica, a calibração e a validação, o desenvolvimento de algoritmos e produtos, as parcerias e a capacitação em toda a empresa da NASA por meio de uma abordagem integradora.	<ul style="list-style-type: none"> • Ecologia Terrestre, Diversidade Biológica e Conservação Ecológica, Mudanças na Cobertura e Uso da Terra (LCLUC) da NASA, Hidrologia • Sistema de monitoramento de carbono, Clima e resiliência, Desastres, Incêndios florestais, Colheita da NASA, Recursos hídricos • SERVIR, ARSET, DEVELOP, GLOBE, Iniciativa dos Povos Indígenas
OUTRAS AGÊNCIAS DO GOVERNO DOS EUA	Agências federais de pesquisa e desenvolvimento dos EUA que não são da NASA	Muitos órgãos do governo dos EUA apoiam esforços de pesquisa e treinamento que se alinham diretamente com o PANGEA	Coordenar com os gerentes de programa para identificar oportunidades de solicitações entre agências em que as atividades de pesquisa e aplicativos sejam mutuamente benéficas.	<ul style="list-style-type: none"> • DOE NGEE-Tropics* • NSF BIO, GEO, SBE, GOLD-EN, RISE • USAID CARPE, USAID-PEER** • USFS - Programa Internacional • USGS SilvaCarbon
AGÊNCIAS ESPACIAIS INTERNACIONAIS E INSTALAÇÕES DE APOIO	Agências espaciais não pertencentes à NASA e institutos federais que apoiam o monitoramento de satélites e a capacidade técnica.	Esses parceiros colaboram ativamente com a NASA em muitas missões de satélite e campanhas aéreas. O PANGEA é uma oportunidade de fortalecer e expandir essas parcerias.	Apoiar a colaboração internacional em missões conjuntas e campanhas aéreas existentes; desenvolver a capacidade de apoiar um maior envolvimento entre a NASA e as agências espaciais nos trópicos.	<ul style="list-style-type: none"> • Observatório de Satélite das Florestas da África Central (OSFAC) • Agência Espacial Gabonesa (AGEOS) • Agência Espacial Europeia (ESA) • Agência Espacial Nacional Francesa (CNES) • Centro Aeroespacial Alemão (DLR) • Organização de Pesquisa Espacial Indiana (ISRO) • Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) do Brasil • Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA)

COMUNIDADE	DESCRIÇÃO	RELEVÂNCIA PARA O PANGEA	ESTRATÉGIA E METAS DE ENGAJAMENTO	EXEMPLO DE PARCEIROS
AGÊNCIAS GOVERNAMENTAIS ESTRANGEIRAS E INSTITUTOS NACIONAIS DE PESQUISA	Ministérios setoriais nacionais e locais; instituições geoespaciais especializadas; plataformas de múltiplas partes interessadas lideradas pelo governo	Esses parceiros tomam medidas em larga escala (planejamento e modelagem econômica e ambiental, aplicação da lei, investimento em pesquisa, etc.) e apoiam dados e análises de longo prazo (por exemplo, clima).	Informar as questões e atividades científicas do PANGEA por meio de instituições de pesquisa; estabelecer condições favoráveis (institucionais, financeiras e programáticas) para a apropriação dos resultados de pesquisa do PANGEA; capacitação da equipe em nível nacional e local.	<ul style="list-style-type: none"> • Brasil Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) • Observatório Nacional de Mudanças Climáticas de Camarões (ONACC) • Parceria Florestal da Bacia do Congo (CBFP) • Centro Nacional de Pesquisa Científica e Tecnológica do Gabão (CENAREST) • Força-Tarefa dos Governadores para o Clima e as Florestas (GCF-TF) • Ministérios do Meio Ambiente, Florestas, Fauna, Agricultura e Pesquisa Científica • Mancomunidad Regional Amazónica do Peru • Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)
INSTITUIÇÕES CIENTÍFICAS	Universidades e faculdades; laboratórios nacionais; institutos de pesquisa	Esses parceiros facilitam a transferência de conhecimento e tecnologia para gerar capacidade nas instituições locais e regionais para treinar a próxima geração de cientistas	Co-desenvolverá pesquisas, análises e aplicativos com esses parceiros e fortalecerá a capacidade de pesquisa local, apoiando o gerenciamento de dados, o desenvolvimento de infraestrutura e o treinamento de pesquisadores em início de carreira em instituições locais e regionais.	<ul style="list-style-type: none"> • Instituto de Pesquisa de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt • Aliança Bioversity International e CIAT • Instituto de Tecnologia da Amazônia (AmIT) • Instituto da Bacia do Congo (CBI) • Instituto Nacional de Pesquisa da França para Agricultura, Alimentação e Meio Ambiente (INRAE) • Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA) • K. Lisa Yang Center for Conservation Bioacoustics (Centro de Bioacústica de Conservação) • LBA • Pontifícia Universidade Católica do Peru (PUCP) • Centro de Pesquisas Climáticas Woodwell

COMUNIDADE	DESCRIÇÃO	RELEVÂNCIA PARA O PANGEA	ESTRATÉGIA E METAS DE ENGAJAMENTO	EXEMPLO DE PARCEIROS
INICIATIVAS COORDENADAS DE PESQUISA INTERNACIONAL	Consórcios de pesquisa; redes; redes de redes	Esses parceiros trabalham em grandes escalas que se alinham aos objetivos transdisciplinares e pantropicais do PANGEA.	Alinhar esforços com esses parceiros para garantir que as atividades do PANGEA preencham estrategicamente as lacunas necessárias em vez de duplicar esforços.	<ul style="list-style-type: none"> • Aliança para a Ciência das Florestas Tropicais (ATFS) • AndesFlux • ASCEND • Iniciativa Científica da Bacia do Congo (CBSI) • CongoFlux • Redes regionais FLUXNET (por exemplo, AmeriFlux, ICOS, AsiaFlux) • GEO-TREES • Guyafor • Guyaflux • Iniciativa One Forest Vision (OFVi) • Rede de Fluxo da África Ocidental
ORGANIZAÇÕES DA SOCIEDADE CIVIL	Organizações não governamentais (ONGs) nacionais e internacionais e iniciativas de pesquisa não governamentais com presença nos países-alvo	Esses parceiros facilitam a consolidação do conhecimento sobre carbono, biodiversidade e sistemas socioecológicos; traduzem os resultados da pesquisa em campanhas e ações contínuas lideradas por OSCs	Coproduzir aplicativos que aproveitem os avanços científicos e técnicos do PANGEA.	<ul style="list-style-type: none"> • Conservação Internacional • CTrees • World Resources Institute (incluindo Global Forest Watch e Land and Carbon Lab) • MapBiomass • Organização de Conservação de Pequenos Mamíferos
POVOS INDÍGENAS E ALIANÇAS E ORGANIZAÇÕES DE COMUNIDADES LOCAIS	Organizações e alianças lideradas por povos indígenas, comunidades locais e mulheres ativas nos países-alvo	Esses parceiros estão conectados a comunidades, líderes e parceiros relevantes nos países-alvo	Co-projetar questões e aplicações científicas que afetem diretamente os IPLCs, as mulheres e outros grupos; co-projetar atividades de campanhas de campo terrestres e aéreas em territórios e comunidades locais; fornecer treinamento para capacitar os IPLCs na coleta de dados, pesquisa e comunicação.	<ul style="list-style-type: none"> • Aliança Global de Comunidades Territoriais • Iniciativa de direitos e recursos • CBI School for Indigenous and Local Knowledge (SILK) • Grupo Dinâmico de Grupos de Povos Autochtones (DGPA-DRC)

COMUNIDADE	DESCRIÇÃO	RELEVÂNCIA PARA O PANGEA	ESTRATÉGIA E METAS DE ENGAJAMENTO	EXEMPLO DE PARCEIROS
COMUNIDADE DE DOADORES	Doadores clássicos (bilaterais, fundações familiares, organizações filantrópicas) Agências especializadas (geoespaciais) de países doadores	Esses parceiros levantam fundos complementares que oferecem apoio direcionado para estender o PANGEA além do apoio financeiro da NASA.	Alvo de investimento em aplicativos PANGEA e desenvolvimento de produtos, apoio a colaboradores internacionais, workshops conjuntos e desenvolvimento de ferramentas de coleta e gerenciamento de dados do IPLC	<ul style="list-style-type: none"> • Fundo Bezos Earth • Fundação Ford • Doadores individuais • Fundação Mellon • Fundação Moore • Agência Norueguesa de Cooperação para o Desenvolvimento (Norad) • Iniciativa Internacional da Noruega para o Clima e as Florestas (NICFI)
SETOR PRIVADO	Agronegócios, indústrias extrativas, empresas de energia, empresas de big data, instituições de investimento e empresas de ecoturismo	Esses parceiros são importantes tomadores de ação e de decisão com impacto de longo alcance.	Trabalhar em estreita colaboração com a NASA e os parceiros de aplicativos para determinar as estratégias mais adequadas para o envolvimento com o setor privado em vários resultados de aplicativos.	<ul style="list-style-type: none"> • Mesa redonda sobre óleo de palma sustentável, cacau, soja e biomateriais • Unilever • Olam • Recursos verdes • CNaught • Equidade de carbono • Capital de crédito de carbono
AGÊNCIAS INTERGOVERNAMENTAIS	Organizações compostas por vários governos soberanos que colaboram para tratar de problemas comuns, desenvolver políticas e coordenar ações em escala regional ou global	Esses parceiros fornecem avaliações confiáveis e com base científica que informam as decisões políticas globais e orientam os esforços internacionais para combater as mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável e um planeta resiliente.	Manter-se atualizado sobre os relatórios e atividades de avaliação para garantir que os resultados científicos e aplicativos do PANGEA possam ser utilizados de forma eficaz.	<ul style="list-style-type: none"> • Comitê de Satélites de Observação da Terra (CEOS) • Grupo de Observações da Terra (GEO) • Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) • Plataforma Intergovernamental de Políticas Científicas sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES) • União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN) • Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)

* O DOE Ngee-Tropics está entrando na Fase 3 e será encerrado com o início do PANGEA, permitindo uma continuidade importante na restrição da incerteza do modelo e nos esforços de integração do modelo de dados.

** O USAID PEER será substituído por um novo programa chamado SPARK.

C. Envolvimento durante o estudo de escopo

A Campanha de Definição do Escopo do PANGEA foi um esforço colaborativo que envolveu mais de 800 pessoas de 396 instituições de mais de 60 países em 5 continentes (**Tabela C-1**) por meio de (1) grupos de trabalho internacionais, (2) eventos curtos de compartilhamento de informações, (3) workshops consultivos de vários dias e (4) reuniões bilaterais com possíveis parceiros. O esforço de definição do escopo do PANGEA começou em novembro de 2023, com um webinar inicial. As atividades que se seguiram em 2024 estão descritas abaixo.

Grupos de trabalho internacionais

Mais de 200 pessoas participaram de pelo menos uma das mais de 60 sessões da Reunião do Grupo de Trabalho do PANGEA, virtualmente organizadas pelos Co-Líderes do Grupo de Trabalho. No início da campanha de definição do escopo, sete grupos de trabalho diferentes solicitaram contribuições da comunidade científica e da comunidade em geral:

- Feedbacks e interações climáticas: 158 compromissos
- Ciclos Biogeoquímicos e Dinâmica do Carbono: 155 compromissos
- Estrutura, função e biodiversidade do ecossistema: 101 compromissos
- Sistemas socioecológicos: 91 compromissos
- Modelagem e síntese de dados: 141 compromissos
- Envolvimento da comunidade e aplicativos de pesquisa: 110 compromissos
- Viabilidade: 79 compromissos

Os compromissos são definidos para registrar a presença exclusiva de um participante em uma única reunião do Grupo de Trabalho. Por exemplo, três participantes únicos na mesma reunião ou um participante único em três reuniões consecutivas têm o mesmo peso que 3 compromissos. Portanto, essa definição captura uma ampla gama de interações com os participantes do grupo de trabalho que representa melhor a combinação de contribuições on-line e off-line para o desenvolvimento dos temas e objetivos do grupo de trabalho.

O grupo de trabalho CERA (Community Engagement and Research Applications, Aplicativos de Pesquisa e Envolvimento Comunitário) era composto principalmente por estudantes, pesquisadores e professores de instituições acadêmicas, profissionais de organizações não governamentais e intergovernamentais e alguns representantes do setor privado. Da mesma forma que os outros grupos de trabalho do PANGEA, a participação no CERA foi aberta e anunciada on-line, em eventos do PANGEA e por "boca a boca". Aproximadamente 100 pessoas se inscreveram no grupo de trabalho da CERA e participaram de uma ou mais das 12 reuniões da CERA realizadas on-line e/ou contribuíram para os documentos colaborativos da equipe. Muitos membros também participaram de sessões relevantes para a CERA nos workshops de vários dias do PANGEA em Camarões, EUA, Brasil e Peru.

Eventos de compartilhamento de informações

A Equipe de Liderança do PANGEA se envolveu com centenas de pessoas por meio de doze eventos de compartilhamento de informações realizados em cinco continentes. Esses eventos incluíram de 1 -a

2- horas de apresentação e sessões de discussão em conferências acadêmicas internacionais, webinars, eventos regionais e reuniões especiais organizadas pela comunidade do PANGEA.

O envolvimento das comunidades indígenas no processo de definição do escopo para discutir a ciência coproduzida, a soberania dos dados, os interesses no treinamento e os aspectos importantes do processo foi uma parte importante do processo de definição do escopo do PANGEA. Como os países específicos que serão o foco do PANGEA não serão determinados até o desenvolvimento do Plano de Experimentos Conciso, o envolvimento inicial se concentrou em organizações de fronteira, alianças e líderes comunitários. Uma das principais organizações envolvidas na definição do escopo do PANGEA foi a Aliança Global de Comunidades Territoriais. Foram realizadas reuniões regulares com a liderança da GATC, incluindo líderes dos movimentos de mulheres e jovens dentro da GATC. Essas reuniões sempre foram realizadas com interpretação e os documentos e e-mails foram compartilhados em inglês, francês, espanhol, português e brasileiro. Uma reunião presencial foi realizada na COP16 com vários membros do GATC para discutir melhor o PANGEA e identificar as próximas etapas apropriadas caso o PANGEA seja selecionado. Uma reunião de acompanhamento será realizada em janeiro para analisar o ano de definição do escopo com a liderança do GATC. Também foram realizadas reuniões com a Rights and Resources Initiative (RRI), cujo trabalho se concentra em capacitar e envolver os povos indígenas, os povos afrodescendentes, as comunidades locais e as mulheres dessas comunidades. Além disso, o PANGEA realizou um Workshop com Comunidades Indígenas no Panamá, que reuniu 12 participantes e representantes dos territórios Embera, Wounaan e Guna no Smithsonian Tropical Research Institute em 26 de abril de 2024. A reunião híbrida presencial e on-line foi co-organizada virtualmente pela Equipe de Liderança do PANGEA e contou com a presença de 10 participantes adicionais do Zoom de 7 países. Se o PANGEA for selecionado, haverá, sem dúvida, mais comunidades com as quais se envolver nos cenários do PANGEA. No entanto, este trabalho estabelece a base a partir da qual essas parcerias poderão florescer.

Lista de eventos de compartilhamento de informações:

- **Prefeituras, apresentações e simpósios presenciais em conferências:**
 - American Geophysical Union (AGU) 2023 e 2024 (em breve) - São Francisco, CA, e Washington DC
 - Associação para Biologia Tropical e Conservação (ATBC) - Kigali, Ruanda, julho de 2024
 - Apresentação da 20ª Reunião das Partes da Parceria Florestal da Bacia do Congo (CBFP) - Kinshasa, República Democrática do Congo (junho de 2024)
 - Sociedade Ecológica da América (ESA) - Long Beach, CA
 - União Geofísica Europeia (EGU) - Viena, Áustria (abril de 2024)
 - Programa Global de Terras (GLP) (a ser lançado em 5 de novembro de 2024) - Oaxaca, México
 - União Internacional de Organizações de Pesquisa Florestal (IUFRO) - Estocolmo, Suécia
 - Reunião sobre Diversidade Biológica e Conservação Ecológica da NASA em Maryland, maio de 2024
 - Instituto de Pesquisa Tropical Smithsonian, Simpósio do 100º Aniversário da Ilha Barro Colorado (BCI 100) - Gamboa, Panamá (junho de 2024)
- **Prefeituras virtuais:**

- PANGEA - prefeituras abertas a todos
- PANGEA - prefeituras específicas do grupo de trabalho
- Prefeitura on-line da ESA (março de 2024)
- **Workshops menores:**
 - Sessão virtual de mulheres da África para destacar pesquisas lideradas por mulheres na África Central (abril de 2024)
 - Reunião com comunidades indígenas no Panamá (abril de 2024)
 - Reunião do SBG Collab com parceiros indígenas e comunitários (junho de 2024)
 - Semana dos Mamologistas Negros com cientistas negros (setembro de 2024)
 - Reuniões regulares com a liderança da Aliança Global de Comunidades Territoriais (GATC) (julho a novembro de 2024)
- **Reuniões da equipe científica da NASA:**
 - ECOSTRESS
 - EMIT
 - GEDI
 - OCO
 - SBG
 - SMAP

Workshops consultivos de vários dias

A Equipe de Liderança do PANGEA organizou quatro workshops regionais de escopo de vários dias que incluíram sessões focadas nas práticas recomendadas de envolvimento da comunidade e na demanda e preferências regionais para aplicações de pesquisa. Os workshops de definição de escopo do PANGEA incluem um evento de três dias em Yaoundé, Camarões, em fevereiro de 2024; um evento de três dias em Washington, DC, em abril de 2024; um workshop de três dias em Manaus, Brasil, em maio de 2024; e um workshop de dois dias em Lima, Peru. Todos os eventos foram organizados em estreita colaboração com parceiros locais do PANGEA, representando a comunidade acadêmica, órgãos governamentais e organizações não governamentais. As atividades do workshop contaram com a presença de 263 participantes presenciais de 30 países nas consultas regionais realizadas em Camarões (90), Washington DC (103), Panamá (10) e Lima (60). Quando o equipamento e a agenda permitiram, esses eventos interativos foram estendidos a um público virtual mais amplo, com o envolvimento de 362 participantes virtuais adicionais de 33 países nas consultas regionais em Camarões (54), Washington DC (298) e Panamá (10). Todos os eventos, exceto o workshop em Manaus, no Brasil, contaram com serviços de interpretação para acomodar pessoas que não falam inglês.

O Workshop de Camarões, realizado nos dias 21 e 22 de fevereiro de 2024, no Hotel Mont Fébé, contou com a participação de 90 participantes de 16 países que compareceram ao evento co-organizado com o CIFOR, o IITA e a Universidade local de Yaoundé. As sessões híbridas foram acompanhadas por 54 participantes adicionais do Zoom. O workshop de DC, realizado de 9 a 11 de abril de 2024, na sede da AGU, contou com a presença de 103 participantes de 16 países. O workshop totalmente híbrido incluiu o diálogo e a participação de 297 participantes do Zoom durante os três dias do evento. O workshop de Lima, realizado de 3 a 4 de junho de 2024, no Centro Cultural

da PUCP, contou com a presença de 60 participantes de 8 países. O workshop de Lima foi realizado em parceria com a Força-Tarefa dos Governadores para o Clima e as Florestas (GCF-TF) e foi uma oportunidade importante para que cientistas e formuladores de políticas participassem do workshop de forma praticamente igualitária. Governadores do Peru, da Colômbia, da Bolívia, do Brasil e do Equador estiveram presentes na reunião, que forneceu informações valiosas sobre o potencial dos resultados do PANGEA na Amazônia.

Lista de workshops consultivos de vários dias do PANGEA:

- Workshop de 3 dias da Consulta Regional da África, Yaoundé, Camarões, fevereiro de 2024
- Workshop de 3 dias sobre o escopo do PANGEA, Washington, DC, abril de 2024
- Workshop de 4 dias sobre o clima da Amazônia, Manaus, Brasil, maio de 2024
- PANGEA/Governors' Climate & Forests Task Force (GCFTF) Workshop regional americano de 2 dias em Lima, Peru, junho de 2024
- Consulta regional da Ásia por meio da participação no workshop SERVIR de 3 dias, Bangkok, Tailândia, julho de 2024

Reuniões bilaterais com possíveis parceiros do PANGEA

A Equipe de Liderança do PANGEA e os membros do grupo de trabalho da CERA realizaram reuniões bilaterais com centenas de possíveis parceiros do PANGEA, incluindo agências federais dos EUA, a Agência Espacial Europeia, a SERVIR, empresas privadas, institutos de pesquisa dos EUA e internacionais, organizações de conservação, ministérios do governo e outros. As organizações e instituições estão listadas na **Tabela C-1**. Muitos parceiros (n=58) compartilharam cartas de apoio para confirmar seu interesse em colaborar com o programa PANGEA (se financiado).

Tabela C-1. Todas as organizações e instituições envolvidas no processo de definição do escopo do PANGEA.

CSO: Organização da Sociedade Civil

#	ORGANIZAÇÃO/INSTITUIÇÃO	TIPO
1	Universidade de Aarhus (Dinamarca)	Universidade
2	ACCA: Conservação da Amazônia (Peru)	CSO
3	ADC: Associação Ação para o Desenvolvimento Comunitário (Camarões)	CSO
4	ADPC: Centro Asiático de Preparação para Desastres	CSO
5	Rede Ambiental Africana	CSO
6	AGEOS: Agência de Estudos e Observações Espaciais (Gabão)	Governo
7	AGU: União Geofísica Americana	Sociedade
8	Universidade Akamai	Universidade
9	Universidade de Akdeniz (Turquia)	Universidade
10	Alliance Biodiversity - CIAT: Aliança da Bioversity International e do Centro Internacional de Agricultura Tropical (Itália)	CSO
11	AmlT: Instituto de Tecnologia da Amazônia (Brasil)	CSO
12	Anawakalmekak	Escola K-12
13	ANI: Africa Nature Investor Foundation (Nigéria)	Doador
14	Conexão Arbimon/Rainforest	CSO
15	ARES: Instalação de Pesquisa Aérea para o Sistema Terrestre	Universidade
16	ASU: Universidade Estadual do Arizona	Universidade
17	ATBC: Associação para Biologia Tropical e Conservação	Sociedade

#	ORGANIZAÇÃO/INSTITUIÇÃO	TIPO
18	BAERI: Instituto de Pesquisa Ambiental da Área da Baía	CSO
19	Fundo Bezos Earth	Doador
20	BHI: Centro Internacional de Biodiversidade	CSO
21	Mamíferos negros	CSO
22	Universidade de Boston	Universidade
23	Caltech: Instituto de Tecnologia da Califórnia	Universidade
24	Universidade Calvin	Universidade
25	Ministério do Meio Ambiente de Camarões	Governo
26	CAPC-AC: Centro de Previsão e Aplicação do Clima da África Central (União Africana)	Multilateral
27	Carboneers (Holanda)	Pesquisa
28	Carnegie Institution for Science	CSO
29	Instituto Cary de Estudos de Ecossistemas	CSO
30	CBCS: Sociedade de Conservação da Bacia do Congo (República Democrática do Congo)	CSO
31	CBD: Convenção sobre Diversidade Biológica	Multilateral
32	CBFP: Parceria Florestal da Bacia do Congo	Multilateral
33	CBI: Instituto da Bacia do Congo	Multilateral
34	CBSI: Iniciativa Científica da Bacia do Congo	Multilateral
35	CEAS: Centro de Estudos da Amazônia Sustentável	CSO
36	CEEAC: Comunidade Econômica dos Estados da África Central (União Africana)	Multilateral
37	CENAREST: Centro Nacional de Pesquisa Científica e Tecnologia (Gabão)	Governo
38	CEW: Cameroon Environmental Watch (Camarões)	CSO
39	CGIAR: Grupo Consultivo para Pesquisa Agrícola Internacional	CSO
40	Universidade Chapman	Universidade
41	CI: Conservation International (Conservação Internacional)	CSO
42	CICERO: Centro Internacional de Pesquisa Climática e Ambiental de Oslo (Noruega)	CSO
43	CIFOR-ICRAF: Centro Internacional de Pesquisa Florestal e Agrofloresta Mundial	CSO
44	CIRAD: Centro de Pesquisa Agrícola para o Desenvolvimento Internacional (França)	CSO
45	CIRES: Instituto Cooperativo de Pesquisa em Ciências Ambientais	CSO
46	CIRMF: Centro Internacional de Pesquisas Médicas de Franceville	CSO
47	Clock climático RDC (República Democrática do Congo)	CSO
48	Foco no clima	Setor privado
49	CMEC: Recursos de avaliação de modelos coordenados	CSO
50	CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Brasil)	Governo
51	CoEB: Centro de Excelência em Biodiversidade e Gestão de Recursos Naturais (Ruanda)	CSO
52	Faculdade de William e Mary	Universidade
53	Universidade de Columbia	Universidade
54	COMIFAC: Comissão Florestal da África Central	Multilateral
55	Congolese Action For Nature (República Democrática do Congo)	CSO
56	Cordon Grande Forest Ejido (México)	CSO
57	Universidade de Cornell	Universidade
58	CRDPI: Centro de Pesquisa sobre Produtividade e Sustentabilidade de Plantações Industriais (República do Congo)	CSO
59	CSU: Universidade Estadual do Colorado	Universidade
60	CTrees	CSO
61	CUNY: Universidade da Cidade de Nova York	Universidade

#	ORGANIZAÇÃO/INSTITUIÇÃO	TIPO
62	Universidade Denis Sassou Nguesso (República do Congo)	Universidade
63	DOE: Departamento de Energia dos EUA	Governo
64	Universidade de Duke	Universidade
65	Universidade da Carolina do Leste	Universidade
66	Eco-Consult	Setor privado
67	EcoAgricultura	CSO
68	Marca Ecobed Biotech	Setor privado
69	EDA: Ativar a ação de desativação	CSO
70	EEZA: Estação Experimental de Zonas Áridas (Espanha)	CSO
71	EGU: União Geofísica Europeia	Sociedade
72	Embrapa: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Brasil)	Governo
73	Universidade Emory	Universidade
74	ENEF-Gabão: Escola Nacional de Água e Florestas do Gabão (Gabão)	Governo
75	ERAIFT: Escola Regional de Treinamento de Pós-Graduação em Gestão Integrada de Florestas Tropicais e Terras (República Democrática do Congo)	Universidade
76	ESA: Sociedade Ecológica da América	Sociedade
77	ESA: Agência Espacial Europeia	Governo
78	ESRI: Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais, Inc.	Setor privado
79	ETH Zurique: Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (Suíça)	Universidade
80	FAP: Força Aérea Peruana (Peru)	Governo
81	FAPEAM: Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas (Brasil)	Governo
82	FAPESP: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Brasil)	Governo
83	FAPESPA: Fundação de Pesquisa do Pará (Brasil)	Governo
84	Primeira Universidade Técnica, Ibadan (Nigéria)	Universidade
85	Universidade Atlântica da Flórida	Universidade
86	Universidade Estadual da Flórida	Universidade
87	Fundação Eboko	CSO
88	ForestGEO	CSO
89	ForestPlots.net	CSO
90	FRMi: Forest Resources Management, Inc.: Gestão de Recursos Florestais, Inc.	Setor privado
91	FSC: Forest Stewardship Council (Conselho de Manejo Florestal)	CSO
92	FUPRO: Organização nacional de produtores de caju (Benin)	CSO
93	GADD: Grupo de Apoio ao Desenvolvimento Sustentável (Camarões)	CSO
94	GATC: Aliança Global de Comunidades Territoriais	Multilateral
95	GCF-TF: Força-Tarefa dos Governadores para o Clima e as Florestas	Multilateral
96	GEO-TREES	Multilateral
97	GEOGLAM: Iniciativa de Monitoramento Agrícola Global do Grupo de Observações da Terra	CSO
98	Geoindigena	CSO
99	Universidade George Mason	Universidade
100	Instituto de Tecnologia da Geórgia	Universidade
101	GFZ-Potsdam: Centro Alemão de Pesquisa em Geociências	Universidade
102	Universidade de Ghent (Bélgica)	Universidade
103	GLP: Programa Global de Terras	Sociedade
104	Google	Setor privado
105	Guna	CSO

#	ORGANIZAÇÃO/INSTITUIÇÃO	TIPO
106	Universidade de Harvard	Universidade
107	HMEI: Instituto Ambiental de Princeton High Meadows	Universidade
108	Universidade de Howard	Universidade
109	IBAY-SUP: Instituto Superior de Ciências Ambientais	Universidade
110	ICOS: Sistema Integrado de Observação de Carbono	Multilateral
111	IFA-Yangambi: Instituto de Ciências Agrônomicas de Yangambi	CSO
112	IIAP: Instituto de Pesquisa da Amazônia Peruana (Peru)	CSO
113	IITA: Instituto Internacional de Agricultura Tropical	CSO
114	ILAMB: Benchmarking Internacional de Modelos de Terras	CSO
115	INDEFOR-AP: Instituto Nacional de Desenvolvimento Florestal e Gestão do Sistema de Áreas Protegidas, Guiné Equatorial	Governo
116	Índia Centro Nacional de Ciências Biológicas	Governo
117	INPA: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Brasil)	Governo
118	INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Brasil)	Governo
119	INRAE: Instituto Nacional de Pesquisa para Agricultura, Alimentação e Meio Ambiente (França)	Governo
120	INRS: Instituto Nacional de Pesquisa Científica (Canadá)	Universidade
121	Instituto Araguaia	CSO
122	Instituto Humboldt: Instituto de Pesquisa de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt	CSO
123	IPAM: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (Brasil)	CSO
124	IPBES: Plataforma Intergovernamental de Políticas Científicas sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos	Multilateral
125	IPCC: Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas	Multilateral
126	IRAD: Instituto de Pesquisa Agrícola para o Desenvolvimento (Camarões)	Governo
127	IRCCB: Centro Internacional de Referência Chantal Biya (Camarões)	CSO
128	IRD: Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento (França)	Governo
129	IRIC: Instituto de Relações Internacionais de Camarões	CSO
130	ISDR: Instituto Superior de Desenvolvimento Rural de M'Baïki (República Centro-Africana)	CSO
131	ISEA-Bengamisa: Instituto Superior de Estudos Agrônomicos de Bengamisa (República Democrática do Congo)	CSO
132	ISP-Gemena: Instituto Superior de Educação de Gemena (República Democrática do Congo)	CSO
133	ISTA: Instituto Superior de Técnicas Aplicadas (República Democrática do Congo)	CSO
134	IUCN: União Internacional para a Conservação da Natureza	Multilateral
135	Universidade James Cook (Austrália)	Universidade
136	Instituto de Tecnologia de Karlsruhe (Alemanha)	Universidade
137	KU Leuven: Universidade Católica de Leuven (Bélgica)	Universidade
138	Universidade Estadual de Kwara (Nigéria)	Universidade
139	Labosystem s.r.l. (Itália)	Setor privado
140	LANL: Laboratório Nacional de Los Alamos	Governo
141	LBNL: Laboratório Nacional Lawrence Berkeley	Governo
142	LCRP: Liberia Chimpanzee Rescue and Protection (Libéria)	CSO
143	Universidade de Leiden (Holanda)	Universidade
144	Universidade de Leipzig (Alemanha)	Universidade
145	Universidade de Lund (Suécia)	Universidade
146	Universidade de Makererere (Uganda)	Universidade
147	Mancomunidata Regional Amazonica	governo
148	MapBiomass (Brasil)	CSO

#	ORGANIZAÇÃO/INSTITUIÇÃO	TIPO
149	Universidade Marien Ngouabi (República do Congo)	Universidade
150	Universidade Marymount	Universidade
151	Instituto Max Planck (Alemanha)	CSO
152	Universidade McGill (Canadá)	Universidade
153	Universidade de Mendel	Universidade
154	Universidade Estadual de Michigan	Universidade
155	MINRESI: Ministério de Pesquisa Científica e Inovação de Camarões	Governo
156	MIT: Instituto de Tecnologia de Massachusetts	Universidade
157	Instituto Mora (México)	CSO
158	Universidade Estadual Morgan	Universidade
159	MoveBank	Multilateral
160	Universidade Estadual de Murray	Universidade
161	Muteesa I Royal University (Uganda)	Universidade
162	Centro de Pesquisa Ames da NASA	Governo
163	NASA Earth Action	Governo
164	Equipe científica do ECOSTRESS da NASA	Multilateral
165	NASA GISS: Instituto Goddard de Estudos Espaciais	Governo
166	Equipe científica da NASA para a Investigação da Dinâmica do Ecossistema Global (GEDI)	Multilateral
167	NASA GSFC: Centro de Voo Espacial Goddard	Governo
168	Colheita da NASA	Multilateral
169	Iniciativa dos Povos Indígenas da NASA	Governo
170	NASA JPL: Laboratório de Propulsão a Jato, Instituto de Tecnologia da Califórnia	Universidade
171	NASA LRC: Centro de Pesquisa Langley	Governo
172	NASA MSFC: Centro de Voo Espacial Marshall	Governo
173	Equipe científica do Observatório Orbital de Carbono (OCO) da NASA	Multilateral
174	Equipe científica do SMAP (Soil Moisture Active Passive) da NASA	Multilateral
175	Equipe científica de biologia e geologia de superfície (SBG) da NASA	Multilateral
176	Agência Nacional de Parques Nacionais (Gabão)	Governo
177	Universidade Nacional Agrária (Peru)	Universidade
178	Fundação Nacional do Índio (FUNAI)	CSO
179	Escola Nacional de Silvicultura (Camarões)	Governo
180	Sociedade Geográfica Nacional	CSO
181	Universidade Nacional de Taiwan (Taiwan)	Universidade
182	Universidade Nacional da Guiné Equatorial (Guiné Equatorial)	Universidade
183	Universidade Nacional de Santo Antônio Abade, em Cuzco (Peru)	Universidade
184	Universidade Nacional de Cingapura (Cingapura)	Universidade
185	Universidade Nacional de Ucayali (Peru)	Universidade
186	Nature Tech Collective	CSO
187	NAU: Universidade do Norte do Arizona	Universidade
188	NCBS: Centro Nacional de Ciências Biológicas (Índia)	Governo
189	NCSU: Universidade Estadual da Carolina do Norte	Universidade
190	NEON: Rede Nacional de Observatórios Ecológicos dos EUA	Governo
191	Museu de New Brunswick (Canadá)	Governo
192	Universidade de Nova York	Universidade
193	NICFI: Iniciativa Internacional da Noruega para o Clima e as Florestas	Governo

#	ORGANIZAÇÃO/INSTITUIÇÃO	TIPO
194	NIOO-KNAW: Instituto Holandês de Ecologia (Holanda)	CSO
195	Laboratório de Monitoramento Global da NOAA	Governo
196	NSF: Fundação Nacional de Ciências	Governo
197	Especialista em oceanos	CSO
198	Universidade Oficial de Bukavu (República do Congo)	Universidade
199	Universidade Estadual de Ohio	Universidade
200	Okapi Faunal Reserve (República Democrática do Congo)	Governo
201	Universidade Estadual de Oklahoma	Universidade
202	Universidade Omar Bongo (Gabão)	Universidade
203	ONACC: Observatório Nacional de Mudanças Climáticas (Camarões)	Governo
204	Universidade Estadual do Oregon	Universidade
205	ORNL: Laboratório Nacional de Oak Ridge	Governo
206	OSFAC: Observatório de Satélite das Florestas da África Central	CSO
207	Governo local do distrito de Pakwach (Uganda)	Governo
208	PAUWES: Instituto Universitário Pan-Africano de Ciências da Água e da Energia	Universidade
209	Universidade Penn State	Universidade
210	Piriati Emberá	CSO
211	Planeta	Setor privado
212	Planet One-Mboa Hub	CSO
213	PNNL: Laboratório Nacional do Noroeste do Pacífico	Governo
214	Proforest (Reino Unido)	CSO
215	PUCP: Pontifícia Universidade Católica do Peru (Peru)	Universidade
216	Pueblo de Jemez	CSO
217	R2FAC: Rede de Pesquisa sobre as Florestas da África Central	Multilateral
218	Conexão com a floresta tropical	CSO
219	Rainbow Environment Consult (Camarões)	Setor privado
220	Fundação Rainforest da Noruega	CSO
221	RAPEE: Rede Africana para a Promoção da Educação Ambiental (Camarões)	Governo
222	Governo Regional do Amazonas (Peru)	Governo
223	Governo Regional de Caqueta (Peru)	Governo
224	Governo Regional de Huanuco (Peru)	Governo
225	Governo Regional de Loreto (Peru)	Governo
226	Governo Regional de Madre de Dios (Peru)	Governo
227	Governo Regional de Piura (Peru)	Governo
228	Governo Regional de San Martin (Peru)	Governo
229	Governo Regional de Ucayali (Peru)	Governo
230	REPALEAC: Rede de Populações Indígenas e Locais para o Gerenciamento Sustentável de Ecossistemas Florestais na África Central	CSO
231	RIFFEAC: Rede de Instituições de Formação Florestal e Ambiental da África Central	Governo
232	RIOFAC: Projeto de reforço e institucionalização do OFAC	CSO
233	RRI: Iniciativa de Direitos e Recursos	Multilateral
234	Universidade Rutgers	Universidade
235	Universidade Estadual de San Diego	Universidade
236	Universidade Estadual de São Francisco	Universidade
237	Inteligência de satélite	Setor privado

#	ORGANIZAÇÃO/INSTITUIÇÃO	TIPO
238	Ciências Schmidt	Doador
239	Science Systems and Applications Inc.	Setor privado
240	SERFOR: Organismo de Supervisão dos Recursos Florestais e da Fauna Silvestre, Peru	Governo
241	SERNANP: Serviço Nacional de Áreas Naturais Protegidas pelo Estado, Peru	Governo
242	SERVIR	Multilateral
243	SGN: Senckenberg - Instituto Leibniz de Pesquisa sobre Biodiversidade e Sistema Terrestre	CSO
244	SIG: Grupo de Informática Espacial	Setor privado
245	SMACON: Organização de Conservação de Pequenos Mamíferos	CSO
246	Instituto Smithsonian	Governo
247	Universidade Estadual de Dakota do Sul	Universidade
248	Instituto de Pesquisa do Sudoeste	CSO
249	Spark Soluções Climáticas	Setor privado
250	SPCB: Painel Científico da Bacia do Congo	CSO
251	SPUN: Sociedade para a Proteção de Redes Subterrâneas	CSO
252	STA: Ações Tropicais Sustentáveis	CSO
253	Universidade de Stanford	Universidade
254	STRI: Instituto de Pesquisa Tropical Smithsonian	Governo
255	Centro de Pesquisa de Água de Stroud	CSO
256	SURUDEV: Corrida Sustentável das Nações Unidas para o Desenvolvimento	Multilateral
257	Universidade Sueca de Ciências Agrícolas, Uppsala	Universidade
258	Sylvera	Setor privado
259	TERRA: Centro de Ensino e Pesquisa (Bélgica)	CSO
260	Universidade A&M do Texas	Universidade
261	Fundação David e Lucile Packard	Doador
262	Fundação Gordon & Betty Moore	Doador
263	Universidade Nacional da Colômbia (Colômbia)	Universidade
264	TINTA: A árvore invisível	CSO
265	TotalEnergies (Uganda)	Setor privado
266	Universidade de Tulane	Universidade
267	UAB: Universidade Autônoma de Barcelona (Espanha)	Universidade
268	UAC: Universidade de Abomey-Calavi (Benin)	Universidade
269	UB: Universidade do Burundi (Burundi)	Universidade
270	UCC: Universidade Católica do Congo	Universidade
271	UCL: Universidade College London	Universidade
272	UCLouvain: Universidade Católica de Louvain (Bélgica)	Universidade
273	UEA: Universidade do Estado do Amazonas (Brasil)	Universidade
274	UFC: Universidade Federal do Ceará (Brasil)	Universidade
275	UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brasil)	Universidade
276	UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina (Brasil)	Universidade
277	UFSM: Universidade Federal de Santa Maria (Brasil)	Universidade
278	UFVJM: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (Brasil)	Universidade
279	Centro de Ecologia e Hidrologia do Reino Unido (Reino Unido)	CSO
280	UK FCDO: Foreign, Commonwealth & Development Office (Escritório de Relações Exteriores, Comunidade e Desenvolvimento)	Governo
281	Reino Unido NERC: Conselho de Pesquisa em Meio Ambiente Natural	Governo

#	ORGANIZAÇÃO/INSTITUIÇÃO	TIPO
282	UL: Universidade de Lorraine (França)	Universidade
283	ULB: Universidade Livre de Bruxelas (Bélgica)	Universidade
284	ULiège: Universidade de Liège (Bélgica)	Universidade
285	UMR EcoFoG: Ecologia das florestas da Guiana Francesa (França)	Multilateral
286	UN FAO: Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação	Multilateral
287	UN SDSN: Rede de Soluções para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas	Multilateral
288	UN-SDSN: Rede de Soluções para o Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas	Multilateral
289	UNA: Universidade Nacional de Agricultura (Benin)	Universidade
290	UNAM: Universidade Nacional Autônoma do México (México)	Universidade
291	UNAMAD: Universidade Nacional Amazônica de Madre de Dios (Peru)	Universidade
292	UNAP: Universidade Nacional da Amazônia Peruana (Peru)	Universidade
293	UnB: Universidade de Brasília (Brasil)	Universidade
294	PNUMA: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente	Multilateral
295	UNESCO: Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura	Multilateral
296	UNGE: Universidade Nacional da Guiné Equatorial (Guiné Equatorial)	Universidade
297	UNIKIN: Universidade de Kinshasa (República Democrática do Congo)	Universidade
298	UNIKIS: Universidade de Kisangani (República Democrática do Congo)	Universidade
299	Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines Laboratório de Ciências Climáticas e Ambientais	Universidade
300	Universidade de Buffalo	Universidade
301	Universidade de Aberdeen (Reino Unido)	Universidade
302	Universidade do Alabama em Huntsville	Universidade
303	Universidade de Alberta	Universidade
304	Universidade do Arizona	Universidade
305	Universidade de Arkansas	Universidade
306	Universidade de Bamenda, Camarões	Universidade
307	Universidade de Bangui	Universidade
308	Universidade de Berna	Universidade
309	Universidade de Bordeaux	Universidade
310	Universidade de Buea, Camarões	Universidade
311	Universidade da Califórnia, Berkeley	Universidade
312	Universidade da Califórnia, Davis	Universidade
313	Universidade da Califórnia, Irvine	Universidade
314	Universidade da Califórnia, Los Angeles	Universidade
315	Universidade da Califórnia, Merced	Universidade
316	Universidade da Califórnia, Santa Bárbara	Universidade
317	Universidade da Califórnia, Santa Cruz	Universidade
318	Universidade de Campinas	Universidade
319	Universidade da Cidade do Cabo	Universidade
320	Universidade de Charleston	Universidade
321	Universidade de Colorado Boulder	Universidade
322	Universidade de Copenhague	Universidade
323	Universidade de Delaware	Universidade
324	Universidade de Delhi (Índia)	Universidade
325	Universidade de Douala (Camarões)	Universidade

#	ORGANIZAÇÃO/INSTITUIÇÃO	TIPO
326	Universidade de Dschang (Camarões)	Universidade
327	Universidade de Edimburgo (Reino Unido)	Universidade
328	Universidade de Energia e Recursos Naturais (Gana)	Universidade
329	Universidade de Exeter (Reino Unido)	Universidade
330	Universidade da Flórida	Universidade
331	Universidade da Geórgia	Universidade
332	Universidade de Hong Kong (China)	Universidade
333	Universidade de Ibadan (Nigéria)	Universidade
334	Universidade de Idaho	Universidade
335	Universidade de Illinois Urbana-Champaign	Universidade
336	Universidade de Jambi (Indonésia)	Universidade
337	Universidade de Kindu (República do Congo)	Universidade
338	Universidade de Leeds (Reino Unido)	Universidade
339	Universidade de Maroua (Camarões)	Universidade
340	Universidade de Maryland	Universidade
341	Universidade de Miami	Universidade
342	Universidade de Michigan	Universidade
343	Universidade de Minnesota	Universidade
344	Universidade de Montana	Universidade
345	Universidade de New Hampshire	Universidade
346	Universidade de Nova Orleans	Universidade
347	Universidade de Ngaoundéré (Camarões)	Universidade
348	Universidade da Carolina do Norte em Chapel Hill	Universidade
349	Universidade de Notre Dame	Universidade
350	Universidade de Oklahoma	Universidade
351	Universidade de Oxford	Universidade
352	Universidade de Pretória (África do Sul)	Universidade
353	Universidade de Porto Rico - Rio Piedras	Universidade
354	Universidade de Ruanda (Ruanda)	Universidade
355	Universidade de Ciência e Tecnologia de Masuku (Gabão)	Universidade
356	Universidade do Sul da Califórnia	Universidade
357	Universidade do Rosário (Colômbia)	Universidade
358	Universidade de Tóquio (Japão)	Universidade
359	Universidade de Tolima (Colômbia)	Universidade
360	Universidade de Utah	Universidade
361	Universidade de Vermont	Universidade
362	Universidade de Victoria (Canadá)	Universidade
363	Universidade da Virgínia	Universidade
364	Universidade de Washington	Universidade
365	Universidade de Wisconsin	Universidade
366	Universidade de Yaoundé I (Camarões)	Universidade
367	UNP: Universidade Nacional de Piura (Peru)	Universidade
368	UNTRM: Universidade Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza (Peru)	Universidade
369	Embaixada dos EUA em Camarões	Governo
370	Centro de Gases de Efeito Estufa (GHG) dos EUA	Governo

#	ORGANIZAÇÃO/INSTITUIÇÃO	TIPO
371	Laboratório de Pesquisa Naval dos EUA	Governo
372	Departamento de Estado dos EUA	Governo
373	USAID: Agência dos EUA para o Desenvolvimento Internacional	Governo
374	USDA: Departamento de Agricultura dos EUA	Governo
375	USFS-IP: Programa Internacional do Serviço Florestal dos EUA	Governo
376	USGS: Serviço Geológico dos EUA	Governo
377	USP: Universidade de São Paulo (Brasil)	Universidade
378	USTM: Instituto Nacional Superior de Agronomia e Biotecnologia	CSO
379	UTEC: Universidade de Engenharia e Tecnologia (Peru)	Universidade
380	Universidade de Utrecht (Holanda)	Universidade
381	UTRGV: Universidade do Texas Rio Grande Valley	Universidade
382	UZH: Universidade de Zurique (Suíça)	Universidade
383	Universidade de Wageningen (Holanda)	Universidade
384	Universidade Wake Forest	Universidade
385	Universidade de Washington	Universidade
386	WCS: Wildlife Conservation Society (Sociedade de Conservação da Vida Selvagem)	CSO
387	Universidade de West Virginia	Universidade
388	Universidade de Wilkes	Universidade
389	Wits: University of The Witwatersrand, Joanesburgo (África do Sul)	Universidade
390	Centro de Pesquisas Climáticas Woodwell	CSO
391	Banco Mundial	Multilateral
392	Wounaan	CSO
393	WRI: Instituto de Recursos Mundiais	CSO
394	WWF: Fundo Mundial para a Natureza	CSO
395	Academia Wyss para a Natureza	Universidade
396	Universidade de Yale	Universidade

D. Atividades de pesquisa e monitoramento planejadas e em andamento

Tabela D-1. Projetos e programas de pesquisa e monitoramento planejados e em andamento nos trópicos que poderiam contribuir para o PANGEA.

OBSERVAÇÃO: esta não é uma lista abrangente. A: Projeto ou programa de avaliação. E: Educacional. L: Programa ou projeto contínuo e de longo prazo que provavelmente continuará durante o PANGEA. M: Projeto ou programa de monitoramento. R: Projeto ou programa de pesquisa. T: Tentativa, ainda não confirmado.

PROJETO/PROGRAMA	PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(IS)	PAÍS/PAÍSES/REGIÃO	ESCOPO GEOGRÁFICO/CONTINENTE	TIPO DE PROJETO/PROGRAMA	ANOS
1000 PAISAGENS PARA 1 BILHÃO DE PESSOAS	Filantropico	Colômbia, Equador, Fiji, Guiana, Quênia, Indonésia, México, Namíbia, Nicarágua, Peru, África do Sul	Global	L	2019 - Em andamento
2°FOR	Variado	25 países	Pantropical	M,L	1990 - Em andamento
AFR100: INICIATIVA AFRICANA DE RESTAURAÇÃO DE PAISAGENS FLORESTAIS	Agência de Desenvolvimento da União Africana (AUDA)-NEPAD	África	África	L	2015 - Em andamento
AFRISAR I	ESA, NASA	Gabão	África	R	2016
AFRISAR II	ESA, NASA	Gabão, Gana, Camarões, RDC, República do Congo, São Tomé e Príncipe	África	R	2023-2024
ALIVE (ADVANCED BASELINE IMAGER LIVE IMAGING OF VEGETATED ECOSYSTEMS)	NSF	América Latina	Américas	R	2024 - Em andamento
CAMPANHA AMAZON ESA-INPE	ESA, INPE	Brasil	Américas	R	2024-2026
AMAZÔNIA X CONGO: UNDERSTANDING THE INTERCONTINENTAL DIFFERENCES OF TROPICAL RAINFOREST RESPONSES TO CLIMATE VARIABILITY (ENTENDENDO AS DIFERENÇAS INTERCONTINENTAIS DAS RESPOSTAS DAS FLORESTAS TROPICAIS À VARIABILIDADE CLIMÁTICA)	Departamento de Energia dos EUA (DOE)	Amazônia, Congo	África, Américas	R	2024-2027
AMERIFLUX	DOE DOS EUA	América do Norte e do Sul	Américas	M,L	1996 - Em andamento
AMIT (INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA AMAZÔNIA)	Fundação Moore, GCF, USAID	Amazon	Américas	L	2020 - Em andamento

PROJETO/PROGRAMA	PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(IS)	PAÍS/PAÍSES/REGIÃO	ESCOPO GEOGRÁFICO/CONTINENTE	TIPO DE PROJETO/PROGRAMA	ANOS
AMMI (AFRICAN MASTERS OF MACHINE INTELLIGENCE)	Facebook, Google	Camarões, Gana, Ruanda, Senegal, África do Sul	África	L	2003 - Em andamento
ANDESFLUX	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA)	Amazon	Américas	L	2022 - Em andamento
ANDEX	Programa Mundial de Pesquisa Climática	Peru	Américas	R	2018-2025
ASCEND (ADVANCING SPECTRAL BIOLOGY IN CHANGING ENVIRONMENTS TO UNDERSTAND DIVERSITY)	NASA, NSF	Global	Global	R	2020-2025
ASIA-AQ (INVESTIGAÇÃO DA QUALIDADE DO AR NA ÁSIA POR VIA AÉREA E POR SATÉLITE)	NASA	Filipinas, Coreia do Sul, Taiwan, Tailândia	Ásia	R	2024
ASIAFLUX	Variado	Ásia	Ásia	L	1999 - Em andamento
ATFS (ALIANÇA PARA A CIÊNCIA DAS FLORESTAS TROPICAIS)	NSF	Pantropical	Pantropical	R, L	2021-2025
ATTO (AMAZON TALL TOWER OBSERVATORY)	Max Planck, governo alemão, etc.	Amazon	Américas	L	2009 - Em andamento
AVUELO (EXPERIMENTO UNIFICADO DE VALIDAÇÃO AÉREA - DA TERRA AO OCEANO)	NASA	Panamá	Américas	R	2025
ALÉM DA CONTAGEM DE ÁRVORES	WRI, Planet		Pantropical	R	2024 - Em andamento
BIODIVERSITY - UMA NOVA MISSÃO ESPACIAL PARA MONITORAR ECOSSISTEMAS EM UMA ESCALA PRECISA	ESA	Global	Global	T, L	TBD
BIOSCAPE (PESQUISA DE BIODIVERSIDADE DO CABO)	NASA, Governo da África do Sul, UNESCO, etc.	África do Sul	África	R	2023 - Em andamento
DIVERSIDADE DO CACAU	Ministério da Agricultura e do Meio Ambiente do Peru, USDA, Cacao Seguro, USAID	Peru, Equador, Nicarágua, Honduras, El Salvador, Guatemala	Américas	L	2021 - Em andamento

PROJETO/PROGRAMA	PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(IS)	PAÍS/PAÍSES/REGIÃO	ESCOPO GEOGRÁFICO/CONTINENTE	TIPO DE PROJETO/PROGRAMA	ANOS
CALEDNA: PROGRAMA DE DNA AMBIENTAL DO CONSÓRCIO DE GENÔMICA DE CONSERVAÇÃO DA UNIVERSIDADE DA CALIFÓRNIA	Instituto de Genômica da UCSC, Gabinete do Presidente da UC, HHMI, Rede Global de Biodiversidade do Genoma	Califórnia	Américas	R	2017 - Em andamento
CARBONO I	NASA	Global	Global	T	TBD
CARPE (PROGRAMA REGIONAL DA ÁFRICA CENTRAL PARA O MEIO AMBIENTE)	USAID		África	L	1995 - Em andamento
REDE DE PARCELAS DA ÁFRICA CENTRAL	IRD	Camarões, Gabão e RDC	África	R, L	2010 - Em andamento
CLIMA (ALIANÇA DE MODELAGEM CLIMÁTICA)	Ciências Schmidt	EUA	Global	R	2018 - Em andamento
CoForFUNC (COMPOSIÇÃO FUNCIONAL DA FLORESTA DA BACIA DO CONGO)	BiodivERsA, a Comissão Europeia	Camarões, República do Congo, República Democrática do Congo	África	R	2023 - Em andamento
COLÔMBIA BON (REDE DE OBSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE)	GIZ	Colômbia	Américas	M,L	2015 - Em andamento
INSTITUTO DA BACIA DO CONGO	NASA, NSF, Filantrópica	Camarões, República Democrática do Congo, Gabão	África	R, L	2015 - Em andamento
INSTITUTO DA BACIA DO CONGO PARA A NOVA ECONOMIA CLIMÁTICA	EUA, França, Alemanha, Bezos Earth Fund, etc.	Camarões	África	L	2023 - Em andamento
INICIATIVA CIENTÍFICA DA BACIA DO CONGO	Filantrópico	República Democrática do Congo, Gabão, Camarões e República do Congo	África	L	2024 - Em andamento
CONGOFLUX	União Europeia	República Democrática do Congo	África	L	2021 - Em andamento
CONGOPEAT	UKRI NERC	República Democrática do Congo, República do Congo	África	R	2018 - Em andamento
AMOSTRAGEM LIDAR NACIONAL DA RDC	WWF	República Democrática do Congo, Gabão, Camarões e República do Congo	África	R	2012
GÊMEO DIGITAL DO SISTEMA TERRESTRE PARA CORREDORES DE CARBONO E BIODIVERSIDADE DA ÁFRICA CENTRAL	NASA	África Central	África	R	2025-2027

PROJETO/PROGRAMA	PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(IS)	PAÍS/PAÍSES/REGIÃO	ESCOPO GEOGRÁFICO/CONTINENTE	TIPO DE PROJETO/PROGRAMA	ANOS
ED2: COMUNIDADE DE MODELAGEM DE DEMOGRAFIA DE ECOSISTEMAS	Variado	Global	Global	R	2001 - Em andamento
EDGE	NASA	Global	Global	T	TBD
PROJETO DE ESCUTA DE ELEFANTES	Cornell	África Central e Oriental	África	L	1999 - Em andamento
FINANCIAMENTO HORIZON DA UE (POR EXEMPLO, CONCERTO)	UE	Global	Global	R	2021-2027
FLUXNET	NASA, DOE, NSF	Global	Pantropical	R, L	1997 - Em andamento
FORESTGEO	Smithsonian, Variado	Global	Pantropical	R, L	1980 - Em andamento
FORESTPLOTS.NET	ERC, NERC, Filantrópico	Pantropical	Pantropical	R, L	2009 - Em andamento
GCF-TF (FORÇA-TAREFA DOS GOVERNADORES PARA O CLIMA E FLORESTAS)	Filantrópico	Bolívia, Brasil, Colômbia, Costa do Marfim, Equador, Indonésia, México, Nigéria, Peru, Espanha, EUA.	Pantropical	L	2008 - Em andamento
GATC: ALIANÇA GLOBAL DE COMUNIDADES TERRITORIAIS MOVIMENTO DE MULHERES TREINAMENTO E MONITORAMENTO DE DRONES	Filantrópico	Pantropical	Pantropical	R, L	2014 - Em andamento
CAMPANHA AÉREA GEDI - SE ÁSIA	NASA	Sudeste Asiático	Ásia	R	2025
GEM	OTB	Pantropical	Pantropical	R, L	2013 - Em andamento
GEO-TREES	Filantrópico	Global	Pantropical	R, L	2024
GeoNEX	NASA, NOAA	Global	Global	M, R	2019 - Em andamento
GFW: GLOBAL FOREST WATCH	Instituto de Recursos Mundiais	Pantropical	Pantropical	L	2014 - Em andamento
ESTUDO DE MORTALIDADE DE ÁRVORES DE GRANDE PORTE GIGANTE-PANTROPICAL	NSF	Brasil, Camarões, Malásia, Panamá	Pantropical	R	2023 - Em andamento
GLAD: ANÁLISE E DESCOBERTA GLOBAL DE TERRAS	NASA, Google, USDA, USGS	Global	Global	R, L	2013 - Em andamento

PROJETO/PROGRAMA	PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(IS)	PAÍS/PAÍSES/REGIÃO	ESCOPO GEOGRÁFICO/CONTINENTE	TIPO DE PROJETO/PROGRAMA	ANOS
ATLAS DO ECOSISTEMA GLOBAL	Grupo de Observações da Terra (GEO)	Global	Global	L	2024 - Em andamento
GLOBE: APRENDIZADO E OBSERVAÇÕES GLOBAIS PARA O BENEFÍCIO DO MEIO AMBIENTE	NASA, NSF, NOAA, Departamento de Estado dos EUA	Global	Global	L	1994 - Em andamento
GOFC-GOLD (OBSERVAÇÕES GLOBAIS DA COBERTURA FLORESTAL E DA DINÂMICA DO USO DA TERRA)	NASA, ESA	Global	Global	L	1997 - Em andamento
GRUAN	Programa Mundial de Pesquisa Climática (RCRP), UNFCCC	África, Américas	África, Américas	L	2008 - Em andamento
GUYAFLUX	INRAE	França (Guiana Francesa)	Américas	L	2003 - Em andamento
GUYAFOR	CIRAD, ONF, CNRS	França (Guiana Francesa)	Américas	L	2000 - Em andamento
KADI	União Europeia	África	África	R	2023 - Em andamento
LABORATÓRIO DE TERRAS E CARBONO	Instituto de Recursos Mundiais, Filantrópico	Pantropical	Pantropical	M	2021 - Em andamento
INICIATIVA LATINO-AMERICANA DE SUSTENTABILIDADE / PERU HUB	USAID	Peru	Américas	L	2019 - Em andamento
LBA (FASES 1, 2, 3)	MCTI Brasil, NASA	Amazon	Américas	L	1998 - Em andamento
MAPBIOMAS	Filantrópico	Amazônia, Indonésia	Américas, Ásia, expansão planejada para a África	R, L	2017 - Em andamento
COLHEITA DA NASA	NASA	Global	Global	L	2017 - Em andamento
NGEE-TRÓPICOS	DOE	EUA	Pantropical	R	2015-2028
MOSAICOS NICFI PLANET	NICFI	Pantropical	Pantropical	R	2020-2025

PROJETO/PROGRAMA	PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(IS)	PAÍS/PAÍSES/REGIÃO	ESCOPO GEOGRÁFICO/CONTINENTE	TIPO DE PROJETO/PROGRAMA	ANOS
OFVI (ONE FOREST VISION INITIATIVE)	Ministério do Ensino Superior e da Pesquisa da França (MESR), Ministério da Europa e das Relações Exteriores da França (MEAE)	República Democrática do Congo, Gabão, República do Congo	África	R, L	2023 - Em andamento
PECAN	NSF, NASA, DOE	Global	Global	R, L	2011 - Em andamento
PLANETA Tanager	Planeta	Global	Global	R, L	2024 - Em andamento
PROGRAMA PPG-CLIAMB	UEA, INPA	Brasil	Américas	R, L	2009 - Em andamento
PROJETO CENTINELA	Planeta	Bolívia, Brasil, Costa Rica, República Democrática do Congo, Indonésia	Pantropical	R	2024 - Em andamento
R2FAC (REDE DE PESQUISA FLORESTAL DA ÁFRICA CENTRAL)	Multi-Institucional	Camarões, República Centro-Africana, Gabão, República do Congo, República Democrática do Congo, Bélgica, França	África	L	2012 - Em andamento
RECCAP2	Agência Espacial Europeia, Projeto Internacional de Coordenação de Carbono, Projeto da UE	Global	Global	R, M	2017-2023
RESSAC	União Europeia	Angola, Burundi, Camarões, República Centro-Africana, Chade, Guiné Equatorial, República Democrática do Congo, Gabão, República do Congo, Ruanda, São Tomé e Príncipe	África	L	2024 - Em andamento
ÁREA DE FOCO CIENTÍFICO DO RUBISCO	DOE	Global	Pantropical	L	2011 - Em andamento
ÁRVORE DE RUANDA	Conselho Sueco de Pesquisa	Ruanda	África	R, L	2021 - Em andamento
SARI (INICIATIVA DE PESQUISA DO SUL/SUDESTE DA ÁSIA)	NASA LCLUC	Sul e Sudeste Asiático	Ásia	R, L	2013 - Em andamento

PROJETO/PROGRAMA	PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(IS)	PAÍS/PAÍSES/REGIÃO	ESCOPO GEOGRÁFICO/CONTINENTE	TIPO DE PROJETO/PROGRAMA	ANOS
PAINEL CIENTÍFICO PARA A AMAZÔNIA	UN SDSN	Colômbia, Bolívia, Equador, Peru, Suriname, Guiana, Guiana Francesa, Brasil e Venezuela	Américas	L	2020 - Em andamento
PAINEL CIENTÍFICO PARA O CONGO	UN SDSN	Camarões, República Centro-Africana, Gabão, República Democrática do Congo, República do Congo, Guiné Equatorial	África	L	2023 - Em andamento
SE.PLAN	FAO	Pantropical	Pantropical	M, L	2016 - Em andamento
SELPER: SOCIEDADE LATINO-AMERICANA DE SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS	Variado	América Latina	Américas	L	1980 - Em andamento
ATIVIDADES DO SERVIR HUB	NASA, USAID	Amazônia, América Central, África Oriental e Meridional, Hindu Kush Himalaya, Sudeste Asiático, África Ocidental	África, Américas, Ásia	L	2004 - Em andamento
SILK (SCHOOL FOR INDIGENOUS AND LOCAL KNOWLEDGE)	Instituto da Bacia do Congo	Camarões	África	R, L	2018 - Em andamento
SILVACARBONO	USGS	Pantropical	Pantropical	L	2011 - Em andamento
CAL/VAL SMAP NO SUDESTE DA ÁSIA	NASA	Malásia	Ásia	R	2024 - Em andamento
PAISAGENS SUSTENTÁVEIS BRASIL	USFS, USAID, DOS, Embrapa	Brasil, Peru	Américas	R	2008-2023
SWAMP (PROGRAMA DE ADAPTAÇÃO E MITIGAÇÃO DE ÁREAS ÚMIDAS SUSTENTÁVEIS)	USAID, NICFI, Norad, IKI, Filantrópica	Ásia-Pacífico, África, América Latina e Caribe	Pantropical	R, L	2008 - Em andamento
TALLO (UM BANCO DE DADOS GLOBAL DE ALOMETRIA DE ÁRVORES E ARQUITETURA DE COPAS)	UKRI NERC	Global	Global	L	2022 - Em andamento
TERN (REDE DE PESQUISA DO ECOSISTEMA TERRESTRE DA AUSTRÁLIA)	Governo australiano	Austrália	Austrália	R, L	2009 - Em andamento
TERRABIO	USAID, Alliance of Biodiversity International/CIAT, setor privado	Amazon	Américas	M	2023-2034

PROJETO/PROGRAMA	PATROCINADOR(ES) PRINCIPAL(IS)	PAÍS/PAÍSES/REGIÃO	ESCOPO GEOGRÁFICO/CONTINENTE	TIPO DE PROJETO/PROGRAMA	ANOS
TERRA-I	Aliance Biodiversity & CIAT, The Nature Conservancy	América Latina	Américas	M	2023 - Em andamento
TMFO	Cirad, CGIAR, FTA, ESA, governo francês	Pantropical	Pantropical	L	2017 - Em andamento
TROPICAL FLUXNET-CH ₄	Fundação Moore, NSF	Amazônia, Sudeste Asiático, Botsuana	África, Américas, Ásia	R	2021 - Em andamento
REDE DE FLUXO DA ÁFRICA OCIDENTAL	AMMA-CATCH Benin, FairCarboN	Benin	África	R, L	1997 - Em andamento

E. Tabela de medições detalhadas do PANGEA

Tabela E-1. Descrição das variáveis ecológicas e geofísicas relevantes para essa campanha, com os requisitos de observação correspondentes e os ativos de observação da Terra existentes ou futuros. ET: evapotranspiração; LST: temperatura da superfície terrestre; SIF: fluorescência induzida pelo sol. **O texto em roxo** indica satélites de agências federais não americanas. *Indica missões que ainda não foram lançadas e/ou que ainda podem estar sendo consideradas pela concorrência. ** Indica missões encerradas recentemente.

VARIÁVEL(EIS)	PERGUNTAS SOBRE CIÊNCIAS	MEDIÇÕES DE SOLO	TECNOLOGIAS DE OBSERVAÇÃO	ATIVOS DE OBSERVAÇÃO DA TERRA	
				SATÉLITE (PLANEJADO/PROPOSTO)	AEROTRANSPORTADO (DRONE/AERONAVE)
GPP	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q26	Torres de fluxo, espectros no nível da folha	Espectroscopia de infravermelho	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 fluxo	Térmica	Landsat, ECOSTRESS, SBG*, CHIME* , TRISHNA* , LSTM* , VIIRS, Sentinel-3, Comercial* , satélites meteorológicos GEO	NASA HyTES, MESTRE
RESPIRAÇÃO DO ECOSISTEMA	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q13, Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q26	Torres de fluxo	Espectroscopia de infravermelho	GOES-R ABI, AHI, MTG-I	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER
FLUXOS DE CO₂ E CH₄	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q18, Q20, Q22, Q26	Torres de fluxo, medições de câmara	Hiperespectral	EMIT, MethaneSat , SBG*, Carbon- i*, CarbonMapper*	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, NEON AOP, GAO
			Covariância de Foucault no ar (AEC)		NASA CARAFE
COLUNA CO /CH /CO₂₄	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q18, Q20, Q22, Q26	Espectrômetros TCCON, COCCON, EM27/SUN	Espectroscopia de infravermelho	OCO-2/3, NASA GHG ESE*, Sentinel- 5P/5* , FLEX* , CO2M* , GOSAT-2, GOSAT-GW*	NASA CFIS (SIF), DLR CoMet (CO /CH) ₂₄
BIOMASSA ACIMA DO SOLO	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q15,	Dados de parcelas de inventário florestal, escaneamento a laser terrestre	Lidar	GEDI, ICESat-2, MOLI* , EDGE*	NASA LVIS, lidar de pequeno porte (drone e aeronave)

VARIÁVEL(EIS)	PERGUNTAS SOBRE CIÊNCIAS	MEDIÇÕES DE SOLO	TECNOLOGIAS DE OBSERVAÇÃO	ATIVOS DE OBSERVAÇÃO DA TERRA	
				SATÉLITE (PLANEJADO/PROPOSTO)	AEROTRANSPORTADO (DRONE/AERONAVE)
	Q18, Q20, Q22		Radar	Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*	UAVSAR DA NASA
MORTALIDADE DE ÁRVORES	Q9, Q11-Q13, Q15, Q17-Q22, Q25, Q27	Repetição de dados de parcelas do inventário florestal do censo	Lidar, Radar, Multispectral	Landsat, Sentinel-1/2, Planet, GEDI, NISAR*, BIOMASS*, EDGE*	Repetir o RGB ou lidar do drone
ALTURA DO DOSSEL	Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q17-Q22, Q27	Escaneamento a laser terrestre	Lidar	GEDI, ICESat-2, MOLI*, EDGE*	NASA LVIS, lidar de pequeno porte (drone e aeronave)
HETEROGENEIDADE DA ALTURA VERTICAL			Radar	NISAR*, Sentinel-1, BIOMASS*	UAVSAR DA NASA
DINÂMICA DO CANOPY GAP					
DIVERSIDADE ESPECTRAL	Q5, Q10-Q12, Q15, Q18, Q21, Q27	Espectros em nível de folha	Hiperespectral	EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, Planet's Tanager, SBG*, CHIME*, FLEX*	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO
DIVERSIDADE FUNCIONAL	Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q18, Q21, Q22, Q27	Diversidade taxonômica de plantas; características de plantas; IEK, TEK, LEK			
CARACTERÍSTICAS FOLIARES DO DOSSEL: LMA, N, P, CA, K, PIGMENTOS	Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q18, Q21, Q22	Diversidade taxonômica de plantas; características funcionais de plantas			
DIVERSIDADE FAUNÍSTICA: PRESENÇA/AUSÊNCIA, ABUNDÂNCIA, MOVIMENTO, INTERAÇÕES ENTRE ESPÉCIES	Q5, Q10-Q12, Q18, Q27	Armadilhas fotográficas; sensores bioacústicos; rastreamento do movimento de animais; eDNA; IEK, TEK, LEK; inventários de espécies de plantas	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, small-footprint lidar
FENOLOGIA	Q2, Q4, Q11-Q15, Q18, Q22, Q27	Phenocams, observações fenológicas terrestres de longo prazo; IEK, TEK, LEK	Radiômetros ópticos (OR) e hiperespectrais	Landsat, Sentinel-2, Planet, OLCI, EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, SBG*, CHIME*, FLEX*	Repetir drone RGB
ESTRESSE HÍDRICO: UMIDADE DO SOLO	Q1-Q4, Q6-Q9, Q13-Q19, Q22, Q24, Q25	Sondas de umidade do solo	Radar/radiometria de micro-ondas	SMAP, SMOS, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASS*, LSTM*	UAVSAR da NASA, AirMOSS
ESTRESSE HÍDRICO: CONTEÚDO DE ÁGUA DA FOLHA, CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DA FOLHA/PLANTA	Q2-Q4, Q6-Q9, Q12-Q19, Q22	Conteúdo de água da folha, potenciais de água e condutância da folha/tronco, VOD baseado em torre (GNSS de banda L)	GNSS-R/Sinais de Oportunidade, Espectroscopia de Imagens	AMSR-E, EMIT, SBG VSWIR e TIR*, CHIME*, FLEX*, SNOOPI*, CYGNSS, Lemur-2	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER

VARIÁVEL(EIS)	PERGUNTAS SOBRE CIÊNCIAS	MEDIÇÕES DE SOLO	TECNOLOGIAS DE OBSERVAÇÃO	ATIVOS DE OBSERVAÇÃO DA TERRA	
				SATÉLITE (PLANEJADO/PROPOSTO)	AEROTRANSPORTADO (DRONE/AERONAVE)
ESTRESSE TÉRMICO: T50, TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE TERRESTRE, EMISSIVIDADE	Q2-Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q15, Q19	Câmeras FLIR	Térmica	Landsat, ECOSTRESS, SBG*, FLEX* , TRISHNA* , LSTM* , Comercial*	NASA HyTES, MESTRE
FOGO ATIVO	Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q20, Q23, Q27	Umidade do combustível vital, umidade do solo, área queimada, gravidade da queimada, IEK, TEK, LEK	Térmica	Landsat, VIIRS, Sentinel-3 , SBG*, TRISHNA* , LSTM* , Comercial*	NASA HyTES, MESTRE
AEROSSÓIS DE QUEIMA DE BIOMASSA	Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q20, Q27	Tipo de combustível, densidade do combustível, medições de aerossol	UV/Infravermelho, fotômetros, Lidar	OMPS, VIIRS, EMIT, PACE, OLCI , NISAR*, BIOMASSA* , CALIPSO-CALIOP**, AOS*	
USO E COBERTURA DA TERRA	Q1, Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q14, Q16, Q19-Q20, Q25, Q27	Atividade agrícola (tipo de cultura, rendimento, rotação), severidade da extração de madeira, práticas de incêndio, IEK, TEK, LEK, práticas de gerenciamento de conservação	Radiômetros ópticos (OR), hiperspectral, 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, small-footprint lidar
SERVIÇOS DE PROVISIONAMENTO E ECOSSISTEMA CULTURAL: ALIMENTOS, ÁGUA DOCE, MEDICAMENTOS, PRÁTICAS ESPIRITUAIS E CERIMONIAIS	Q27	Áreas de colheita e rendimento de culturas e NTFP, identificação de tipos de florestas cultural e espiritualmente importantes, quantidade e qualidade da água	Radiômetros ópticos (OR), hiperspectral, 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, small-footprint lidar
ÁGUAS SUPERFICIAIS: QUANTIDADE, FLUXOS (DESCARGA), INUNDAÇÃO	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q24, Q25, Q27	Altura da superfície da água, extensão da inundação, caracterização da descarga	Altímetro, Radar, Radiômetro	SWOT, Sentinel-1 , NISAR*, BIOMASS*	UAVSAR DA NASA
ARMAZENAMENTO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA E TERRESTRE	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q24, Q25, Q27	Medições de poços	Gravimétrico	GRACE-FO, MC*	
UMIDADE ATMOSFÉRICA, VPD	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q17, Q19, Q22, Q24, Q25, Q27	Estação meteorológica	Microondas, sondas de infravermelho, geradores de imagens	ATMS, GeoXO*, AOS*	

VARIÁVEL(EIS)	PERGUNTAS SOBRE CIÊNCIAS	MEDIÇÕES DE SOLO	TECNOLOGIAS DE OBSERVAÇÃO	ATIVOS DE OBSERVAÇÃO DA TERRA	
				SATÉLITE (PLANEJADO/PROPOSTO)	AEROTRANSPORTADO (DRONE/AERONAVE)
VENTO	Q1-Q4, Q6, Q7, Q9, Q14, Q17, Q19, Q22, Q24, Q25	Estação meteorológica	Lidar com vento Doppler	Éolo	Medições de radiossondas
NUTRIENTES E TEXTURA DO SOLO	Q21, Q22, Q24, Q25, Q27	Amostras de solo	Hiperespectral	EMIT, PACE, SBG*, CHIME*	NASA AVIRIS-NG/3
				Observação: o PANGEA explorará relações correlativas com variáveis de sensoriamento remoto, não medições diretas.	
TOPOGRAFIA/ GEOMORFOLOGIA	Q1, Q8, Q19, Q21, Q22, Q24, Q25, Q27		Lidar, Radar	SRTM, Copernicus GLO-30	UAVSAR da NASA, LVIS da NASA, lidar de pegada pequena

F. Respostas ao feedback

Somos gratos pelo feedback recebido nas respostas à pesquisa da NASA CCE. Em especial, gostaríamos de agradecer a Alejandro Cueva (El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa), Bruno Ubiali (University of Georgia), Christiane Nimpa (University of Bamenda), Cristhian Saldarroaga Sanchez (Ing Forestal y del Medio Ambiente), Cyrille Bienvenu Bediang (Ministério da Educação Secundária), Gerson Lopes (Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá), David Carchipulla-Morales (Wake Forest University), Cristhian Saldarroaga Sanchez (Gobierno Regional Piura, Peru), Diana Rocio Carvajal-Contreras (Universidad Externado), Jeff Atkins (USDA Forest Service, Southern Research Station), Joe Berry (Carnegie Institution for Science), Joost van Haren (University of Arizona, Biosphere 2), Kyle Dexter (University of Turin), Lorena Santamaria Rojas (Stanford University), Louis Defo (University of Yaoundé I, Proforest), Luciana Pires (World Environmental Conservancy), Luiz A. T. Machado (IFUSP), Maricar M Aguilos (North Carolina State University), Ossanatou 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) e dois entrevistados anônimos.

Processo

O escritório de Ciclo de Carbono e Ecossistemas da NASA solicitou comentários sobre a versão preliminar do Livro Branco do PANGEA por meio de uma pesquisa na Web com 13 perguntas, desenvolvida pelo Programa de Ecologia Terrestre da NASA. Os comentários foram baseados em uma versão preliminar do White Paper lançada para análise pública em setembro de 2024. As respostas à pesquisa foram entregues à liderança do PANGEA regularmente até novembro. Os comentários da pesquisa foram amplamente utilizados para aprimorar o White Paper final.

Primeiramente, respondemos aos comentários resumindo os principais pontos fortes e as áreas que exigem melhorias destacadas pelos entrevistados da pesquisa, selecionados pelos autores do White Paper. Também fornecemos uma resposta ponto a ponto aos comentários da pesquisa. Não registramos comentários em que a resposta foi simplesmente "sim" ou "não". Em um número limitado de casos, um respondente da pesquisa replicou a mesma resposta para mais de uma pergunta. Respondemos a comentários idênticos apenas uma vez.

Nota sobre a tradução: Um número limitado de respondentes da pesquisa usou francês e espanhol. Registramos seus comentários originais e fornecemos [entre colchetes] nossa tradução.

Principais pontos fortes do PANGEA destacados pelos entrevistados da pesquisa

Citações diretas dos entrevistados da pesquisa:

- "O PANGEA captura um programa de pesquisa extraordinariamente ambicioso, porém viável, que abordará um dos maiores desafios que enfrentamos atualmente: compreender os padrões, os processos e a heterogeneidade que governam as florestas tropicais em todo o mundo."
- "Os temas científicos são abrangentes e abordam os aspectos mais importantes da dinâmica dos ecossistemas tropicais e suas implicações climáticas e socioecológicas. As lacunas de

conhecimento e as questões são claramente identificadas com a contribuição da comunidade."

- "O esforço colaborativo do PANGEA", que "é uma iniciativa proeminente que pode apoiar estratégias de conservação para o planeta e também integrará cientistas de todo o mundo em um esforço comum para proteger a biodiversidade".
- "O estudo é bem organizado e multidisciplinar e reúne os estudos necessários para preencher as lacunas nesses ecossistemas altamente vulneráveis em nível global."
- "A estrutura e o conteúdo do relatório do estudo de escopo do PANGEA são muito claros. Por exemplo, entendemos claramente que o PANGEA elucidará os padrões de mudanças recentes (5 a 30 anos) e contínuas em florestas tropicais, paisagens, dinâmicas e feedbacks, bem como suas variações geográficas, com uma abordagem ambiental. A ênfase é colocada em comparações entre as Américas e a África."
- "Isso é realmente adaptado às realidades de campo"
- "É uma integração de diferentes áreas; é um estudo multidisciplinar."
- "Essa abordagem é o que precisamos para entender melhor e prever - simular - como as mudanças climáticas e o uso da terra afetarão o clima e a vida."
- "Este relatório é abrangente e bem organizado. A introdução expôs claramente por que essa campanha é necessária e oportuna. As lacunas de conhecimento e as perguntas estão bem articuladas e servirão como um roteiro para pesquisas futuras. O relatório também identifica missões de satélite e produtos de dados que são essenciais para responder às perguntas de pesquisa da campanha PANGEA."
- "O PANGEA abordará incertezas absolutamente críticas sobre o papel do continente africano no sistema terrestre, sem excluir o papel central que a floresta amazônica desempenha."
- "A inclusão de um foco principal em sistemas tropicais na África é um ponto forte importante"
- "O processo do PANGEA parece ter sido muito deliberado e intencional para incluir comunidades locais, partes interessadas e governos quando necessário. A inclusão de muitas comunidades das áreas-alvo (América do Sul e África Central) e o processo deliberado de envolvimento demonstram isso. Também está claro que a liderança do PANGEA também envolverá outras comunidades - ainda não identificadas - quando sua inclusão for sugerida ou necessária para o sucesso. "
- "A abordagem à diversidade e à inclusão é muito forte."

A relevância do PANGEA foi bem avaliada pela maioria dos entrevistados, inclusive com o uso de "excelente", "muito bom" e "muito relevante".

Quase todos os entrevistados consideraram o PANGEA viável, com uma resposta que capta a essência dessas respostas: "Considero-o totalmente viável, pois amplia a pesquisa bem-sucedida do LBA e décadas de colaboração com pesquisadores tropicais e muda o foco para florestas tropicais africanas críticas, mas pouco conhecidas, com um plano de observação abrangente". Em contrapartida, outro entrevistado compartilhou: "A implementação exigirá muito trabalho, mas sem um plano mais detalhado de quais locais usar e focar, é difícil avaliar totalmente a viabilidade."

Apreciamos e concordamos plenamente com os comentários que enfatizaram o importante trabalho que teremos pela frente se o PANGEA for selecionado. Por exemplo, "Esse é um escopo de trabalho enorme que contará com a ajuda e a execução de vários grupos de trabalho, bem como com os nativos das áreas a serem pesquisadas. Depois de lê-lo cuidadosamente, o projeto parece bem amarrado. À medida que a pesquisa se desenvolve, podem ser necessárias melhorias específicas, mas, de modo geral, a proposta está muito bem estruturada."

Além do feedback positivo, vários pontos fracos foram compartilhados, os quais os autores do White Paper do PANGEA trabalharam para abordar no documento final. Nossas respostas às respostas da pesquisa solicitando clareza e identificando áreas para melhoria estão organizadas tematicamente abaixo.

Áreas do estudo do PANGEA que precisam ser aprimoradas

Os trechos dos comentários originais são mostrados em letras maiúsculas. [As respostas do PANGEA estão em azul.](#)

Biodiversidade:

- "*Biodiversidad*" [Biodiversidade]

[A seção 2.2 do white paper substancialmente revisado dá muita atenção aos temas de biodiversidade relevantes para o PANGEA. Muitas perguntas científicas específicas \(por exemplo, Q5, Q6 e Q7\) também se concentram especificamente em questões de biodiversidade.](#)

Curta janela de tempo:

- "Embora os efeitos da mudança climática e da ação humana sejam considerados, o projeto tem uma janela de tempo muito curta. Não se vê a colaboração de outros cientistas, como os arqueólogos. Limitações por não considerar a referência temporal que a arqueologia da África e da América Latina pode fornecer em relação aos ecossistemas terrestres"
- "É necessária uma visão de longo prazo, que é fornecida por dados paleoecológicos e informações da arqueologia africana e latino-americana em relação às florestas tropicais."

[O período de tempo do projeto é do passado próximo \(a era histórica dos satélites de cerca de 50 anos\) até o final do século atual. Estudos arqueológicos e paleontológicos, sem dúvida, melhorariam nossa perspectiva, mas os recursos são limitados no projeto e tivemos que tomar decisões práticas para atender aos critérios de nossos patrocinadores da NASA.](#)

O processo de colaboração e a troca não são claros:

- "Ele é mostrado como um projeto colaborativo entre cientistas. Ele também inclui o conhecimento nativo local e indígena dos ecossistemas. Tenho dúvidas se as populações locais fazem parte da equipe colaborativa ou se são meras receptoras dos resultados."
- "Capacitar a população local para ser mais prática e envolvida, em vez de apenas ajudantes e trabalhadores contratados."

- "Não está claro para mim o processo de coleta de dados e o relacionamento entre os cientistas nos Estados Unidos e as comunidades na América Latina e na África."

Desde o início, o PANGEA tem feito grandes esforços para envolver comunidades locais e indígenas, cientistas, funcionários do governo e muitos outros membros de comunidades dos trópicos. O processo de coprodução de conhecimento começou durante a definição do escopo do PANGEA e a redação do Livro Branco, que foi realizado em colaboração com líderes indígenas da Aliança Global de Comunidades Territoriais (GATC). Se o PANGEA for selecionado, a coprodução com os povos indígenas e as comunidades locais começará imediatamente e será mantida durante todo o processo. A abordagem do PANGEA em relação à ciência equitativa, à capacitação e ao treinamento enfrentará diretamente a questão das campanhas de sobrevoo e da ciência de paraquedas. Com base nos sucessos do LBA, acreditamos que o PANGEA pode publicar 100 artigos de cientistas da África como primeiro autor, contribuindo para fechar a lacuna do Índice de Paraquedas na África Central (Culotta et al., 2024). Esses cientistas africanos continuarão o legado do PANGEA, em colaboração com colegas internacionais nos trópicos, bem depois do fim do projeto. A Seção 8 do White Paper explica nossa abordagem ao envolvimento da comunidade. A seção 10.1.5 explica a composição da equipe científica. A Seção 10.2 discute as oportunidades de cofinanciamento porque a NASA está limitada a financiar instituições dos EUA. A seção 10.3 discute a abordagem do PANGEA para a Ciência Aberta que facilitará a transparência e a cooperação.

A maioria dos entrevistados da pesquisa relatou com entusiasmo que o PANGEA promoverá parcerias significativas com as partes interessadas (por exemplo, comunidades e governos locais). Um entrevistado enfatizou: "Sim, porque o PANGEA oferecerá informações às comunidades locais que ajudarão na tomada de decisões [sic]".

Separação de ecossistemas terrestres e aquáticos:

- "Ver os ecossistemas terrestres separados dos ecossistemas aquáticos pode dar uma visão tendenciosa de fenômenos como a mudança climática e o impacto sobre os seres humanos nas florestas tropicais devido à sua interconexão"

Os sistemas terrestres e aquáticos não estão separados na concepção do PANGEA. Talvez a maneira mais fácil de mostrar isso seja a falta de seções específicas dedicadas a questões científicas terrestres e aquáticas. Elas estão entrelaçadas. As paisagens do PANGEA conterão ambientes terrestres e aquáticos. Além disso, em nossas perguntas científicas 1 e 3, vinculamos implicitamente os ambientes terrestres e aquáticos por meio de fluxos laterais. Em outro exemplo, na pergunta 21, vinculamos a perturbação e o crescimento da floresta aos recursos de água doce.

Envolvimento de cientistas internacionais:

- "De acordo com minha leitura, é claro e compreensível. O que não está claro para mim é como nós (não americanos) podemos enviar projetos para a NASA."

A NASA só pode apoiar pesquisas em instituições dos EUA. Entretanto, assim como no LBA, procuraremos associar os estudos da NASA a parceiros locais que possam ter acesso a financiamento local. Além disso, buscaremos ativamente o cofinanciamento de organizações privadas que agora estão muito ativas no financiamento de pesquisas ambientais (Seção 10.2).

Envolvimento de governos estrangeiros:

- "A implementação de campanhas de pesquisa de campo não apresenta nenhuma dificuldade, exceto pelo relacionamento entre os governos."

Esse é um desafio para todas as pesquisas internacionais. A NASA tem muita experiência em suas muitas campanhas científicas aéreas e de campo. Consulte a [Seção 6.2.4](#) e o [Quadro 2](#).

Necessidade de maior clareza sobre os elementos científicos:

- "Objetivo 1: Caracterizar e quantificar as respostas heterogêneas das florestas tropicais às mudanças antropogênicas. E quanto à resposta das florestas tropicais a distúrbios naturais e causados pelo clima (por exemplo, tufões/furacões, secas, inundações, deslizamentos de terra, etc.)?"

A [seção 2.5](#) sobre dinâmica de distúrbios foi substancialmente revisada. Agora, tratamos não apenas os distúrbios antropogênicos, mas também os distúrbios naturais por meio dos mecanismos listados no comentário. Além disso, as [Seções 2.3](#) e [3.3.2](#) tratam de inundações.

- "O estudo do PANGAEA precisa melhorar a integração das interações entre a natureza e a sociedade. As ciências sociais e humanas precisam ser mais levadas em consideração"

O Livro Branco revisado inclui [seções](#) substancialmente revisadas que descrevem as principais questões para o estudo dos Sistemas Socioecológicos (SES) ([Seção 2.4](#)). Esse tema científico do PANGAEA investigará as interações e os feedbacks entre os sistemas sociais e ecológicos relacionados à produção e à segurança alimentar, às práticas culturais, aos meios de subsistência, às estratégias de gerenciamento e à resiliência dos sistemas tropicais.

- "Estamos no século da inteligência artificial, que está causando impacto em todas as áreas da vida e até mesmo na maneira como abordamos as questões de pesquisa atuais e futuras. Acho que esse aspecto precisa ser claramente definido no relatório."

Na [Seção 6.3.1](#) do White Paper revisado, enfrentamos essa questão diretamente. Por exemplo, o PANGAEA aproveitará os modelos de inteligência artificial e aprendizado de máquina (IA/ML) para a síntese de dados devido à sua robustez em lidar com não linearidades e interações entre processos multifatoriais e preditores. A IA/ML pode ser usada ainda para emular modelos baseados em processos e explorar com mais eficiência o espaço paramétrico dos modelos ou executar previsões de curto/longo prazo.

Falta de elementos experimentais no escopo do PANGAEA:

- "A [Seção 3](#) não inclui a inclusão de desvio de precipitação, fertilização com CO₂ ou experimentos de temperatura, enquanto a Q8, Q9, Q19 e Q23 dependem de experimentos para abordar essas questões."

A resposta do PANGAEA ao Programa de Ecologia Terrestre da NASA não considera explicitamente os experimentos com grandes ecossistemas. Esses são valiosos e podem ser cofinanciados por outras agências ou doadores privados, como foi o caso do experimento de seca Seca-Floresta realizado na Floresta Nacional do Tapajós, Brasil, apoiado por fundos da NSF como parte do LBA.

Exclusões do escopo do PANGEA:

- "Parece-nos que as florestas tropicais do Sudeste Asiático parecem ter sido excluídas do estudo do PANGEA, mas estamos falando de ecossistemas de florestas tropicais e melhorando nossa compreensão de como eles funcionam. Talvez questões orçamentárias, estratégicas ou geopolíticas pareçam estar em jogo aqui, mas acreditamos que levar em conta todas as regiões de florestas tropicais nos permitiria obter resultados mais holísticos e realizar modelagens que afetem todos os ecossistemas de florestas tropicais."
- "Os trópicos secos são deixados de fora, mas são tão importantes para o futuro do ciclo de carbono terrestre quanto os trópicos úmidos, mas são menos estudados e menos bem compreendidos."

As limitações de recursos não nos permitiriam realizar campanhas de campo em todas as regiões tropicais. Consulte a Seção 1.4 sobre o domínio do PANGEA. Incluímos um domínio estendido de florestas úmidas pantropicais, a área mais ampla de interesse científico, onde projetos adicionais podem ser realizados por meio de parcerias e onde serão conduzidas análises de satélite e modelagem.

Não afirmamos que os trópicos secos não sejam importantes, mas defendemos a importância das florestas úmidas nos ciclos globais de carbono e água. É improvável que qualquer outro bioma tropical tenha tanta importância para o carbono quanto as florestas úmidas. As florestas úmidas têm maior armazenamento de carbono e maiores fluxos de carbono do que outros biomas tropicais.

Na seção a seguir, respondemos a todos os comentários dos entrevistados da pesquisa, organizados pelas perguntas da pesquisa (Q1-Q13). As respostas da pesquisa são mostradas em tipo simples. [As respostas do PANGEA são mostradas em azul](#). Não respondemos às respostas da pesquisa em que a resposta era um simples "sim" ou "não". As respostas são geralmente organizadas com base na ordem em que foram recebidas. A ordem não corresponde à ordem dos respondentes listados no início deste documento. Em alguns casos, as respostas foram reordenadas para que pudéssemos fornecer uma única resposta a comentários semelhantes.

Q1. Quais são os principais pontos fortes do estudo de escopo do PANGEA?

1. Acredito que o esforço colaborativo do PANGEA é uma iniciativa proeminente que pode apoiar estratégias de conservação para o planeta e também integrará cientistas de todo o mundo em um esforço comum para proteger a biodiversidade.
2. *Ciclos biogeoquímicos, biodiversidade, interações e retroalimentações climáticas, sistemas socioecológicos e dinâmica das perturbações.* [Ciclos biogeoquímicos, biodiversidade, interações e retroalimentações climáticas, sistemas socioecológicos e dinâmica das perturbações.]
3. O estudo é bem organizado e multidisciplinar e reúne os estudos necessários para preencher as lacunas nesses ecossistemas altamente vulneráveis em nível global.
4. O PANGEA usará novas ferramentas para estudar a floresta tropical.
5. *C'est sur la collectes des données digitalisées* [Trata-se da coleta de dados digitalizados].
6. É uma integração de diferentes áreas; é um estudo multidisciplinar.

7. O principal ponto forte do estudo de escopo do PANGEA é o fato de a iniciativa se concentrar em uma área em que há muitas lacunas de conhecimento e em que o governo africano não tem meios financeiros e técnicos para trabalhar.
8. Achei excelente o foco nas florestas africanas; o PANGEA abordará incertezas absolutamente críticas sobre o papel do continente africano no sistema terrestre, sem excluir o papel central que a floresta amazônica desempenha.
9. Um dos principais pontos fortes do estudo de escopo do PANGEA está em sua abordagem minuciosa para abordar as lacunas em nossa compreensão das florestas tropicais. O estudo destaca a questão da representação inadequada em campanhas de campo, o que leva à representação errônea de propriedades físicas na dinâmica ambiental. O PANGEA tem como objetivo enfrentar esse desafio implementando uma campanha em várias escalas para descrever os processos biogeoquímicos em florestas tropicais, o que é outro ponto forte significativo. Os autores consideraram cuidadosamente as fontes de dados existentes e elaboraram um plano para priorizar e otimizar a coleta de dados, fazendo uso eficiente do tempo e dos recursos. Além disso, o PANGEA se baseia na experiência da campanha anterior de Ecologia Terrestre da NASA, o Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA), oferecendo uma oportunidade de aprimorar os modelos globais da NASA por meio da coleta de dados espaço-temporais mais abrangentes sobre a dinâmica global.
10. A clareza das perguntas da pesquisa. O estado atual do conhecimento sobre os tópicos a serem explorados. Os parceiros envolvidos nas várias regiões de estudo. Perspectivas de treinamento e educação da próxima geração de cientistas.
11. Os temas científicos são abrangentes e abordam os aspectos mais importantes da dinâmica dos ecossistemas tropicais e suas implicações climáticas e socioecológicas. As lacunas de conhecimento e as questões são claramente identificadas com a contribuição da comunidade.
12. O PANGEA foi perspicaz ao escolher preencher as lacunas de campanhas anteriores e incluir a abordagem de dados quase inexistentes para algumas florestas tropicais. O uso de satélites está se tornando essencial para a maioria dos estudos científicos ambientais e para a tomada de decisões e, portanto, sua precisão nessas aplicações de pesquisa se tornou primordial. Sabe-se que mesmo a representação de modelos em florestas, devido à diferença nos processos convectivos, apresenta grande dificuldade nas parametrizações, gerando respostas com desvios padrão muito grandes. Campanhas executadas de forma não otimizada e falta de dados específicos complicam ainda mais muitos dos estudos existentes. A análise e a comparação de florestas que apresentam comportamentos diferentes serão de grande valia para a comunidade científica no avanço dos estudos sobre o futuro do nosso planeta. A proposta parece ser bem-sucedida em oferecer uma oportunidade para a nova geração de cientistas e propor a criação de um banco de dados aberto. Fiquei imensamente feliz em saber que essa proposta potencialmente abre portas além das instituições acadêmicas e espaciais, para tomadores de decisão, comunidades e qualquer outra pessoa interessada em ajudar.
13. A base científica, o escopo amplo com áreas de foco claras, o plano bem desenvolvido de uso de satélites, o plano de modelagem bem desenvolvido, a inclusão de muitas comunidades locais e o plano de envolvimento bem desenvolvido, o plano de implementação e o plano de capacitação e educação.

14. O foco é aumentar a observação e a compreensão de alguns dos ecossistemas mais desconhecidos e vulneráveis. O PANGEA aborda uma lacuna e um desafio bem conhecidos da pesquisa em ciências da terra: a falta de dados e de conhecimento sobre os trópicos.
15. A inclusão de um foco principal em sistemas tropicais na África é um ponto forte. A equipe diversificada associada ao projeto é impressionante, especialmente os conjuntos de habilidades diversificados e complementares dos membros da equipe. Há uma forte compreensão das vantagens/desvantagens em várias escalas das diversas abordagens de sensoriamento remoto apresentadas. Como conheço o trabalho de muitos dos membros da equipe, não estou surpreso com isso, mas sim entusiasmado com a forma como essas questões são apresentadas e abordadas. A incorporação de várias fontes de dados de sensoriamento remoto pode ser complicada, e este documento detalha como abordar isso dentro do contexto das questões científicas de forma completa e cuidadosa, o que mostra um grande potencial para o sucesso desse componente do projeto. Gosto muito da estrutura ideal, de linha de base e de limite que é usada em todo o documento. As tabelas um e quatro são as mais abrangentes desse tipo (e fáceis de ler) que já vi. Pelo que pude perceber, essa é uma consideração sólida sobre o trabalho com parceiros locais, o que é essencial para esse tipo de ciência.
16. O PANGEA é um programa de pesquisa extremamente ambicioso, porém viável, que abordará um dos maiores desafios que enfrentamos atualmente: compreender os padrões, os processos e a heterogeneidade que regem as florestas tropicais em todo o mundo.
17. Pude ver os pontos fortes do estudo em dois níveis:
 - a. O primeiro é o fato de ter conseguido reunir uma vasta comunidade científica de vários horizontes, para não dizer de todos os horizontes da Terra. Todos os cientistas de países tropicais e de outras regiões do mundo parecem estar representados, o que garante que a maioria dos pontos de vista seja levada em conta para abordar as principais questões que representam desafios para uma compreensão adequada do funcionamento dos ecossistemas tropicais.
 - b. O segundo ponto forte do estudo é que ele leva em conta as principais questões enfrentadas pela humanidade que estão diretamente ligadas ao funcionamento dos ecossistemas florestais tropicais: esse é um ponto forte do estudo exploratório do PANGEA. De fato, as mudanças climáticas (que englobam muitas outras questões levadas em conta no estudo, como desmatamento, mudanças no uso da terra, secas, ciclo de carbono etc.) e a biodiversidade estão entre os principais problemas que representam grandes desafios para a humanidade e para a vida no planeta Terra.
18. O PANGEA foi perspicaz ao escolher preencher as lacunas de campanhas anteriores e incluir a abordagem de dados quase inexistentes para algumas florestas tropicais. O uso de satélites está se tornando essencial para a maioria dos estudos científicos ambientais e para a tomada de decisões e, portanto, sua precisão nessas aplicações de pesquisa se tornou primordial. Sabe-se que mesmo a representação de modelos em florestas, devido à diferença nos processos convectivos, apresenta grande dificuldade nas parametrizações, gerando respostas com desvios padrão muito grandes. Campanhas executadas de forma não otimizada e falta de dados específicos complicam ainda mais muitos dos estudos existentes. A análise e a comparação de florestas que apresentam comportamentos diferentes serão de grande valia para a comunidade científica no avanço dos estudos sobre o futuro do nosso planeta. A proposta parece ter sido bem-sucedida em oferecer uma oportunidade para a nova geração de cientistas e propor a

criação de um banco de dados aberto. Fiquei imensamente feliz em saber que essa proposta potencialmente abre portas além das instituições acadêmicas e espaciais, para tomadores de decisão, comunidades e qualquer outra pessoa interessada em ajudar.

19. São eles: o conceito desenvolvido em torno das medições essenciais ideais, de linha de base e de limite necessárias para atingir as metas definidas; a abordagem de inclusão e, por fim, o envolvimento de cientistas locais, que garantirá a sustentabilidade do estudo após essa campanha.
20. Acredito que o projeto tem muitos pontos fortes, entre os quais eu poderia citar objetivos bem desenvolvidos que buscam avançar o conhecimento e melhorar os métodos de compreensão das florestas tropicais, uma equipe grande e competente e uma série de organizações parceiras que ajudarão a operacionalizar essas ideias.
21. Envolvimento da comunidade, perspectiva intercontinental e ênfase no papel das floras de árvores divergentes na condução da variabilidade intercontinental na função do ecossistema
22. Trata-se de um enorme escopo de trabalho que contará com a ajuda e a execução de vários grupos de trabalho, bem como de nativos das áreas a serem pesquisadas. Depois de lê-lo com atenção, o projeto parece bem amarrado. À medida que a pesquisa se desenvolve, podem ser necessários aprimoramentos específicos, mas, de modo geral, a proposta está muito bem estruturada.

[Agradecemos os comentários acima, mas não temos nenhuma resposta direta a eles.](#)

Q2. Quais áreas do estudo PANGEA precisam ser aprimoradas?

- Ele é mostrado como um projeto colaborativo entre cientistas. Ele também inclui o conhecimento nativo local e indígena dos ecossistemas. Tenho dúvidas se as populações locais fazem parte da equipe colaborativa ou se são meras receptoras dos resultados.

[Desde o início, o PANGEA tem se esforçado muito para envolver as comunidades locais e indígenas. O processo de coprodução de conhecimento começou durante a definição do escopo do PANGEA e a redação do white paper, que foi realizado em colaboração com líderes indígenas da Aliança Global de Comunidades Territoriais \(GATC\). Se o PANGEA for selecionado, a coprodução com os povos indígenas e as comunidades locais começará imediatamente e será mantida durante todo o processo.](#)

- A implicação das mulheres em atividades de sequestro de carbono.

[O PANGEA fez um grande esforço para incluir as mulheres em todas as atividades de definição do escopo. Não abordamos especificamente as atividades das mulheres no sequestro de carbono em nosso relatório de escopo. Essa é uma das muitas preocupações específicas que podem surgir nos projetos de pesquisa. Nosso White Paper, embora abrangente, ainda é limitado em termos de espaço.](#)

- *Sur le plan local national régional international et mondial* [Sobre o plano local, nacional, regional, internacional e global]

- Ser mais coerente e específico com relação ao alinhamento da capacitação com o plano de ação do governo africano, página 15 / 61.
- Na República Democrática do Congo, por exemplo

O PANGEA se engajou amplamente na África, América do Sul e Ásia, conforme detalhado no *Apêndice C do White Paper*.

- Como podemos promover a integração interdisciplinar e como a população local será integrada ao projeto para participar ativamente? Como é a ideia de aprimorar o treinamento, a educação e a ciência?

O White Paper foi formado por uma equipe altamente diversificada, conforme detalhado no *Apêndice C*. Em particular, reconhecemos a importância da equipe diversificada para o aprimoramento do treinamento e da educação. A abordagem do PANGEA em relação à ciência equitativa, à capacitação e ao treinamento enfrentará diretamente a questão das campanhas de sobrevoo e da ciência de paraquedas. Com base nos sucessos do LBA, acreditamos que o PANGEA pode publicar 100 artigos de primeira autoria de cientistas da África, contribuindo para fechar a lacuna do Índice de Paraquedas na África Central (Culotta et al., 2024). Esses cientistas africanos continuarão o legado do PANGEA, em colaboração com colegas internacionais nos trópicos, bem depois do fim do projeto.

- Mais interesse nas interações entre a natureza e as sociedades

O Livro Branco revisado inclui seções substancialmente revisadas que descrevem as principais questões para o estudo dos sistemas socioecológicos (SES) (*Seção 2.4*). Esse tema científico do PANGEA investigará as interações e os feedbacks entre os sistemas sociais e ecológicos relacionados à produção e à segurança alimentar, às práticas culturais, aos meios de subsistência, às estratégias de gerenciamento e à resiliência dos sistemas tropicais.

- *Seção 3.1.1 Estoques e fluxos de carbono:* Acho que essa seção não representa uma limitação séria das abordagens atuais para monitorar os ecossistemas terrestres nos trópicos. O ciclo de carbono nesses ecossistemas é aproximadamente equilibrado, mas, devido aos grandes estoques e fluxos (GPP, respiração e queima de biomassa), pequenas mudanças no equilíbrio desses processos podem ter grandes consequências no balanço global de carbono. Mesmo medições perfeitas de CO₂ provavelmente não fornecerão muitas informações úteis sobre os processos do ciclo de carbono, mas a capacidade preditiva de nossos modelos do Sistema Terrestre se baseia em sua capacidade de modelar a GPP e a respiração. Esses modelos de processo são pouco limitados (se é que o são) nos trópicos pelos sistemas de monitoramento atuais. Diferentemente dos ecossistemas temperados, que apresentam grandes variações sazonais na troca líquida de CO₂, os ecossistemas tropicais apresentam pouca variação sazonal porque a GPP e a respiração tendem a ser praticamente iguais ao longo do ano. Portanto, o CO atmosférico₂ é quase constante nos trópicos, apesar da presença de enormes fluxos brutos. Além disso, é difícil separar as tendências regionais do "ruído" do ciclo de carbono devido às diferenças diárias na nebulosidade ou ao efeito retificador diurno (Denning et al., 1995) na concentração de CO₂.
- Há uma possível solução, o sulfeto de carbonila (OCS). Esse gás traço rastreia o GPP, enquanto o CO₂ rastreia o NEE. Isso ocorre porque o OCS é absorvido pelas folhas, mas não

há (ou há muito pouca) liberação de OCS dos ecossistemas terrestres. Há vários anos, propusemos que o OCS poderia fornecer uma nova janela para o ciclo do carbono, especialmente nos trópicos (Berry et al., 2013). As medições feitas pelos satélites MIPAS (Stinecipher et al., 2022) e TES (Wang et al., 2023) mostraram um esgotamento significativo da concentração de OCS na troposfera superior. Nos últimos dois anos, o grupo de Luciana Gatti no INPE realizou mais de 800 medições de OCS em frascos (juntamente com outros gases de efeito estufa) a partir de perfis de aeronaves sobre a Bacia Amazônica. Como esperado, essas medições mostram gradientes muito maiores (10 a 100 vezes) na concentração relativa de OCS do que na de CO₂. O OCS é, portanto, uma base melhor para a realização de inversões atmosféricas e pode fornecer informações diretas sobre GPP e respiração. As medições por satélite, os perfis de aeronaves e, possivelmente, a espectrometria FT-IR de observação solar (Hannigan et al., 2021) são abordagens promissoras para a criação de um programa de monitoramento do ciclo de carbono baseado no OCS nos trópicos.

Referências:

- 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: Uma possível nova janela para o ciclo do 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*. 27 de fevereiro de 2022; 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 May 16; 49(9). doi:10.1029/2021GL096802
- 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 (Variações de sulfeto de carbonila durante as estações seca e úmida na Amazônia). *Geophysical Research Letters*. 2023 Mar 16;50(5):e2022GL101717.

[O comentário levanta uma questão crítica no estudo das florestas tropicais que também enfrentamos em nosso White Paper. Para responder melhor à questão específica do uso da variação das taxas de mistura atmosférica de sulfeto de carbonila \(COS\) para restringir a GPP, incluímos a importância potencial dessa medição na Seção 2.2.](#)

- Uma área que poderia ser melhorada no estudo do PANGEA é a falta de uma estratégia clara para ampliar os resultados espacialmente. Embora isso possa estar fora do escopo atual do estudo ou ser prematuro, já que ainda se trata de uma proposta, é importante considerar como as descobertas serão comunicadas ao público em geral. Um fator fundamental para o sucesso de projetos globais como o MODIS tem sido sua capacidade de destilar a

complexidade do mundo em alguns fatores principais. Por exemplo, o produto MODIS LAI classifica as copas das árvores com base em seis tipos de biomas, oferecendo uma visão global simplificada, porém eficaz, para não especialistas. No entanto, esses modelos geralmente classificam ou representam mal os biomas devido à insuficiência de dados, o que ressalta a importância dos resultados do PANGEA para preencher essas lacunas.

As lições do MODIS são altamente relevantes. O PANGEA fornece uma estrutura para dimensionar e integrar medições aéreas e de satélite com observações de campo in situ, medições de torres de fluxo de variação de Foucault e modelos para promover a compreensão científica e os recursos de sensoriamento remoto em áreas temáticas que abordam diretamente as metas da Área de Foco de Ecossistemas e Ciclo de Carbono da NASA, em alinhamento com as Áreas de Foco de Variabilidade e Mudança Climática e Ciclo de Água e Energia. O PANGEA estabelecerá uma rede de campanhas coordenadas de campo e aerotransportadas distribuídas em ecossistemas florestais tropicais específicos para preencher lacunas de dados e permitir o dimensionamento entre conjuntos de dados de campo e de sensoriamento remoto, bem como modelagem em escala regional e pantropical. Conforme o comentário, abordagens específicas de dimensionamento serão desenvolvidas como parte do Plano de Experimento Conciso e por meio das propostas e atividades da Equipe Científica.

- Com relação à dinâmica do carbono, vejo três áreas principais que precisam ser aprimoradas:
 - o Falta de medições de gases traço no ar para informar o balanço de carbono em escala de bacia
 - o Falta de um plano concreto para quantificar os componentes do fluxo de carbono em escala de bacia, ou seja, fotossíntese, respiração e emissões de fogo
 - o Falta de foco na estação chuvosa
- Essas áreas ausentes são essenciais para o objetivo declarado do PANGEA de "Restringir a incerteza do modelo das previsões futuras do fluxo de carbono tropical" (linha 312, página 10).
- O componente científico aerotransportado do PANGEA atualmente se concentra exclusivamente em observações de sensoriamento remoto aerotransportado (Seção 6.2.3, página 64), sem menção a observações de gases traços (por exemplo, CO₂, CO e CH₄) para informar a quantificação do fluxo de carbono em escala continental. Sem essas medições, é improvável que reduzamos a grande incerteza no balanço líquido de carbono em escala de bacia e nos componentes do fluxo de carbono ou que transformemos a compreensão da dinâmica de carbono em escala continental nos trópicos. Vale ressaltar que algumas inversões atmosféricas globais já assimilam as concentrações médias de CO₂ observadas na coluna por satélite (por exemplo, OCO-2 MIP). Essas inversões têm incertezas maiores nos trópicos do que na latitude média, devido à frequente cobertura de nuvens na estação úmida, à sazonalidade mais fraca e ao sinal menor dos fluxos líquidos de carbono, além da falta de redes de torres in situ e observações aéreas. Se o PANGEA recorrer ao uso exclusivo de concentrações médias de CO₂ observadas por satélite na coluna para restringir o orçamento de carbono da Amazônia e da África tropical, não haverá avanço em comparação com o estado atual do campo, e isso, para mim, é uma oportunidade perdida.

- Também gostaria de observar que as medições de gases traços aerotransportados desempenharam um papel fundamental em campanhas de campo anteriores da NASA, como as medições do perfil vertical de Manaus durante o LBA (<https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1175>) e as medições de gases traços aerotransportados CARVE e Arctic-CAP durante o ABoVE (Sweeney et al., 2022). Essas medições de gases traços ajudam a identificar grandes emissões de metano na Amazônia oriental (Miller et al., 2007) e no Alasca boreal (Chang et al., 2014) e revelam padrões de fotossíntese e respiração em escala biológica, que diferem das simulações de modelos da biosfera terrestre (Commane et al., 2017; Hu et al., 2021). Os desafios com as observações de gases de efeito estufa baseadas em satélites nos trópicos (Frankenberg et al., 2024) devem motivar mais observações de gases traços no ar para complementar a visão dos satélites. É certo que o PANGEA pode não repetir necessariamente o que o LBA e o ABoVE fizeram, mas, dada a escassez de medições de gases traços in situ provenientes da Amazônia e da África tropical, seria negligente não considerar os valores exclusivos das medições de gases traços aéreos para a pesquisa do ciclo de carbono.
- Também pode ser útil para o PANGEA identificar instituições colaboradoras locais na coleta de medições de gases traços aéreos. Por exemplo, grande parte do avanço recente na compreensão do balanço de carbono da Amazônia se baseia em medições de gases traços aéreos coletados pelo grupo de Luciana Gatti no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais do Brasil (Gatti et al., 2014, 2021, 2023). Isso significa que o PANGEA talvez não precise começar do zero para fazer essas medições; já existem parceiros locais nos quais se apoiar. Aproveitar as parcerias locais parece ser fundamental para facilitar as medições de gases traços transportados pelo ar, que exigem muita mão de obra e são essenciais para a compreensão da dinâmica do carbono em escala de bacia.

Uma das barreiras ao uso eficaz dos dados atuais de abundância da coluna total de satélites para gases residuais é a falta de dados eficazes de calibração e validação nos trópicos (Seção 3.1.1). O comentário defende medições aéreas adicionais de gases traços que reconhecemos na Seção 3.1.1.

- Em uma observação relacionada, também não há indicação de como as campanhas planejadas de sensoriamento remoto aéreo e as observações de satélite ajudarão a resolver o problema de particionar a fotossíntese e a respiração do balanço líquido de carbono. A quantificação separada da fotossíntese e da respiração é importante porque elas respondem de forma diferente ao clima e essa questão tem sido o cerne da incerteza do modelo nas projeções futuras do ciclo de carbono nos trópicos. As medições de concentração e fluxo de CO₂ não podem restringir exclusivamente a fotossíntese e a respiração ao mesmo tempo. Embora o white paper do PANGEA cite a fluorescência da clorofila induzida pelo sol (SIF) como um indicador da fotossíntese, a SIF não pode restringir a magnitude da assimilação do carbono fotossintético porque os modelos atuais baseados na SIF dependem de relações estatísticas em nível local entre a SIF e a fotossíntese. Observações simultâneas de um conjunto de gases traços do ciclo de carbono, incluindo isótopos de carbono e oxigênio (13C-CO₂ e 18O-CO₂), sulfeto de carbonila e monóxido de carbono, são necessárias para restringir totalmente os principais componentes do fluxo de carbono e informar os processos do ciclo de carbono nos modelos. Há exemplos bem-sucedidos do uso de medições de gases traços

do CARVE para restringir separadamente a fotossíntese e a respiração no domínio ABoVE (Hu et al., 2021; Kuai et al., 2022), portanto, isso não é impossível.

Conforme observado na resposta ao item (9) acima, consideramos o sulfeto de carbonila. Além disso, listamos CO, COS e isótopos entre as possíveis medições para resolver questões de partição de carbono.

- Meu último ponto para essa pergunta diz respeito à estação úmida. Fico perplexo com o fato de o PANGEA limitar as medições ao "início da estação seca" e ao "final da estação seca" sem considerar medições contínuas ao longo das estações seca e úmida (linha 477-484, página 15). Em primeiro lugar, não teremos um conhecimento preciso do balanço de carbono em uma região tropical se tivermos lacunas de medição na metade do tempo. Em segundo lugar, a visão limitada da dinâmica do carbono na estação úmida a partir de satélites de gases de efeito estufa (Frankenberg et al., 2024) deve exigir mais medições, e não menos, na estação úmida. Terceiro, os distúrbios da estação úmida, como a derrubada de árvores pelo vento, são as principais vias de perda de biomassa acima do solo. Embora existam desafios logísticos com a estação úmida, deixar isso completamente de fora é novamente uma oportunidade perdida.

A terminologia "início da estação seca" e "fim da estação seca" era confusa e, por isso, foi alterada. O objetivo do cronograma da campanha é capturar a floresta quando ela estiver fisiologicamente bem irrigada (fim da estação úmida) e no momento em que ela estiver com maior estresse hídrico (fim da estação seca). Para equilibrar os custos e benefícios das missões aéreas para observações de sensoriamento remoto de superfície usando sensores ópticos, acreditamos que é prudente evitar o pico da estação úmida. No entanto, destacamos a importância de medições contínuas em locais de campo para cobrir a gama de condições sazonais. Além disso, defendemos o potencial das medições feitas por drones para também fornecer cobertura sazonal em áreas limitadas.

Referências

- 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). Methane emissions from Alaska in 2012 from CARVE airborne observations (Emissões de metano do Alasca em 2012 a partir de observações aéreas do CARVE). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 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). Fontes de dióxido de carbono do Alasca impulsionadas pelo aumento da respiração no início do inverno da tundra do Ártico. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 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). Seca de dados nos trópicos úmidos: How to Overcome the Cloud Barrier in Greenhouse Gas Remote Sensing (Como superar a barreira das nuvens no

sensoriamento remoto de gases de efeito estufa). *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). Drought sensitivity of Amazonian carbon balance revealed by atmospheric measurements (Sensibilidade do balanço de carbono amazônico à seca revelada por medições 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). A Amazônia como fonte de carbono ligada ao desmatamento e às mudanças climáticas. *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). Aumento das emissões de carbono na Amazônia principalmente devido ao declínio na aplicação da lei. *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). As relações de GPP derivadas do COS com a temperatura e a luz ajudam a explicar o CO atmosférico de alta latitude: amplificação do ciclo sazonal. *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 (Medições aerotransportadas indicam grandes emissões de metano da bacia amazônica oriental). *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). Usando perfis verticais de gases traços atmosféricos para avaliar fluxos de modelos: Um estudo de caso das observações do Arctic-CAP e simulações GEOS para o domínio ABoVE. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(9), 6347-6364. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6347-2022>

- Não ficou claro para mim até que ponto as zonas de transição de floresta tropical para subtropical seriam estudadas como substitutos para as condições futuras ou os impactos das mudanças na superfície da terra sobre a função da floresta tropical. O delineamento da floresta tropical na Figura 6 é claro, mas se PANGEA significa "pan-tropical", e dado o papel extraordinário do desmatamento tropical em todos os sistemas de estudo, não ficou claro para mim como os sistemas de savana/cerrado, desmatamento, agricultura ou pastagens poderiam ser integrados para melhorar nossa compreensão do papel exclusivo das próprias florestas tropicais. As florestas do Continente Marítimo e do Sudeste Asiático fornecem um contexto essencial para outros sistemas de florestas tropicais, mas também compreendem a necessidade de manter o escopo dentro do razoável, e esses sistemas tropicais serão integrados ao estudo.

Como o comentário indica, a gama potencial de estudos do PANGEA é vasta. Na versão preliminar do White Paper, usamos o termo "trópicos" de forma vaga. No entanto, nossa proposta de estudo se concentra em florestas tropicais úmidas. Isso agora está esclarecido na Seção 1.4.

- Trata-se de um enorme escopo de trabalho que contará com a ajuda e a execução de vários grupos de trabalho, bem como de nativos das áreas a serem pesquisadas. Depois de lê-lo com atenção, o projeto parece bem amarrado. À medida que a pesquisa se desenvolve, podem ser necessários aprimoramentos específicos, mas, de modo geral, a proposta está muito bem estruturada.
- Uma coisa que me vem à mente é que o projeto é bastante ambicioso em termos do fôlego das questões científicas que pretende abordar.

Concordamos que o escopo é grande, e é por isso que contamos com parcerias desde o início do trabalho de definição do escopo. Também estamos explorando ativamente o cofinanciamento (Seção 10.2).

- O envolvimento de universidades locais e centros de pesquisa/laboratórios nacionais. A partir dos locais de estudo (equipados com covariância de Foucault) mencionados, parece que essas torres de CE são aquelas em que os Pis são dos EUA; no entanto, pode haver outros. Outro ponto de interesse que pode ser melhorado é considerar o México. Há pelo menos dois locais de CE na área de interesse do PANGEA:
 - o El Palmar, em Yucatán (ref: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JG005629>) La Orduña, em Veracruz (ref: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JG004911>) Calakmul, em Campeche (em construção, mas deve entrar em operação em 2025),
 - o Outros locais de estudo em operação em florestas tropicais secas em Sonora, o limite superior de distribuição inclui: Alamos, em Sonora (<https://ameriflux.lbl.gov/sites/siteinfo/MX-Aog>).
 - o Dito isso, acredito que envolver os atores locais (ou seja, a MexFlux) no white paper será valioso, pois eles serão reconhecidos e poderá melhorar as colaborações.

Esses são comentários valiosos que serão considerados se formos selecionados para desenvolver um plano operacional, especialmente em relação aos pesquisadores ativos na

MexFlux e nos locais de florestas úmidas. Observamos que as florestas secas estão fora do escopo do PANGEA.

- Fraqueza da abordagem de dados abertos quase em tempo real: O compartilhamento de dados abertos no contexto da pesquisa em ciências do sistema terrestre só é útil se significar a troca livre e irrestrita de dados de observação em tempo real. Qualquer outro tipo de compartilhamento de dados que permaneça restrito apenas aos membros do PANGEA ou que exija um longo intervalo de tempo para o compartilhamento de dados não será capaz de proporcionar os benefícios alegados nesta proposta. A NASA está bem ciente dos benefícios do compartilhamento global de dados abertos em tempo real, pois graças a isso conseguimos revolucionar a previsão do tempo e aproveitar totalmente o poder do sensoriamento remoto para a previsão do tempo. Os avanços na previsão do tempo não poderiam ter sido alcançados sem um compromisso global com o compartilhamento de dados meteorológicos em tempo real (consulte a Resolução da Política Unificada de Dados da Organização Meteorológica Mundial). O mesmo princípio se aplica às informações acionáveis sobre o clima e o ciclo de carbono nos trópicos (oportunas e rotineiras). O PANGEA deve apresentar uma proposta de mudança de paradigma mais explícita sobre o compartilhamento de dados "reais" e não temer essa discussão. Sem o compartilhamento de dados livre e irrestrito em tempo real como um princípio central do PANGEA, seu potencial para transformar a pesquisa nos trópicos por meio do aproveitamento da missão da NASA permanecerá ilusório.

Há aplicativos em que os dados precisam estar disponíveis em tempo real ou quase em tempo real, como a previsão do tempo. Entretanto, isso não se aplica a todas as análises. É difícil argumentar a favor de dados quase em tempo real quando o assunto é a variabilidade interanual ou interdecadal no fluxo de carbono do ecossistema. O PANGEA está comprometido com os princípios da Ciência Aberta da NASA e fornecerá dados abertamente o mais rápido possível com restrições de custo razoáveis. As defasagens no compartilhamento de dados serão minimizadas, mas não é possível aplicar um critério quase em tempo real ou em tempo real para todos os dados.

- Abordagem "ingênua" dos desafios de trabalhar nos trópicos: A proposta aborda os desafios da observação dos trópicos, mas faz uma leitura fraca e ingênua sobre como o PANGEA abordará esses desafios. Há um motivo pelo qual a observação terrestre da floresta tropical permaneceu limitada. O PANGEA parece entender esses motivos, mas não informa como esses desafios serão superados. A afirmação na Seção 7.6 de que o PANGEA usará "MOUs" para superar as dificuldades das campanhas de observação nos trópicos parece uma compreensão ingênua do tamanho dos desafios. A proposta precisa de uma abordagem e de uma definição muito mais robustas das medidas críticas que o PANGEA implementará para superar as interrupções físicas, operacionais e socioeconômicas, que são muito prováveis nos locais onde o PANGEA irá operar. O envolvimento de instituições governamentais reais (não apenas instituições de pesquisa) dos principais domínios do PANGEA parece bastante fraco. Sem compromissos claros dos países e de seus governos, a obtenção de redes de observação funcionais e contínuas em locais como a Bacia do Congo ou a Amazônia parece ser um programa de alto risco que a NASA pode não estar disposta a financiar se as garantias adequadas não forem implementadas no início da concepção do programa.

A NASA tem ampla experiência em cooperação científica internacional. A NASA foi uma das principais participantes do LBA, que teve enorme sucesso em descobertas científicas, no fortalecimento da ciência brasileira por meio do desenvolvimento de recursos humanos e na construção de confiança e relacionamentos de longo prazo entre pesquisadores que persistem até hoje. O foco em uma frase sobre MOUs (necessários para campanhas aéreas) desconsidera tanto a história da pesquisa da NASA em florestas tropicais quanto o processo que o PANGEA adotou para criar um diálogo inclusivo (consulte a Seção 8 sobre o envolvimento da comunidade). É certo que as operações em países tropicais com capacidade de governança e infraestrutura limitadas são desafiadoras. Não negamos esses desafios, mas o autor do comentário pode não estar ciente dos sucessos anteriores da NASA e de seus parceiros, o que torna plausível a probabilidade de sucesso no PANGEA.

- Caminho para a ação: Está claro que o PANAGEA é uma proposta de pesquisa. No entanto, a seção sobre Ciências da Terra para a Ação e o pilar três do PANGEA sobre o caminho para a ação parecem fracos e fora de contato com os processos multilaterais atuais mais relevantes para a ação global sobre mudanças climáticas e observações da Terra. A descrição das organizações relevantes nas Seções 7 (Tabela 5) e 8 parece um tanto aleatória. Ela não parece refletir o resultado de um exercício de revisão sistemática para entender o cenário global das organizações que trabalham para melhorar as observações da Terra nos trópicos. As principais organizações das Nações Unidas, como a Organização Meteorológica Mundial (que atualmente lidera o desenvolvimento do Global Green House Gas Watch) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (principal agente de investimentos em gestão e uso da terra nos trópicos), estão ausentes. A UNFCCC é pouco mencionada (mencionada em seções de pouca relevância para o que essa organização faz), apesar de ser a organização mais importante que precisa dos resultados científicos do PANGEA para informar os compromissos globais sobre a mitigação do clima e nosso orçamento de carbono.

O comentarista faz uma excelente observação. A seção preliminar sobre Earth Science to Action era muito genérica. Essa seção (Seção 9) foi substancialmente editada. Ela agora discute uma estratégia mais holística com mais detalhes.

- De antemão, não há problemas evidentes aqui, portanto, considere esses pontos como secundários. Na seção que descreve os ciclos biogeoquímicos, o único ciclo realmente considerado é o do carbono - apenas com foco em CO₂ e CH₄ principalmente. Na seção seguinte, no entanto, é apresentada uma imagem mapeada de um dos trabalhos de Dana Chadwick que mostra concentrações mapeadas de Ca etc. no dossel (tirada de imagens hiperespectrais, acho que foi correlacionada com o conteúdo de nutrientes das folhas). Há espaço aqui para possivelmente incorporar o ciclo de N e P que pode ser adicionado a esse projeto, especialmente considerando a transferência que ocorre entre o movimento atmosférico de P (acredito que a poeira do Saara) que é soprada para as Américas. No entanto, não tenho conhecimento do quanto isso afeta diretamente a Amazônia, pois é uma consideração maior para a região de Yucatán e a transferência da África vem muito ao norte das regiões florestais da África. No entanto, há alguma maneira de talvez considerar a biogeoquímica adicional além do C, reconhecendo que isso exigiria uma amostragem terrestre muito maior e que as abordagens de sensoriamento remoto para dimensionar essas estimativas são limitadas ou propensas a erros elevados.

Essa observação sobre a versão preliminar do White Paper está correta. E tomamos medidas para incluir a discussão de outros ciclos biogeoquímicos no documento revisado, com atenção especial ao nitrogênio e ao fósforo.

- A seção de distúrbios apresenta uma dicotomia de distúrbios naturais versus distúrbios induzidos pelo homem. Considere o papel que a seca tem no aumento do potencial de incêndios humanos (por exemplo, a seca seca as regiões florestais, criando uma maior probabilidade de que as pessoas queimem essa área para desmatamento simplesmente porque suas chances de sucesso são maiores). Essa seção não considera necessariamente a dinâmica de distúrbios de forma tão completa. Mas talvez isso se deva ao fato de essas dinâmicas serem menos bem compreendidas na África, o que seria uma vantagem para esse projeto, como poderemos descobrir! - Os dados do ICESat-2 poderiam ser usados para acrescentar dados estruturais adicionais sobre as florestas da região - eu os vejo na Tabela 2, portanto, sei que estão no "radar" (minha opinião pessoal sobre isso!)

Os distúrbios naturais e humanos diretos são separados para maior clareza da exposição. Entretanto, as interações entre clima e fogo são bem reconhecidas. Por exemplo, as interações de altas temperaturas, secas e incêndios são um foco significativo na discussão da ciência do PANGEA (por exemplo, Q26).

- Isso está além do escopo do estudo do PANGEA, dado o escopo da chamada da NASA, mas analisar os processos abaixo do solo - nutrientes, dinâmica de carbono, biomassa de plantas e alocação de NPP para raízes, enzimas, exsudatos e simbiontes - é importante para compreender os processos que regulam as florestas tropicais. Menciono isso não como uma crítica ao PANGEA, mas como um comentário sobre o escopo da chamada da NASA de forma mais ampla.

Agradecemos o fato de o comentarista reconhecer que a NASA também tem limitações.

- Parece-nos que as florestas tropicais do Sudeste Asiático parecem ter sido excluídas do estudo do PANGEA, embora estejamos falando de ecossistemas de florestas tropicais e melhorando nossa compreensão de como eles funcionam. Talvez questões orçamentárias, estratégicas ou geopolíticas pareçam estar em jogo aqui, mas acreditamos que levar em conta todas as regiões de florestas tropicais nos permitiria obter resultados mais holísticos e realizar modelagens que afetem todos os ecossistemas de florestas tropicais.
- Os trópicos secos são deixados de fora, mas são tão potencialmente importantes para o futuro do ciclo de carbono terrestre quanto os trópicos úmidos, mas são menos estudados e menos bem compreendidos.

As limitações de recursos não nos permitiriam realizar campanhas de campo em todas as regiões tropicais. Consulte a Seção 1.4 sobre o domínio do PANGEA. Incluímos um domínio estendido de florestas úmidas pantropicais, a área mais ampla de interesse científico, onde projetos adicionais podem ser realizados por meio de parcerias e onde as análises de satélite e modelagem serão enfatizadas. Não sabemos ao certo quais áreas o autor do comentário inclui nos trópicos secos, mas defendemos a importância das florestas úmidas. Parece improvável, por exemplo, que qualquer outro bioma tropical possa ter tanta importância para o carbono quanto as florestas úmidas.

- Considere a identificação dos drivers a serem preenchidos para as principais lacunas identificadas (consulte as linhas 426-427) página 55 / 61

Nem os números das páginas nem os números das linhas parecem consistentes com o texto do comentário. Não foi possível responder a esse comentário.

Q3. A estrutura geral e o conteúdo do relatório do estudo de escopo do PANGEA foram claros e compreensíveis? Forneça exemplos específicos de seções/conceitos que não ficaram claros. Cite os números de página/linha, quando apropriado.

- Não está claro para mim o processo de coleta de dados e o relacionamento entre os cientistas nos Estados Unidos e as comunidades na América Latina e na África
- De acordo com minha leitura, isso é claro e compreensível. O que não está claro para mim é como nós (não americanos) podemos enviar projetos para a NASA.

O PANGEA é um projeto colaborativo em que os participantes dos Estados Unidos trabalharão em conjunto com participantes de países tropicais como parceiros iguais. A NASA só pode apoiar pesquisas em instituições dos EUA. Entretanto, assim como no LBA, procuraremos associar os estudos da NASA a parceiros locais que possam ter acesso a financiamento local. Além disso, buscaremos ativamente o cofinanciamento de organizações privadas que agora estão muito ativas no financiamento de pesquisas ambientais (Seção 10.2).

- Objetivo 1: Caracterizar e quantificar as respostas heterogêneas das florestas tropicais às mudanças antropogênicas. E quanto à resposta das florestas tropicais a distúrbios naturais e causados pelo clima (por exemplo, tufões/furacões, secas, inundações, deslizamentos de terra etc.)?

A Seção 2.5 sobre dinâmica de distúrbios foi substancialmente revisada. Agora, tratamos não apenas os distúrbios antropogênicos, mas também os distúrbios naturais por meio dos mecanismos listados.

- A estrutura e o conteúdo do relatório do estudo de escopo do PANGEA são muito claros. Por exemplo, na página 96, linha 1954-1956, entendemos claramente que o PANGEA Elucidará os padrões de mudanças recentes (5-30 anos) e em andamento nas florestas tropicais, paisagens, dinâmicas e feedbacks, bem como suas variações geográficas, com uma abordagem ambiental. A ênfase é colocada em comparações entre as Américas e a África.
- *C'est la prise en compte de la dynamique social des communautés local a la base.* [Está levando em conta a dinâmica social das comunidades locais na base.]

Nenhuma resposta a esses comentários.

- Um aspecto do relatório que parece não estar claro é o resultado esperado em relação ao "Mapeamento e quantificação das previsões de fluxo de metano" do estudo sobre Estabilidade de Sequestro de Carbono e Fluxos de Metano (página 108). Embora o restante do projeto pareça se concentrar em análises atuais, a inclusão de uma análise de previsão

parece estar fora do escopo. Considerando que o PANGEA coletará dados até o final da campanha, o tempo disponível para realizar essa análise de previsão parece limitado.

O White Paper foi substancialmente revisado e as projeções futuras não estão fora do escopo (Seção 3.3). Por exemplo, a questão da estabilidade do sequestro de carbono é fundamental para uma de nossas questões científicas de projeção (por exemplo, Q25. Em um clima em mudança, quais tipos de floresta funcionalmente distintos são mais vulneráveis a se tornarem fontes líquidas de carbono para a atmosfera em um clima em mudança, quais tipos de floresta são resistentes e por quê?)

- Em minha opinião, não há nenhum mal-entendido específico sobre a estrutura e o conteúdo gerais. Eu acompanho muitas comunicações sobre esse relatório de estudo de escopo do PANGEA.
- Este relatório é abrangente e bem organizado. A introdução expôs claramente por que essa campanha é necessária e oportuna. As lacunas de conhecimento e as perguntas estão bem articuladas e servirão como um roteiro para pesquisas futuras. O relatório também identifica missões de satélite e produtos de dados que são essenciais para responder às perguntas de pesquisa da campanha PANGEA.
- Para mim, os cronogramas estavam claros e a instabilidade política (2425) foi bem abordada, e o Quadro 1 apresentou um plano avançado bem fundamentado para dar início ao PANGEA com parceiros internacionais. Estou um pouco menos familiarizado com estudos de escopo que não se destinam a descrever detalhes específicos em nível de local e acho que o plano, conforme escrito, é bem fundamentado e flexível para todas as diferentes oportunidades que um projeto financiado apresentará.

Nenhuma resposta a esses comentários.

- O projeto em geral é apresentado de forma bastante clara, mas as definições de alguns acrônimos devem ser verificadas de acordo com sua primeira aparição no texto. (por exemplo, a definição de produtividade primária bruta GPP aparece na Figura 3, mas esse acrônimo foi usado anteriormente na Figura 1). Minha sugestão é que as definições de todos os acrônimos, mesmo aqueles que são simples para as pessoas da área, sejam inseridas no texto onde forem usadas pela primeira vez em cada página em que forem mencionadas para facilitar a leitura por pessoas de outras áreas.

Todos os acrônimos agora são definidos quando são mencionados pela primeira vez, e incluímos uma lista de definições de acrônimos (Seção 14).

- A estrutura geral foi muito bem elaborada e o conteúdo estava claro. Alguns problemas que notei ao ler o documento foram: 1) as observações e a justificativa do fluxo de metano parecem ter sido acrescentadas de última hora. É um acréscimo importante, mas não incluindo Pangala et al. 2017 na linha 119, a seção sobre fluxos de metano em 1321-1335 deve ser incluída na Seção 2.1.

O comentarista está correto e, desde então, a seção foi reescrita e integrada de forma mais completa (Seções 2.1. e 3.1.1).

- A seção 2.4 Sistemas socioecológicos é muito diferente de todas as outras seções 2.x. Essa seção também se beneficiaria do estudo de Levis et al. 2017 (Science 355, 925-931) sobre a influência dos povos pré-colombianos na abundância e distribuição de árvores. Posteriormente, é mencionado o conceito de "florestas culturais", para o qual Levis et al. seriam muito apropriados. Em 2.4, o parágrafo 1095-1115 tem grandes blocos de referências, que seriam melhor separados pelas diferentes forças ou impactos a que se referem.

[A seção 2.4 foi completamente revisada para ficar consistente com as outras seções 2.x. A perspectiva de Levis e colegas é muito importante e citamos sua recente revisão \(2024\) que resume grande parte de seu trabalho anterior, incluindo os estudos de influências pré-colombianas na abundância e distribuição de árvores.](#)

- Na discussão sobre o impacto de grandes mamíferos nas distribuições de nutrientes (940), inclua Doughty et al. 2016 PNAS nas referências.

[A importância da megafauna é discutida nas Seções 2.2 e 3.2.1. Citamos o artigo anterior sobre o impacto da megafauna de Doughty et al. \(2013\).](#)

- Em Disturbance dynamics (Dinâmica de perturbação), linha 1198, o entendimento mais profundo dos drivers não está, pelo que sei, na Seção 2.4. Linha 1229 Não tenho certeza de onde vem a declaração entre colchetes. Linha 1261: os ciclones tropicais têm o maior efeito em sistemas florestais expostos ao oceano/mar. Eu sugeriria a fusão desse parágrafo com o parágrafo que começa na linha 1227.

[A perturbação agora é discutida na Seção 2.5, e a seção foi significativamente revisada. A compreensão da perturbação depende, em parte, dos sistemas socioecológicos discutidos na Seção 2.4.](#)

- Na linha 1315, inclua Saleska et al. 2003, Science como referência para a mudança na força do sumidouro de carbono. Na linha 1402, que fala sobre covariância de Foucault, seria bom ter um mapa dos locais de EC e dos locais do GeoTree. A Seção 3 não inclui experimentos de desvio de precipitação, fertilização com CO₂ ou temperatura, enquanto que Q8, Q9, Q19 e !23 dependem de experimentos para abordar essas questões. Um local no Peru, onde a floresta faz fronteira com uma fonte termal, é um local potencialmente interessante (Kullberg et al. 2023, New Phytologist) para se concentrar na determinação do impacto do aumento da temperatura sobre as espécies de árvores e sua resiliência térmica.

[Os locais e as localizações em potencial são listados como parte das paisagens do PANGEA, que incluem estudos de covariância de Foucault e inventário florestal, conforme mostrado na tabela da Seção 6.2.2.](#)

[A resposta do PANGEA ao Programa de Ecologia Terrestre da NASA não considera explicitamente os experimentos com grandes ecossistemas. Esses são valiosos e podem ser cofinanciados por outras agências ou doadores privados, como foi o caso do experimento de seca Seca-Floresta realizado na Floresta Nacional do Tapajós, Brasil, apoiado por fundos da NSF como parte do LBA.](#)

- Por favor, na linha 1168-1169 da frase "As atividades do PANGEA... precisam ser administradas... efetivamente", você quer dizer "gerenciar" em vez de "administrar"?

Usamos a palavra "governar" para distinguir as atividades dos tomadores de decisão.

- O projeto é muito bem escrito e estruturado.
- Minha primeira sugestão geral é destacar que o projeto está se baseando no conhecimento existente para avançá-lo. Portanto, em vez de ter como objetivo preencher lacunas de conhecimento, eu usaria algo como "avançar o conhecimento (ou a compreensão científica)".

A existência de algum conhecimento sobre florestas tropicais não exclui a existência de lacunas nesse conhecimento. Manteremos a linguagem atual.

- As duas primeiras perguntas parecem descritivas. Sugiro encontrar um fator relacional (por exemplo, analisar a relação entre X e Y), como é feito na pergunta 3.

As perguntas foram desenvolvidas por meio de um processo exaustivo que envolveu grandes grupos de trabalho. Embora o comentário seja válido, não queremos fazer alterações nas perguntas, a menos que elas não estejam claras ou levem a estudos ineficazes. Não acreditamos que seja necessário alterar a Q1 ou a Q2.

- A palavra "Antropoceno" aparece pela primeira vez na questão 2. Se você considerar relevante mantê-la, sugiro introduzir e explicar o conceito mais cedo (observando que há um debate bastante acalorado sobre o que ela realmente significa).

O debate científico relacionado ao Antropoceno é um assunto restrito principalmente aos estratigrafistas. Inicialmente, usamos a palavra em seu contexto coloquial como a época em que o sistema terrestre é dominado pelos seres humanos. Há pouco debate sobre essa dominação humana. No entanto, não usamos mais o termo "Antropoceno" no white paper.

- Os objetivos 1 a 3 não parecem estar diretamente alinhados com as perguntas 1 a 3.

Agora há 5 objetivos, 3 perguntas transdisciplinares que analisam a pergunta geral e muitas subperguntas temáticas específicas. Não esperamos que elas se alinhem diretamente, pois alguns dos objetivos são voltados para a ciência e outros estão relacionados a aplicativos e treinamento.

- Q1) Seria útil especificar as interações socioecológicas? Além disso, a pergunta parece um pouco ampla, pois aborda muitas variáveis diferentes.

Consulte a Seção 2.4 para obter informações sobre as interações socioecológicas.

- Q3) Não está claro para mim se estamos falando de variações entre diferentes florestas ou variações no tempo na mesma floresta. Talvez sejam as duas coisas, mas eu sugeriria que isso ficasse claro.

A pergunta foi modificada para maior clareza.

- Q6) Sugiro dividir essa pergunta em duas - embora faça todo o sentido, ela parece um pouco longa e difícil de acompanhar.

Temos muitas perguntas. Como essa pergunta "faz todo o sentido", preferimos não dividi-la.

- Q9) Sugiro i) especificar os continentes tropicais de que está falando; ii) dividir a questão em duas diferentes, mas inter-relacionadas.

Conforme observado acima, temos muitas perguntas e preferimos não dividi-las ainda mais. Não vemos nenhuma vantagem em especificar os continentes nessa pergunta.

- Q17) A pergunta parece descritiva. Eu sugeriria algo como "Até que ponto e como as diferentes atividades humanas e práticas de gestão apoiam a resiliência do sumidouro de carbono tropical?"

Consideramos que a reformulação sugerida para essa pergunta é amplamente equivalente à pergunta desenvolvida em nosso processo de grupo de trabalho. Mantemos a redação original.

Q4. Em que medida o estudo de escopo do PANGEA aborda as principais questões ou objetivos científicos?

- *Se evidencia un buen planteamiento de preguntas y objetivos a alcanzar.* [É evidente uma boa formulação de perguntas e objetivos a serem alcançados.]
- *É sobre a coleta, o tratamento e a análise de dados. C'est sur la collecte le traitement et l'analyse des données.* [Trata-se da coleta, do processamento e da análise de dados.]
- O estudo de escopo do PANGEA fez um ótimo trabalho ao abordar as principais questões científicas. As perguntas científicas estavam presentes sempre que se pensava em variáveis ecológicas e geofísicas relevantes para a campanha (págs. 60 a 62), sugestões de métodos para responder às perguntas de pesquisa (págs. 76 a 77) e aplicações de pesquisa (págs. 107 a 115).
- Atualizada e para as próximas gerações de cientistas e não cientistas.
- A visão para abordar as questões científicas é impressionante.
- Do meu ponto de vista (física do clima), o PANGEA abrange a maioria dos tópicos principais. Um tópico que eu sugeriria abordar é o transporte de longo alcance de nutrientes importantes para a floresta e como isso mudará com as mudanças climáticas. Outro tópico importante é o bioaerossol; ele é importante na formação de nuvens (gelo), biodiversidade, transporte vertical e transporte de longo alcance.

O transporte de nutrientes a longa distância é importante principalmente para o longo prazo. Os bioaerossóis são fascinantes e importantes para a formação de nuvens. Esses dois tópicos se enquadram em categorias de pesquisa relacionadas ao PANGEA, mas não fazem parte de nossos estudos principais. Buscaremos colaborar com grupos que tenham pontos fortes nessas áreas, como o consórcio INPA-Max Planck ATTO.

- Em geral, o estudo de escopo aborda bem as principais questões e objetivos, embora o estudo de escopo se beneficiaria da inclusão de locais experimentais nos trópicos para vinculá-los às observações de satélite.

A resposta do PANGEA ao Programa de Ecologia Terrestre da NASA não considera explicitamente os experimentos com grandes ecossistemas. Esses são valiosos e podem ser cofinanciados por outras agências ou doadores privados, como foi o caso do experimento de seca Seca-Floresta realizado na Floresta Nacional do Tapajós, Brasil, apoiado por fundos da NSF como parte do LBA.

- O objetivo geral do estudo exploratório do PANGEA é melhorar nosso entendimento sobre o funcionamento dos ecossistemas de florestas tropicais, com base em estudos e experimentos atuais para preencher as lacunas de dados, especialmente nas regiões tropicais da África. Para isso, o PANGEA planeja coletar medições de campo, especialmente em locais candidatos na África, financiar estudos de doutorado e mestrado sobre questões relacionadas ao funcionamento de ecossistemas tropicais para confirmar hipóteses que foram apresentadas, criar parcerias significativas com os governos de países tropicais e comunidades locais e se beneficiar do apoio financeiro e logístico da prestigiosa NASA, fatores que acreditamos que ajudarão o projeto PANGEA a atingir seu objetivo. No entanto, a exclusão das regiões tropicais do Sudeste Asiático é um problema que impossibilitará a realização de projeções globais para todas as regiões de florestas tropicais. Esse é um obstáculo para o projeto PANGEA.

As limitações de recursos não nos permitiriam realizar campanhas de campo em todas as regiões tropicais. Consulte a *Seção 1.4* sobre o domínio do PANGEA. Incluímos um domínio estendido de florestas úmidas pantropicais, a área mais ampla de interesse científico, onde projetos adicionais podem ser realizados por meio de parcerias e onde serão conduzidas análises de satélite e modelagem.

Q5. As metodologias e ferramentas propostas (por exemplo, sensoriamento remoto, análise de dados) foram adequadas para atender aos objetivos do estudo PANGEA?

- *Sim, muito adequadas para o estudo PANGEA.* [Sim, muito adequadas para o estudo PANGEA.]
- A coleta de dados de rotina de aviões locais e a integração com redes globais, como o ACTRIS, promovem propostas do ARM-DOE para ajudar a resolver tópicos específicos do PANGEA...

Essas são sugestões bem-vindas que parecem apropriadas para propostas de pesquisadores. O ACTRIS está ativo na Europa e pode não estar ativo no domínio do PANGEA. O uso das instalações do DOE ARM pode ser apropriado para algumas investigações. Seriam necessárias propostas separadas para o DOE.

- Há uma revisão completa das metodologias (Tabelas 1 e 4) que os autores usaram para mostrar a quantidade de recursos que temos hoje em dia e que não foram aplicados em florestas tropicais. O PANGEA defende bem o argumento de que essas metodologias não são absolutas e que os pesquisadores devem ampliar os limites de sua compreensão da ciência.

Nenhuma resposta a esse comentário.

- O plano de observação foi abrangente, mas há algumas distinções sobre os satélites geoestacionários que precisam de um pouco mais de descrição. Gosto da inclusão de observações de satélites geoestacionários, que estão bem posicionados para observar ecossistemas tropicais, pois estão posicionados acima do equador em órbita geoestacionária e fazem observações subdiárias em escalas de tempo de minutos a dezenas de minutos, o que ajuda a nos informar sobre processos subdiários, enquanto medições frequentes tornam mais possível encontrar períodos sem nuvens. O ABI na série GOES-R, especialmente o GOES-16 e o GOES-19, fica acima da América do Sul, com excelentes vistas da Amazônia, mas o Advanced Himawari Imager (AHI) fica na série Himawari 8/9, acima do continente marítimo, com vistas principalmente do leste da Ásia, da Australásia e arredores. Os imageadores da série Fengyun-4 e da série GEO-KOMPSAT-2 também observam o leste da Ásia. Há uma pequena lacuna na cobertura geoestacionária sobre o extremo leste da África, e o MTG-I1 ainda não foi comissionado para o METEOSAT-12, embora já esteja voando há quase dois anos e será absolutamente essencial para a observação da África. Conforme escrito, o AHI foi registrado como observando a Amazônia (isso precisa ser corrigido). A iniciativa GeoNEX da NASA tem sido fundamental para sintetizar as observações terrestres dos satélites geoestacionários, e não ficou claro se a experiência deles seria integrada (o que eu recomendaria enfaticamente; também não sei se as equipes da NASA podem ser explicitamente incluídas nos projetos de escopo da NASA). Também é importante observar que o GOES-R pode ser usado para inferir o GPP e a respiração do ecossistema por meio de modelos, como ocorre com outras estimativas de fluxo de carbono baseadas em satélite. Enfatizar ainda mais sua capacidade de inferir a radiação de ondas curtas de downwelling subdiária e a temperatura da superfície terrestre pode realmente ajudar a explicar como eles criam uma plataforma de observação exclusiva em tempo real para processos críticos do sistema terrestre.

[Apreciamos o comentário detalhado sobre as observações geoestacionárias, mas, dada a grande variedade de plataformas de satélite e sensores com os quais lidamos no White Paper, não podemos aproveitar todas essas informações do documento. Agradecemos a identificação do erro com relação ao AHI, que já foi corrigido.](#)

- Sim, de modo geral, as metodologias parecem ser apropriadas, embora eu ache que o estudo do PANGEA deixa de fora os locais experimentais para investigar mais a fundo os impactos dos fatores de mudança climática, como a seca e o enriquecimento de dióxido de carbono, e os locais de mudança de uso da terra, como os locais do TMFO (consulte a seção de resposta das partes interessadas/comunidades). O escopo científico fala sobre os impactos da mudança climática e eu me pergunto se eles podem ser totalmente abordados apenas com estudos observacionais.

[A resposta do PANGEA ao Programa de Ecologia Terrestre da NASA não considera explicitamente os experimentos com grandes ecossistemas. Esses são valiosos e podem ser cofinanciados por outras agências ou doadores privados, como foi o caso do experimento de seca Seca-Floresta realizado na Floresta Nacional do Tapajós, Brasil, apoiado por fundos da NSF como parte do LBA.](#)

- O estudo de escopo parece bastante abrangente. No entanto, os métodos e as observações de medições/variáveis parecem ser insuficientes em algumas áreas relacionadas ao aumento

da compreensão das fontes e sumidouros naturais nos trópicos. Por exemplo, o uso do fracionamento de isótopos como uma restrição para a modelagem de baixo para cima e de baixo para cima está ausente nas necessidades e nos métodos de observação propostos (apenas ligeiramente mencionado na Tabela 4). Há fortes evidências de que a coleta sistemática de dados isotópicos é uma abordagem poderosa para a divisão das fontes de emissões. É por isso que as medições de isótopos estáveis no hemisfério norte se tornaram um componente essencial das redes de observação. Considerando as restrições e os custos de coleta e análise desses dados nos trópicos, a proposta deve mencioná-los explicitamente como uma das áreas de observação que o PANGEA buscará fortalecer.

Concordamos que os métodos isotópicos podem fornecer fortes restrições para a divisão dos processos do ecossistema. Eles estão listados entre os métodos para análises integrativas na Seção 6.3.

- Gostaria de sugerir que você considerasse alguns períodos específicos do ano (período de transição, de seco para úmido e vice-versa) para as atividades descritas na linha 2112-2113. Devido às suas características atmosféricas peculiares, eles têm. Esses períodos na África Ocidental, especialmente no norte de Benin, são aqueles com muitos mal-entendidos

O White Paper visa períodos de campanha intensiva no início e no final das estações secas, que podem incluir transições. Isso varia de acordo com a região e, portanto, afeta o cronograma da campanha.

Q6. O estudo PANGEA identificou com sucesso os principais desafios ou incertezas na campanha de campo proposta?

- *Muy de acuerdo ya que las propuestas se han recogido de manera participativa en muchas reuniones* [Concordo plenamente, pois as propostas foram coletadas de maneira participativa em muitas reuniões].
- Sim, acho que sim, mas vários países, cada país com procedimentos administrativos específicos, como licenças para medições, aviões etc., podem ser um desafio.
- Sim, o estudo identificou efetivamente os principais desafios e incertezas, principalmente na Seção 7, que discute a Viabilidade Técnica e Logística. Os autores abordaram vários problemas em potencial, como a complexidade de gerenciar uma equipe grande, e apresentaram soluções para evitar gargalos de comunicação ao simplificar a estrutura organizacional da campanha. Outros desafios, como o possível desinteresse da comunidade ou problemas de financiamento internacional, também foram reconhecidos, com estratégias como planos de engajamento e redes de alavancagem para financiamento alternativo sugeridos como soluções.
- Conforme observado em outro lugar, achei as observações sobre a instabilidade política bem fundamentadas.
- A campanha de campo proposta aborda integralmente as questões de mudança climática e biodiversidade, que incluem desmatamento, mudança no uso da terra, incêndios, secas e assim por diante. A mudança climática, cujas repercussões levam a inúmeras perdas de vidas

humanas e de infraestrutura, está ligada ao fluxo de carbono contido no CO₂ e no CH₄, entre outras coisas.

- O principal desafio identificado pelo PANGEA está ligado à incerteza da qualidade da resposta das regiões de florestas tropicais às mudanças climáticas, que, por sua vez, está amplamente ligada aos fluxos de carbono na atmosfera. A certeza é que a diversidade das paisagens florestais tropicais e as ameaças antropogênicas que elas enfrentam inevitavelmente levam à heterogeneidade na resposta e na vulnerabilidade dessas paisagens às ameaças antropogênicas. Assim, a compreensão do fluxo de carbono atmosférico e de suas tendências atuais e futuras será importante para um melhor entendimento do problema da mudança climática, que é o maior desafio enfrentado pela humanidade atualmente. A campanha PANGEA está, portanto, ajudando a identificar o maior desafio contemporâneo enfrentado pela humanidade.

Por meio de nossas extensas consultas, adquirimos muita sabedoria e perspectiva em relação aos desafios e incertezas.

Q7. Como você classificaria a relevância do projeto de estudo proposto para o avanço da nossa compreensão dos ecossistemas terrestres?

- *O projeto aborda pontos específicos para compreender o funcionamento e a dinâmica dos ecossistemas.* [O projeto aborda pontos específicos para compreender o funcionamento e a dinâmica dos ecossistemas.]
- O PANGEA é necessário porque as campanhas de campo em florestas tropicais permitiriam que os cientistas estudassem o estado natural dos biomas tropicais e o impacto das atividades humanas sobre eles:
 - Compreender o estado natural, por exemplo, como as partículas de aerossol se formam, crescem e se deslocam nos trópicos, por exemplo, a poeira da África para a América do Sul;
 - A medição do impacto humano, como a poluição e o desmatamento, se deslocou pela atmosfera das latitudes temperadas para os trópicos;
 - Identificação de zonas críticas que são consideradas pontos de inflexão para emissões terrestres; e
 - Medição e validação de variáveis terrestres, como o índice de área foliar (LAI) e a fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR), que são variáveis forçantes essenciais para diferentes modelos.
- A equipe fez um excelente trabalho ao enfatizar a função descomunal dos ecossistemas tropicais no sistema terrestre, com foco extensivo em ciclos biogeoquímicos/hidrológicos acoplados, sistemas de detecção de última geração e questões críticas que vão além dos limites disciplinares e geográficos.
- Eu consideraria a relevância dessa proposta alta com base nas abordagens usadas e na importância das regiões tropicais para o ciclo global de carbono (e, é claro, como essas áreas estão ameaçadas pelas mudanças climáticas).

Nenhuma resposta a esses comentários.

- A relevância do projeto do estudo é muito importante para nossa compreensão dos ecossistemas terrestres. No entanto, acho que o escopo do estudo é muito observacional e poderia se beneficiar de locais experimentais ou identificar locais que tenham condições muito específicas, como o experimento de "aquecimento natural" de fontes termais.

Já respondemos anteriormente a comentários semelhantes sobre experimentos artificiais ou "naturais".

- O objetivo do PANGEA, que é obter uma melhor compreensão do funcionamento dos ecossistemas terrestres, é bom e louvável; alcançar esse objetivo provavelmente possibilitará o desenvolvimento de políticas adequadas para lidar com problemas como a mudança climática e a perda de biodiversidade. O PANGEA foi estrategicamente projetado com base em um conjunto de hipóteses ligadas, em especial, à heterogeneidade da resposta e à vulnerabilidade das regiões tropicais às ameaças antropogênicas. O PANGEA prevê que essas hipóteses sejam verificadas por meio da coordenação de dados de campo, aéreos e de satélite. Acreditamos que isso seja relevante para atingir os objetivos do PANGEA. O que é mais interessante no PANGEA é que ele concentrou atenção especial nas florestas tropicais da África, dando prioridade às medições terrestres e aéreas devido às grandes lacunas de dados e conhecimento nessa região tropical. Embora essa seja uma boa orientação para o projeto PANGEA, ela continua sendo parcial devido à exclusão das florestas tropicais do Sudeste Asiático, cuja inclusão no estudo teria possibilitado a obtenção de dados globais e a realização de projeções mais globais para todas as regiões de florestas tropicais. Em sua opinião, qual é a viabilidade da implementação técnica e logística proposta para a campanha de campo? A implementação técnica e logística da campanha de campo proposta parece viável por dois motivos:
 - o A primeira é que cientistas de várias ciências humanas e sociais de todas as esferas da vida e, particularmente, de paisagens florestais tropicais, estão envolvidos no estudo. Os cientistas de regiões tropicais têm a vantagem de dominar a realidade do que está acontecendo em termos de distúrbios climáticos ou das consequências desses distúrbios e das ameaças aos equilíbrios biogeoquímicos e à biodiversidade local. Essa é uma vantagem em termos de abordar as questões científicas corretas e obter as informações corretas a partir de dados ou medições coletados no local.
 - o Em segundo lugar, o possível patrocínio da NASA é um grande trunfo, tanto financeiro quanto logístico, pois o PANGEA não terá dificuldade em obter dados confiáveis das observações aéreas e de satélite da NASA. Esses dados também poderiam vir de outras organizações com capacidade para obter esse tipo de informação. Além disso, o PANGEA tem uma área de estudo empírico representada por áreas de florestas tropicais, que são de suma importância na luta contra as mudanças climáticas e na proteção da diversidade. Em termos empíricos, a escolha dessa área de estudo é um fator importante na relevância do projeto PANGEA.

Já comentamos anteriormente sobre a inclusão da Ásia. A Ásia não está excluída: Ela faz parte do domínio estendido. O PANGEA não está buscando recursos para campanhas na Ásia. A

parceria com outros patrocinadores poderia estender o trabalho do PANGEA para a Ásia, seguindo temas e abordagens científicas semelhantes.

- Saudades dos trópicos secos!

[Consulte a resposta a esse tópico acima.](#)

Q8. Em sua opinião, qual é a viabilidade da implementação técnica e logística proposta para a campanha de campo?

- *La implementación permitirá validar información local con las metodologías apropiadas a cada región.* [A implementação permitirá que as informações locais sejam validadas com as metodologias apropriadas a cada região.]
- Considerando o número de pessoas envolvidas nessa campanha, a implementação é viável. Como em qualquer outro projeto, essa campanha de campo pode não estar isenta de obstáculos no desenvolvimento, mas isso significaria apenas que estudos adicionais na proposta podem não ser priorizados se não responderem diretamente a uma pergunta de pesquisa. Por exemplo, como mencionado anteriormente, a análise de previsão dos fluxos de gás pode se tornar secundária, pois os autores podem priorizar a conclusão de qualquer projeto de coleta de dados até o final da campanha.
- Há um nível inerente de complexidade elevada na realização de trabalho de campo em áreas remotas e (conforme descrito na proposta) preocupações ainda maiores em partes da África, dada a instabilidade política e social da região. Reconhecendo isso, no entanto, acho que, considerando os parceiros listados, a experiência da equipe envolvida... com recursos suficientes, isso seria muito viável. Será um desafio logístico, embora eu ache que as pessoas envolvidas e as parcerias descritas indiquem um grande potencial de sucesso.
- Sou especialista em ecologia de campo, portanto não posso comentar sobre os aspectos de sensoriamento remoto, mas tudo parece viável.
- O projeto é bastante ambicioso, tanto em termos de escopo quanto de extensão geográfica - ele abrange muitas áreas florestais em diferentes países do Brasil e da América do Sul. No entanto, as abordagens técnicas e logísticas são bem fundamentadas e têm um grande potencial de sucesso em sua implementação no local.

[Não há resposta para esses comentários, exceto para agradecer os votos de confiança.](#)

- Como alguém dos trópicos das Filipinas que já trabalhou na floresta amazônica, eu diria que a equipe do projeto deve considerar o aspecto de segurança da implantação da infraestrutura/equipamentos. Eventos extremos, terreno e suporte de mão de obra também devem ser considerados. Uma torre de fluxo de covariância de Foucault com a qual trabalhei, na Amazônia, sempre enfrenta falhas nos instrumentos devido à interferência/intrusão da vida selvagem. O fornecimento de energia (principalmente painéis solares) devido a dias nublados é um problema significativo. A segurança da equipe e dos equipamentos é vital.

[Todas essas são preocupações importantes que não são o assunto principal do nosso documento conceitual, mas serão considerações importantes se formos selecionados para](#)

desenvolver um plano de experimento operacional. Observamos que o escritório de projetos da NASA tem ampla experiência em florestas tropicais e já lidou com problemas semelhantes aos mencionados acima.

- Considero a proposta ainda bastante aberta à discussão da implementação, mas essa primeira etapa do banco de testes é muito importante para dar um impulso. Espero que a proposta também seja aberta a não-americanos.

A NASA fez mais do que um "banco de testes" em florestas tropicais por meio de sua experiência como parte do LBA liderado pelo Brasil. A participação de não-americanos é bem-vinda, embora a NASA tenha limitações para financiar instituições fora dos EUA. Estamos buscando ativamente o cofinanciamento, conforme observado na *Seção 10.2*.

Q9. Há alguma barreira ou desafio em potencial que o estudo de escopo do PANGEA não tenha abordado adequadamente?

- *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* [Se há barreiras, são barreiras culturais e de idioma, já que na área de Pangea há uma grande diversidade cultural e de idiomas que deve ser abordada com grande importância].

Durante o processo de definição do escopo, o PANGEA trabalhou para romper barreiras. Por exemplo, realizamos reuniões regionais com tradução simultânea. Disponibilizamos a versão preliminar do White Paper em vários idiomas, inclusive em espanhol. Respondemos aos comentários sobre o documento que foram fornecidos em espanhol e francês. Nosso documento do White Paper (incluindo essas respostas) será traduzido para o espanhol, francês, português e bahasa indonésio. Nossa intenção é dar continuidade a essas práticas para minimizar as barreiras.

- A questão da segurança de algum campo de estudo.

A segurança dos participantes do projeto é uma prioridade máxima. A avaliação da segurança do local de campo será de responsabilidade do Escritório do Projeto. Talvez seja necessário evitar locais de alto risco. Consulte a *Seção 10.5* para obter uma discussão sobre riscos e mitigação de riscos.

- Um possível desafio que o PANGEA pode não ter abordado totalmente é a sub-representação da Ásia nos grupos de escopo, apesar do foco do estudo nas regiões tropicais. Embora essa omissão possa não prejudicar a realização das metas individuais do projeto, ela pode se tornar uma barreira ao tentar apresentar as descobertas da campanha em escala global.

Devido às limitações de recursos, dedicamos mais atenção à África e às Américas do que à Ásia. No entanto, realizamos ações de divulgação na Ásia e, se formos financiados, continuaremos a nos aproximar para evitar a possível barreira levantada nesse comentário bem colocado.

- Uma importante lacuna de conhecimento não abordada no estudo de escopo é como a convecção profunda tropical afeta nossa visão do ciclo do carbono. Os modelos atuais de

transporte atmosférico global variam na parametrização convectiva, e não temos uma compreensão clara das atribuições errôneas do fluxo de carbono causadas pelo transporte vertical inadequadamente resolvido nos trópicos (Stephens et al., 2007). Os recentes avanços nos modelos de resolução de nuvens são promissores para representar com precisão a convecção tropical e seu impacto na distribuição dos marcadores do ciclo de carbono. Isso pode ajudar a melhorar as estimativas de fluxo de carbono top-down nos trópicos. Um sistema de modelagem/assimilação de dados que incorpore os mais recentes avanços na representação do transporte atmosférico deve nos ajudar a interpretar com mais precisão as observações de gases traços em todas as escalas para uma melhor compreensão da dinâmica do carbono tropical.

- O relatório identifica que "os fluxos de respiração, emissões de metano e fluxos laterais de carbono demonstraram ser substanciais em florestas tropicais" (linha 1319-1321, página 36), mas não fornece nenhum plano concreto para medir o transporte lateral de carbono no campo. Em vez disso, afirma-se que "a inundação do NISAR e do BIOMASS apoiará o mapeamento de áreas úmidas de florestas tropicais e será integrada a medidas de fluxos de água superficial do SWOT, permitindo medições diretas de fluxos laterais de carbono de sistemas tropicais" (linhas 1374-1376, página 38). Estou perplexo sobre como isso é possível, já que nenhum dos satélites mencionados rastreia o carbono inorgânico dissolvido ou o carbono orgânico dissolvido/particulado. Talvez o PACE possa ser útil? Mas ainda seriam necessárias medições de campo para rastrear o transporte lateral de carbono e validar os produtos e modelos de dados de satélite.

Referência

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>

As melhorias na compreensão do transporte atmosférico estão fora do escopo do PANGEA. A pesquisa proposta usando inversões de modelos estará sujeita à revisão por pares, que deverá identificar problemas com os modelos de transporte usados.

A quantificação dos fluxos laterais é um problema de pesquisa que identificamos, mas não identificamos a solução.

- É provável que existam questões granulares que sempre poderiam ser consideradas com mais detalhes, mas acho que o documento de escopo aborda suficientemente as preocupações neste estágio.

Nenhuma resposta a esse comentário.

- É preciso manter o envolvimento com os parceiros na África e na América do Sul; fazer isso bem é um desafio

Concordamos plenamente. Na *Seção 10*, onde discutimos a organização do projeto, mencionamos vários mecanismos para facilitar as interações contínuas. Aprendemos em projetos anteriores que precisamos construir relações interpessoais sólidas com base no trabalho conjunto como iguais. Isso é sempre um desafio para todos os envolvidos, mas, como aprendemos durante o LBA, não é uma barreira.

Q10. Você acha que o estudo do PANGEA promoverá parcerias significativas com as partes interessadas (por exemplo, comunidades locais, governos)?

- Isso não é fácil, mas pode ser melhorado ao longo dos anos se houver um entendimento das partes interessadas e das comunidades locais... As festas de Natal, etc., não farão com que as pessoas locais se integrem

Temos certeza de que o comentarista está sendo irônico. Não fizemos nenhuma menção a atividades como festas de Natal. O White Paper contém uma seção completa (*Seção 8*) sobre o envolvimento da comunidade e nós reconhecemos o desafio e apresentamos estratégias para enfrentá-lo. Também apontamos para outro comentário citado aqui em relação à confiança obtida com a versão preliminar do nosso White Paper: "O plano para envolver as comunidades e os governos locais no início do plano é fundamental e sinto que o plano está muito ciente de todas as dinâmicas que podem surgir depois que o projeto for financiado; há muito mais entidades em jogo do que para a ABoVE. "

- Sim, o PANGEA pode promover parcerias significativas com as partes interessadas. Mas, como eu já disse, será importante garantir o compromisso e o envolvimento do governo desde o início. O mesmo acontece com o setor privado que trabalha no setor florestal, por exemplo

Concordamos com o comentário. Fornecemos evidências de que iniciamos o processo de engajamento em nossos apêndices, incluindo cartas de apoio (*Apêndice A*) e *Apêndices B e C*, que detalham a divulgação que fizemos com governos e outras instituições.

- Como se trata de uma campanha internacional, o PANGEA aplicará relacionamentos com governos locais e ONGs com base em tópicos.
- Sim. Trabalhamos muito mais com as comunidades do que com as autoridades estaduais.
- Acredito que sim. As regiões tropicais precisam de todo o apoio que pudermos dar, desde que esse apoio seja duradouro e não de fachada. Acredito que esse documento de escopo aborda isso de forma suficiente. No entanto, incentivo a equipe a continuar evitando a "ciência de helicóptero" na vanguarda de seu trabalho (como fizeram aqui).
- O PANGEA impressiona pela forma como formará parcerias eficazes com as partes interessadas.
- Sim, acredito que o projeto já conseguiu reunir um grupo muito comprometido de entidades. Acredito também que, à medida que o projeto for avançando, muito mais pessoas se interessarão. Esse problema da conservação das florestas está se tornando uma preocupação universal e a tendência é que as parcerias só aumentem.

- Sim, porque o PANGEA, se financiado, trará soluções para alguns desafios que as partes interessadas e os governos estão enfrentando. Por exemplo, aqui no Benin, na Reserva Florestal de Lama (sul do Benin), um mosaico de florestas naturais, degradadas e de plantações da Teck, gerenciadas pela agência nacional de madeira e florestas, está buscando uma maneira eficiente de combater os incêndios florestais na estação seca. Esses incêndios consomem muitas populações de árvores e provavelmente afetam a produtividade de suas plantações e, portanto, suas economias. Portanto, o estudo de escopo do PANGEA sem dúvida promoverá uma parceria significativa com as partes interessadas.

[Agradecemos esses comentários e não temos uma resposta direta.](#)

- Idealmente, mas como está agora, a proposta é muito vaga na demonstração de como funcionarão as parcerias sustentáveis e de longo prazo para a operação e manutenção das redes de observação. Garantir a operação contínua da rede com o compartilhamento de dados em tempo real é um esforço enorme nos trópicos que exige apoio e compromissos de todos os níveis de governança nacional, não apenas das comunidades de pesquisa. A implantação de especialistas, comunicações e tecnologia nos domínios do PANGEA exige a coordenação de vários atores no campo, mas a proposta parece se concentrar intensamente nas instituições de pesquisa, que têm um escopo de ação limitado para lidar com os desafios jurídicos, políticos e socioeconômicos que as campanhas de campo enfrentarão.

[O White Paper apresenta um plano conceitual em vez de um plano operacional. Muitas das questões levantadas aqui são operacionais. Isso pode explicar a caracterização do plano como "vago". Por meio de seu longo histórico de campanhas, incluindo LBA e ABoVE, o escritório de projetos da NASA demonstrou sucesso em implantações de campo, coleta de dados e compartilhamento de dados.](#)

- Tudo depende do que o PANGEA fizer para atingir esse objetivo. Vários pré-requisitos precisam ser atendidos antes que essas parcerias possam ser estabelecidas e, em minha opinião, elas são essenciais para que o projeto PANGEA atinja seus objetivos. De fato, sem o apoio das comunidades locais que vivem nos locais candidatos identificados e escolhidos pelo projeto PANGEA, e cujas áreas comunitárias são incluídas no estudo para fins experimentais, o PANGEA corre o risco de ser rejeitado por essas populações. Portanto, é necessário e essencial que o projeto PANGEA realize ações direcionadas a essas populações a fim de garantir seu apoio e aceitação do projeto PANGEA. Da mesma forma, sem o apoio dos governos dos países tropicais, especialmente os da Bacia do Congo, o PANGEA não conseguirá atingir seus objetivos. Por esse motivo, a natureza formal e legal da conformidade com a legislação sobre o acesso aos territórios ou paisagens candidatos não será suficiente. Será necessário integrar motivações e incentivos adicionais dirigidos diretamente a essas comunidades locais e aos membros do governo para incentivar o estabelecimento de parcerias significativas com essas duas entidades. Isso garantirá sua total cooperação e apoio aos objetivos do projeto PANGEA.

[É sempre importante desenvolver relacionamentos com parceiros governamentais e da comunidade local. Esse é um comentário valioso.](#)

Q11. Existem outras partes interessadas ou comunidades que deveriam ter sido envolvidas no estudo do PANGEA?

- *As comunidades camponesas e nativas ou qualquer outra que esteja localizada no território onde o projeto será desenvolvido, já possuem conhecimentos ancestrais. [As comunidades camponesas e nativas, ou qualquer outra que esteja localizada no território onde o projeto será desenvolvido, já possuem conhecimentos ancestrais.]*

O PANGEA manifesta interesse na integração do conhecimento indígena, local e tradicional com o sensoriamento remoto. Consulte, por exemplo, a Seção 9.1 do White Paper.

- O projeto abrangeu quase todas as partes interessadas necessárias para o projeto.
- Claro, mas só será possível identificar claramente no campo. Portanto, o projeto deve estar aberto à ampliação do escopo.
- O setor privado, especialmente aqueles que trabalham no campo da silvicultura, agricultura e mineração, deve estar fortemente envolvido.
- Será bom envolver as comunidades locais diretamente (seu representante), sem passar pelas autoridades. Para evitar fraudes.
- Também pode ser uma boa ideia incluir a rede de parlamentares africanos, que geralmente estão envolvidos na conservação e no gerenciamento sustentável dos ecossistemas florestais na África Central.

Não temos respostas específicas para esses comentários.

- Não sei se é uma opção incluir iniciativas da NASA no próprio escopo, mas a equipe GeoNEX patrocinada pela NASA (<https://www.nasa.gov/nasa-earth-exchange-nex/earth-observations-geonex/data-products/>) tem sido fundamental na criação e divulgação de produtos de dados geoestacionários em vários satélites.

Reconhecemos a importância das observações geoestacionárias (por exemplo, Seção 3.1), mas não mencionamos especificamente o GeoNEX. Estamos cientes dessas atividades e elas têm muito a contribuir com o PANGEA.

- Qualquer estudo desse porte precisa manter a mente aberta para incluir outras partes interessadas que possam se apresentar, embora, no aspecto científico, eu ache que a comunidade científica experimental parece ter sido deixada de lado. Entendo que a NASA tem tudo a ver com observações (especialmente de satélites), mas deixar de fora o enriquecimento de CO₂ da AMAZON FACE, o experimento de seca EsecaFlor, o TmFO (Tropical managed Forest Observatory) para distúrbios florestais e a floresta experimental de Luquillo parece estar fora de lugar. As observações de satélite focadas nesses locais podem ajudar a informar as questões científicas que o programa está tentando abordar.

Já respondemos anteriormente à questão dos experimentos com ecossistemas (veja acima).

- Acho que seria possível enumerar os parceiros universitários nas regiões.

Os Apêndices B, C e D listam muitos desses parceiros.

- A World Environmental Conservancy (WEC), uma fundação americana privada sem fins lucrativos, ficaria feliz em participar desse projeto. A WEC tem muitos brasileiros envolvidos em seus projetos que fazem parte de universidades, institutos e entidades brasileiras que provavelmente ficariam felizes em fornecer o suporte necessário no local.

[Essa é uma excelente notícia. O PANGEA entrará em contato.](#)

- Sugiro incluir as florestas de terras altas conservadas (terra firme) ao longo da PA-370 (km 107) (2°53'7.95 "S; 53°57'37.79 "W). Elas ocorrem em solos argilosos e têm uma alta diversidade de árvores grandes, como a castanha-do-pará (*Bertholletia excelsa*). Essa área constitui uma nova fronteira agrícola regional. Essa é uma paisagem pouco estudada que faz parte da minha pesquisa de dissertação. A região maior de Curuá-Una, em Santarém, tem características de fronteiras antigas e novas, ou seja, campos monoculturais de décadas (fronteira antiga) e desmatamento contínuo para expansão de monoculturas (fronteira nova) (Coelho et al., 2021; Schielein & Börner, 2018). A região fica no Planalto de Santarém, uma extensa área de terras altas adjacente à confluência dos rios Tapajós e Amazonas (Barros et al., 2020). Partindo de Santarém em direção a Uruará pela rodovia PA-370, observam-se diferenças marcantes no uso da terra e na conservação da floresta entre as áreas antes e depois da hidrelétrica de Curuá-Una. Antes da barragem, há uma área de longa ocupação para fins agrícolas (a partir da década de 1960), com predominância atual de campos monoculturais de grande escala (soja/milho). Após a barragem, a ocupação é muito mais recente (a partir da década de 2010) e a cobertura florestal é muito maior. A presença de áreas com diferentes tempos de ocupação permite a análise temporal do uso da terra, o que pode ser uma lente útil para entender a heterogeneidade na dinâmica florestal. Acredito que a inclusão dessa paisagem forneceria i) dados convincentes para comparar com a bem estudada Floresta Nacional do Tapajós (km 67 da BR-163) e ii) percepções úteis para entender as paisagens de florestas tropicais. Tenho parcerias com comunidades locais nessa região (Associação de Agricultores da Aprocad), uma cooperativa de pequenos agricultores (COOPBOA - Cooperativa de Agricultores Familiares da Comunidade Boa Esperança) e acadêmicos locais da Universidade Federal do Pará (UFOPA), em Santarém - dr. Tiago Vieira, Dra. Helionora Alves, Dr. Diego Amoedo - e Universidade Federal do Oeste do Pará (UFPA), em Belém - Dr. Valério Gomes, Dra. Raquel Santos e Dra. Katiane Silva.

[Essa é uma excelente sugestão para a extensão da paisagem potencial perto de Santarém. Ela oferece uma área rica para comparação com a BR-163.](#)

- Na Colômbia, sugiro incluir a comunidade El Caraño (01°44'47.1" N, 075°41'35.9" W), localizada nas encostas orientais da cordilheira dos Andes Orientais, entre os ecossistemas andino e amazônico em Florencia, Caquetá. Os Andes tropicais estão entre as áreas de maior diversidade biológica do mundo em termos de riqueza de espécies e endemismo. As altas taxas de biodiversidade são frequentemente atribuídas a características e mudanças na paisagem ao longo do tempo (Moritz et al. 2000; Trénel et al. 2008; Sarkinen et al. 2012). A Floresta Tropical Montana Nublada dos Andes (TMCF) é um ecossistema tropical andino que desempenha uma função essencial nos ciclos de água locais e regionais (Aldrich et al. 1997; Fahey et al. 2016). No entanto, a expansão da agricultura e a urbanização estão causando muito desmatamento nas áreas da TMCF (Etter & Wyngaarden 2000; Armenteras et al. 2003). Consequentemente, esse ecossistema tem sido altamente fragmentado (Aldrich et al. 1997;

Brummitt & Lughadha 2003; Gotsch et al. 2015). As florestas nubladas características da região são notáveis por sua alta ocorrência da família Arecaceae, com 24 gêneros e 109 espécies de palmeiras (Borchsenius & Moraes 2006). Também tenho parceiros na Colômbia que poderiam contribuir muito para esse projeto: Dr. Oscar Perdomo (professor titular da Universidade de Boyacá) e Edwin Trujillo (professor da Universidade da Amazônia).

Os ambientes montanhosos são indiscutivelmente importantes, mas decidimos excluí-los do PANGEA porque eles cobrem áreas muito pequenas em comparação com as planícies e exigem uma amostragem específica e detalhada para levar em conta a heterogeneidade das características topográficas e edáficas, o que, como os recursos são finitos, limitaria a amostragem em outros gradientes de grande escala.

Q12. Existem áreas em que a abordagem à diversidade e à inclusão poderia ser aprimorada?

- *Si, en comunidades establecidas en el ámbito del bosque, ya que ellos son lo que hacen uso directo del bosque o ecosistema. [Sim, em comunidades estabelecidas na área florestal, já que são elas que fazem uso direto da floresta ou do ecossistema.]*
- *Abordagem baseada no dinamismo social, a consideração do gênio local das comunidades locais como base, a implicação das comunidades locais na tomada de decisões, a consideração dos aspectos da proteção transversal, a inclusão social, a luta contra a violência baseada no gênero, a implicação das ONGs nacionais na execução das atividades, o reforço das capacidades das comunidades locais na base, a formação profissional e técnica, o apoio à resiliência das comunidades locais na base, o apoio ao desenvolvimento econômico social e duradouro, a mobilização comunitária. [Abordagem baseada na dinâmica social, levando em conta as queixas locais das comunidades locais na base, o envolvimento das comunidades locais na tomada de decisões, levando em conta aspectos de proteção transversal, inclusão social, combate à violência de gênero, envolvimento de ONGs nacionais na implementação de atividades, capacitação das comunidades locais na base, treinamento profissional e técnico, apoio à resiliência das comunidades locais na base, apoio ao desenvolvimento econômico social e sustentável, mobilização comunitária].*

O trabalho com as comunidades locais exigirá parcerias locais sólidas. Consulte a Seção 8 do White Paper para conhecer nossa estratégia, que foi substancialmente revisada em relação à primeira versão.

- O projeto articulou muito bem as conexões com as comunidades indígenas e locais, e sei que isso não está necessariamente dentro do escopo da NASA, mas conectar as descobertas às comunidades carentes dos EUA pode melhorar ainda mais os resultados, ajudar a treinar a próxima geração de cientistas dos EUA e melhorar o futuro da colaboração internacional.

Uma das áreas em que o PANGEA pode se conectar às comunidades carentes dos EUA é por meio do desenvolvimento da força de trabalho. Isso pode ser possível por meio da participação nos programas NSF Research, Innovation, Synergies, and Education (RISE) e Geoscience Opportunities for Leadership in Diversity (GOLD-EN) (Seção 7.1).

- Que eu saiba, não. A equipe fez um trabalho notável e está usando metodologias robustas e testadas para ser inclusiva.

Não há resposta para esse comentário, exceto o fato de que gostamos muito dele.

Q13. Você tem alguma sugestão ou comentário adicional para a campanha de campo proposta para o PANGEA?

- *Es una brillante oportunidad para conservar y manejar sosteniblemente los ecosistemas tropicales.* [É uma brilhante oportunidade para conservar e gerenciar de forma sustentável os ecossistemas tropicais.]
- *Nous souhaitons signer une convention cadre de partenariat avec votre institution , travailler avec vous en partenariat consortium, bénéficié de l'assistance techniques , avoirs soutient financier, logistique équipement pour la mise en œuvre du projet.* [Desejamos assinar um acordo-quadro de parceria com sua instituição, trabalhar com você em uma parceria de consórcio, beneficiar-se de assistência técnica, apoio financeiro, equipamento de logística para a implementação do projeto].
- Melhor comunicação sobre a campanha.
- Na minha opinião, fornecer muito tempo e recursos para o trabalho de campo será o maior desafio, principalmente na África.

Nenhuma resposta a esses comentários.

- Se financiado, crie espaço para colaborações/colaboradores externos para ajudar a aumentar e ampliar o trabalho. Desenvolva uma infraestrutura duradoura nas regiões de estudo. E saiba também que você elaborou um excelente documento/proposta de escopo aqui. É um prazer ler!

As colaborações externas serão uma parte importante do sucesso do PANGEA (consulte as Seções 8 e 10.2). A história sugere que, embora o desenvolvimento da infraestrutura seja importante, é muito mais importante desenvolver os recursos humanos. Faremos o possível para promover ambos, conforme descrito no White Paper, mas as pessoas serão nossa prioridade.

- Gostaria muito que você considerasse duas paisagens de floresta tropical localizadas em Benin como candidatas a esse estudo de escopo. Ambas são adequadas e atendem a todos os detalhes fornecidos no white paper (acessibilidade, pelo menos 100 km²; disponibilidade de torre de fluxo; etc.).
 - O primeiro, Bellefougou (9,79115 N; 1,718 E), foi estabelecido acima de uma floresta clara com uma covariância de Foucault de energia, vapor de água e fluxos de dióxido de carbono, medições do solo e do tempo e levantamento geofísico. Bellefougou está funcionando desde 06/2008 até hoje, portanto, há dados de fluxo de longo prazo disponíveis.
 - O segundo - Reserva Florestal de Lama (6.57360N; 2.10480E). O local de covariância de Foucault será instalado em 2025 sobre um mosaico de florestas naturais, degradadas e plantadas (*Tectona grandis* e *Senna siamea*). A reserva Lama Forest é conhecida

mundialmente e estudada há algum tempo. Sua área total é estimada em 16.250 ha e é de fácil acesso. Os distúrbios antropogênicos combinados com a mudança climática influenciam as condições de crescimento nessa paisagem e modificam os parâmetros demográficos, como germinação, crescimento de mudas e rebentos e taxas de mortalidade.

[Esses locais em Benin estão incluídos entre os locais de estudo candidatos no item 6.2.2.](#)

G. Tópicos além do escopo do PANGEA

Embora o PANGEA seja ambicioso e integrador, houve vários tópicos que foram considerados fora do escopo pelos Grupos de Trabalho e pela liderança do PANGEA. Esses itens estão listados na Tabela G-1.

Tabela G-1. Itens, tópicos e perguntas que foram determinados como estando além do escopo do PANGEA	
ITEM/TÓPICO/QUESTÃO EXCLUÍDO	POR QUE
COMO OS ESTOQUES DE CARBONO DO SOLO ESTÃO MUDANDO?	Não há ligação direta com o sensoriamento remoto, e a mineralogia é mais importante do que a produtividade para o controle dos estoques de carbono. As torres de fluxo de covariância de Foucault não conseguem separar a respiração autotrófica da respiração heterotrófica, e há muita heterogeneidade na escala entre as câmaras de solo e as torres
ÓXIDO NITROSO (N₂O)	As florestas tropicais são uma importante fonte global de N ₂ O. No entanto, devido ao tempo de vida troposférico extremamente longo do N ₂ O, é difícil quantificar fontes e sumidouros regionais e locais usando técnicas que dependem de amostragem atmosférica, como inversão de fluxo e covariância de vórtices. A falta dessas técnicas top-down resulta em restrições limitadas sobre fontes e sumidouros regionais e locais de N ₂ O. As medições do ecossistema de N ₂ O são limitadas principalmente a técnicas de câmara. Como os fluxos de N ₂ O são altamente episódicos e espacialmente variáveis, o esforço de amostragem necessário para quantificar adequadamente as fontes de N ₂ O é muito grande. Apesar da importância do N ₂ O, os custos para quantificar adequadamente o N ₂ O são muito altos em comparação com outros estudos que podem ser realizados como parte do PANGEA.
MANGUEZAIS E FLORESTAS MONTANHOSAS	Os mangues tropicais e as florestas montanas constituem áreas de domínio relativamente pequenas dentro dos trópicos mais amplos, embora ambos sejam altamente relevantes devido à adaptação exclusiva dos organismos aos microambientes e contribuintes importantes para o ciclo de carbono. Os ambientes montanhosos e costeiros exigem uma amostragem específica e detalhada para levar em conta a heterogeneidade das características topográficas e edáficas, o que limitaria a amostragem em outros gradientes de grande escala. Os ambientes costeiros apresentam desafios adicionais com relação ao tempo de amostragem (especialmente para lidar). No entanto, há oportunidades para o PANGEA alinhar os esforços com outras pesquisas sobre manguezais tropicais e florestas montanhosas.
COMO MELHORAR A DURAÇÃO E A CONFIABILIDADE DA PREVISÃO DO TEMPO NOS TRÓPICOS? COMO AS PREVISÕES DE VARIABILIDADE E MUDANÇA CLIMÁTICA PODEM SER APRIMORADAS NOS TRÓPICOS?	Essas são questões científicas importantes, mas foram consideradas fora do escopo de uma campanha de campo de ecologia terrestre. No entanto, os resultados do PANGEA sobre uma melhor compreensão dos controles da biosfera sobre os ciclos de energia, água e carbono contribuirão indiretamente para melhorar as previsões meteorológicas e as previsões da variabilidade climática.
FUNCIONAMENTO DA RAIZ E INTERAÇÕES DA FAUNA/MICROORGANISMOS DO SOLO COM O FUNCIONAMENTO DO ECOSISTEMA	Esses tópicos não foram incluídos no escopo principal do PANGEA devido aos desafios atuais de dimensionar os processos abaixo do solo usando o sensoriamento remoto. Os elementos dessa área de pesquisa podem ser incluídos por meio de projetos sinérgicos com atividades atuais e futuras.

Tabela G-1. Itens, tópicos e perguntas que foram determinados como estando além do escopo do PANGEA

ITEM/TÓPICO/QUESTÃO EXCLUÍDO	POR QUE
COMO OS NUTRIENTES SÃO DISTRIBUÍDOS VERTICALMENTE EM UM DOSEL FLORESTAL (POR EXEMPLO, CONCENTRAÇÃO, SAZONALIDADE, VARIAÇÃO COM RECURSOS E GEOGRAFIA)?	A recuperação da heterogeneidade vertical das características das folhas exigiria uma amostragem de campo muito mais intensa, o que limitaria muito a capacidade de capturar a variação entre os gradientes na dinâmica do topo do dossel. Entretanto, essa é uma questão importante e pode ser investigada em pequenas escalas por meio de projetos sinérgicos.
QUAIS PROCESSOS DE SUPERFÍCIE IMPULSIONAM O DESENVOLVIMENTO CONVECTIVO, A PRECIPITAÇÃO E OS EVENTOS EXTREMOS EM FLORESTAS TROPICAIS E COMO ELES SÃO INFLUENCIADOS PELAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS?	Esse tópico de pesquisa é parcialmente abordado na Q20, mas as medições pretendidas durante o PANGEA não serão suficientes para abordar essa questão como um projeto autônomo. Os elementos dessa questão podem ser abordados por meio de projetos colaborativos mais amplos.
COMO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E OS EXTREMOS AFETAM AS INTERAÇÕES NUVEM-AEROSSOL, A QUÍMICA ATMOSFÉRICA E OS FEEDBACKS TERRA-ATMOSFERA ASSOCIADOS ÀS FLORESTAS TROPICAIS?	As medições pretendidas durante o PANGEA não serão suficientes para abordar essa questão como um projeto autônomo. Os elementos dessa questão podem ser abordados em projetos colaborativos mais amplos.
COMO OS FATORES SOCIOECONÔMICOS, COMO A POSSE DA TERRA, A ACESSIBILIDADE E AS POLÍTICAS, INTERAGEM COM OS FATORES BIOFÍSICOS E CLIMÁTICOS PARA INFLUENCIAR A REGENERAÇÃO DA FLORESTA E O FORNECIMENTO DE SERVIÇOS DE ECOSSISTEMA?	Essa pergunta fornece uma base importante para entender por que o uso e a cobertura da terra estão mudando. No entanto, ela se baseia mais em dados sociais, políticos e econômicos e não há uma ligação clara entre essa questão e o sensoriamento remoto. Alguns projetos financiados pelo PANGEA podem optar por abordar essa questão usando métodos inovadores. Também há oportunidades de alinhar as atividades do PANGEA com esforços relacionados para abordar essa questão.
QUAIS SÃO AS CONEXÕES ENTRE OS PONTOS DE INFLEXÃO SOCIAIS E OS PONTOS DE INFLEXÃO ECOLÓGICOS NOS TRÓPICOS, E COMO ELES VARIAM EM DIFERENTES GEOGRAFIAS TROPICAIS?	Embora seja necessário compreender a relação entre como os feedbacks sociais e ecológicos influenciam o potencial das florestas tropicais para atingir transições críticas, não há ligação direta entre essa questão e o sensoriamento remoto. Alguns projetos financiados pelo PANGEA podem optar por abordar essa questão usando métodos inovadores. Também há oportunidades de alinhar as atividades do PANGEA com esforços relacionados para abordar essa questão.
QUESTÕES RELEVANTES DENTRO DO ESCOPO DO PANGEA, MAS NÃO DIRETAMENTE DEFINIDAS NO WHITE PAPER	
QUAL É A SENSIBILIDADE DAS PROJEÇÕES DE MODELOS TERRESTRES A DIFERENTES PARAMETRIZAÇÕES DE DIVERSIDADE FUNCIONAL DE PLANTAS (POR EXEMPLO, PARAMETRIZAÇÕES DE DIVERSIDADE PANTROPICAL VERSUS ESPECÍFICA DE CONTINENTE; DIVERSIDADE DENTRO DE COMUNIDADES SIMULADAS/CÉLULA DE GRADE)? QUAIS CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS ESTÃO FALTANDO NAS PARAMETRIZAÇÕES?	Essas duas perguntas não estão incluídas nas perguntas científicas do PANGEA porque não estão diretamente relacionadas às medições de sensoriamento remoto. Entretanto, quantificar e restringir a incerteza dos parâmetros dos modelos será um mecanismo importante pelo qual os modelos serão integrados às observações, e a falta de características funcionais que podem ser medidas pelo PANGEA será avaliada em consulta com os modeladores durante a elaboração do Plano Experimental Conciso.
QUAIS SÃO OS IMPACTOS DOS EFEITOS DE BORDA SOBRE A RESILIÊNCIA E A COMPLEXIDADE ESTRUTURAL DA FLORESTA?	Essa pergunta não está diretamente listada como uma pergunta científica importante do PANGEA, mas fará parte de uma investigação mais ampla dos impactos de várias perguntas (por exemplo, Q15, Q16, Q20).
COMO AS DIFERENÇAS NO LEGADO DE DESMATAMENTO E DEGRADAÇÃO ENTRE OS CONTINENTES AFETAM A RECUPERAÇÃO FLORESTAL E A RESTAURAÇÃO DOS PRINCIPAIS SERVIÇOS DE ECOSSISTEMA?	Essa pergunta se baseia principalmente em dados históricos, que podem estar fora do escopo do PANGEA. No entanto, essa linha de pesquisa será fundamental para contextualizar as observações no PANGEA e será abordada por meio de parcerias (por exemplo, MapBiomas).