



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

Los bosques tropicales son los más biodiversos del planeta y representan el 40% de la biomasa terrestre y el 20% de las emisiones anuales mundiales de metano (CH_4). Bombean vapor de agua a la atmósfera enfriando los trópicos mientras riegan las explotaciones agrícolas de la zona templada. Los bosques tropicales han sido históricamente importantes sumideros de carbono, pero la deforestación, las sequías y tormentas extremas y los incendios forestales cada vez más frecuentes están convirtiendo algunas regiones en fuentes netas de carbono. Pero este cambio no es uniforme. Los paisajes forestales tropicales difieren en sus tendencias recientes de flujo de carbono, su sensibilidad a los fenómenos extremos y sus interacciones con los cambios climáticos y de uso del suelo. Las diferentes historias evolutivas y la enorme heterogeneidad de las condiciones ambientales y las interacciones humanas sustentan una variación regional potencialmente significativa en la resiliencia de los bosques tropicales, con consecuencias para todo el sistema terrestre. Sin embargo, grandes lagunas de datos nos impiden confirmarlo y utilizar al máximo los conjuntos de datos satelitales. Los cambios regionales tienen repercusiones globales sobre la dinámica del ciclo del carbono y la pérdida de biodiversidad que requieren acciones adaptadas a cada región para mitigar estos resultados y conservar los biomas forestales tropicales de importancia mundial. PANGEA se necesita urgentemente para colmar las lagunas de conocimiento críticas relativas a los cambios climáticos rápidos y a gran escala y a los cambios en el uso de la tierra que ya se están produciendo en los bosques tropicales.

PANGEA investigará si los bosques tropicales -con especial énfasis en África y América- compartirán el mismo destino o variarán en su respuesta al cambio.

En 2022, la NASA solicitó estudios de alcance para orientar la selección de una nueva campaña de campo de Ecología Terrestre. *La investigación PAN tropical de bioGeoquímica y Adaptación Ecológica (PANGEA)* respondió a esta convocatoria, proponiendo una campaña de bosques tropicales a escala múltiple para:

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

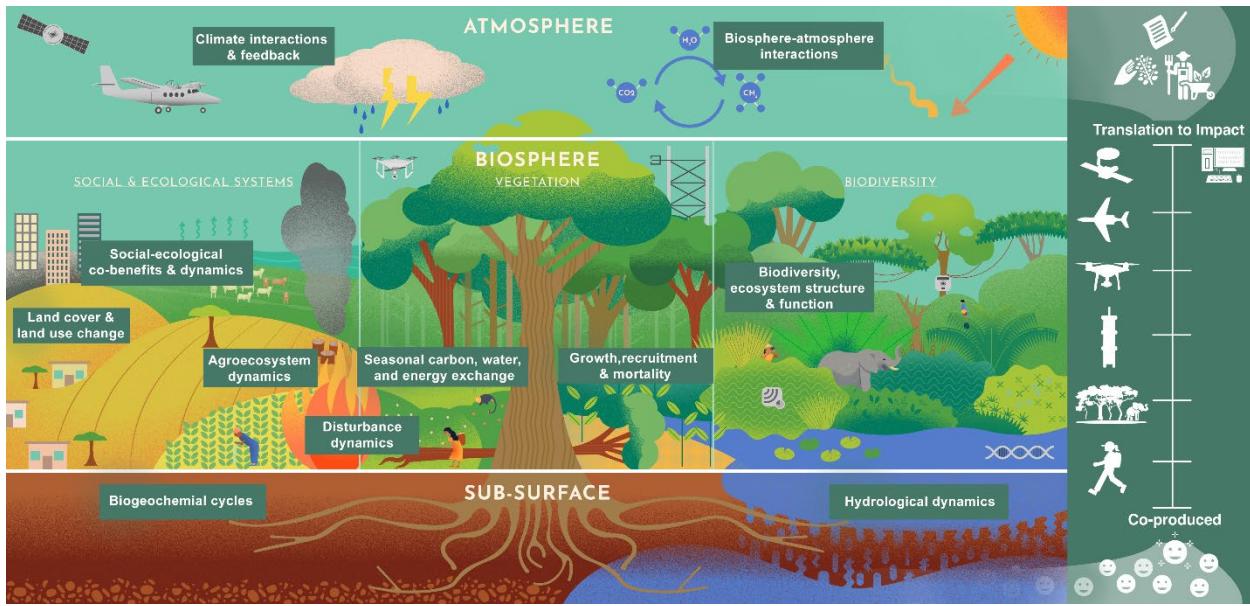
Nos encontramos en un momento sin precedentes de abundancia de datos, modelos y avances computacionales. Gracias a las nuevas y futuras observaciones por satélite con lidar, radar y espectroscopia de imágenes, tenemos la oportunidad de estudiar y observar la biomasa de los bosques tropicales, los flujos de carbono, la biodiversidad y las funciones de los ecosistemas con más detalle que nunca. Sin embargo, es necesario superar importantes lagunas de conocimiento, datos y metodología en los trópicos para beneficiarse plenamente de las misiones satelitales actuales y futuras con el fin de responder a preguntas científicas críticas, PANGEA es esencial para permitir mediciones coordinadas en tierra, aerotransportadas y satelitales que operen simultáneamente para superar estas limitaciones.

PANGEA investigará la variación entre y dentro de los dos bosques tropicales más grandes de la Tierra en las **Américas** y **Africa Central**, integrando al mismo tiempo conjuntos de datos e investigaciones de actividades existentes y complementarias en todos los trópicos. Las preguntas de investigación de PANGEA se centran en cinco áreas temáticas: **ciclos biogeoquímicos, biodiversidad, interacciones y retroalimentaciones climáticas, sistemas socioecológicos y dinámica de las perturbaciones**. Para fundamentar las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático y la conservación de la biodiversidad es necesario responder a tres preguntas fundamentales:

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

Para responder a las preguntas anteriores, **los objetivos de PANGEA** son:

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



Mediciones y escalas de PANGEA. PANGEA adopta un enfoque integrado de la ciencia y las aplicaciones, con mediciones desde tierra, desde torres, desde drones y desde aviones en paisajes forestales tropicales de África y América. La modelización y los análisis por teledetección satelital integran las mediciones pan-tropicales.

Ahora es posible estudiar la estructura y la biomasa de los bosques pantropicales utilizando el lidar espacial de **GEDI** y las próximas misiones de radar, como la misión **NISAR** de la NASA-ISRO y la misión **BIOMASS** de la ESA. En la actualidad, podemos estudiar en detalle la diversidad foliar y la química de los ecosistemas y los cultivos utilizando espectroscopía de alta fidelidad de las misiones actuales, incluidas las misiones **EMIT** y **PACE** de la NASA y **PRISMA** de la Agencia Espacial Italiana y las próximas misiones **SBG** de la NASA y **CHIME** de la ESA. La fluorescencia inducida por el sol (SIF) del dosel, un correlato de la productividad primaria bruta (GPP), se mide ahora con instrumentos de varias plataformas de satélite, como **OCO-2** y **OCO-3** y **TROPOMI**. Desde hace tiempo, los satélites meteorológicos miden la temperatura de la superficie terrestre con una resolución gruesa, y ahora **ECOSTRESS** lo hace con una resolución de 70 m, lo que permite comprender mejor la evapotranspiración. Las observaciones por satélite de la columna total de CO₂ (por ejemplo, desde **GOSAT**, **OCO-2/3** y **TROPOMI**) y las anomalías gravitacionales (**GRACE** y **GRACE-FO**) proporcionan restricciones regionales sobre los presupuestos atmosféricos de carbono y agua. Del mismo modo, las mediciones de los estadios de las aguas superficiales están ahora disponibles desde el espacio a través de **SWOT**. Fuentes como Planet y la serie de misiones geoestacionarias **GOES-R** proporcionan datos de alta resolución espacial y temporal sobre la superficie terrestre. Muchas de estas fuentes de información apenas se han empleado en los estudios de los bosques tropicales. **PANGEA apoya la calibración y validación, el desarrollo de algoritmos y productos, y la utilidad global de estos satélites actuales y futuros de la NASA y de las agencias espaciales asociadas.** La campaña multiescala coordinada de PANGEA integra mediciones realizadas por drones y aeronaves (por ejemplo, AVIRIS, LVIS, lidar de pequeña huella, UAVSAR, CARAFE) con mediciones terrestres (por ejemplo, mediciones de torres de flujo y cámaras, mediciones de rasgos, movimiento de animales, bioacústica y Conocimiento Ecológico Indígena) para avanzar en la comprensión de los sistemas forestales tropicales y la utilidad de la teledetección por satélite para medirlos y monitorizarlos.

Los bosques tropicales son los menos estudiados de todos los grandes biomas terrestres de la Tierra. La escasez de observaciones en las regiones tropicales dificulta la ampliación de los resultados de los distintos centros de investigación a niveles regionales, pantropicales y mundiales más amplios.

PANGEA se apoya en las exitosas campañas aéreas y de campo de la NASA en África y Sudamérica, entre las que se incluyen **SAFARI 2000**, **LBA**, **AfriSAR-1 y -2**, **BioSCape** y varias misiones Earth Venture Suborbital (EVS). PANGEA se basará en estos precedentes para permitir a los investigadores financiados por la NASA responder a cuestiones científicas cruciales mediante la comparación entre los principales sistemas forestales tropicales. Entre los logros recientes que demuestran su viabilidad se incluye la exitosa campaña AfriSAR-2, que recogió datos aéreos UAVSAR en las bandas L y P sobre Camerún, la República Democrática del Congo (RDC), Gabón, Ghana, la República del Congo y Santo Tomé y Príncipe. Estas campañas proporcionan valiosos datos iniciales, pero sigue existiendo una necesidad crítica de mediciones terrestres, aéreas y satelitales coincidentes en paisajes tropicales muy variables, para captar la variación en la estructura y función de los ecosistemas dentro de los continentes y entre ellos. Estas mediciones coincidentes son especialmente importantes en África, donde las lagunas de datos son mayores y la comprensión de los procesos es más pobre.

La campaña PANGEA se ejecutaría a lo largo de 6 a 9 años, comenzando en 2026 tras la fase de definición científica. Obtenemos las **Mediciones Científicas Esenciales de Línea Base, Umbral y Desalcance** a partir de los Objetivos Científicos de PANGEA:

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

PANGEA incluirá un dominio central y otro ampliado. El dominio ampliado abarcará los bosques pantropicales y se le dará prioridad en los análisis de teledetección por satélite y modelización. El ámbito central de PANGEA se centrará en los biomas tropicales de África y América. Tanto el dominio central como el ampliado abarcarán los bosques tropicales húmedos, incluidos los bosques inundados, los humedales y las turberas. El dominio ampliado permitirá la inclusión de conjuntos de datos existentes y la recopilación oportunista en Asia y Australia.

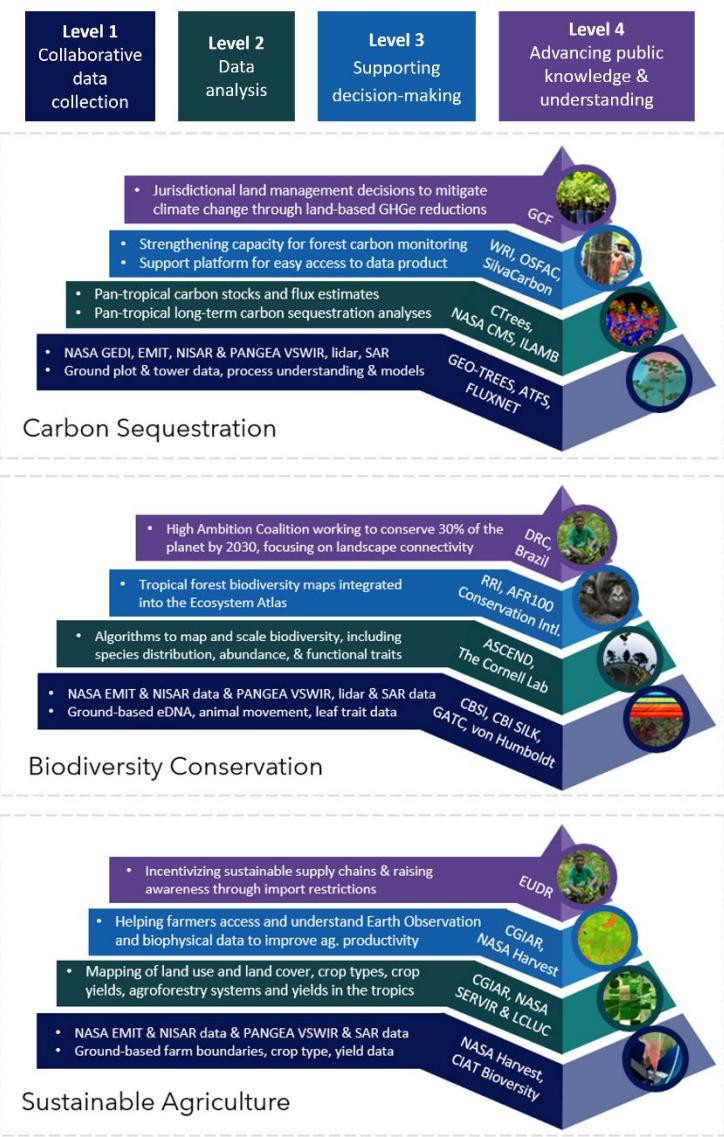
PANGEA coordinará estrechamente la selección del paisaje con los esfuerzos que están activamente en el proceso de selección de sitios para la recopilación de datos complementarios y la inversión en infraestructura. Entre ellos se incluyen GEO-TREES, la campaña amazónica INPE-ESA, la iniciativa One Forest Vision, las mediciones de campo de metano y turberas tropicales financiadas por la Fundación Moore y la NSF, así como múltiples propuestas del Instituto Virtual de Ciencias Schmidt para el Ciclo del Carbono centradas en los trópicos. Se formalizará un proceso de selección de paisajes como parte del Plan Experimental Conciso para garantizar la transparencia. Este proceso se basará en los debates en curso con los socios institucionales locales y los administradores de sitios que se iniciaron durante el proceso de definición del alcance e incluirá el diseño conjunto con los pueblos indígenas y las comunidades locales.

En colaboración con las instituciones locales, PANGEA dará prioridad a la formación, el desarrollo de capacidades y la educación que prepare a la próxima generación para continuar este trabajo mucho después de la campaña PANGEA. PANGEA es una oportunidad importante para aumentar la comprensión de las observaciones de la Tierra y ampliar el uso de los datos, productos y servicios de la Tierra de la NASA en todo el mundo. A medida que PANGEA avance en el conocimiento de los bosques tropicales y su vulnerabilidad y resistencia a los cambios climáticos, PANGEA desarrollará métodos innovadores, recopilará valiosos conjuntos de datos y producirá hallazgos críticos que pueden ayudar a científicos, gobiernos, pueblos indígenas y comunidades locales, profesionales de la conservación, empresas privadas y más a comprender sus impactos ambientales y tomar medidas urgentes para mitigar y adaptarse a los cambios climáticos y la pérdida de biodiversidad.

PANGEA comparte el objetivo estratégico de NASA Earth Science de avanzar e integrar el conocimiento de las ciencias de la Tierra para capacitar a la humanidad a crear un mundo más resiliente durante la próxima década. El refuerzo de las capacidades y la inversión en educación asociados a PANGEA son fundamentales para este objetivo, así como para preparar a la próxima generación con los conocimientos y herramientas necesarios. Es fundamental que el desarrollo de capacidades, la formación y la educación de PANGEA se dirijan a las comunidades de investigadores y trabajadores con sede en Estados Unidos, así como a las comunidades locales y nacionales de los países con bosques tropicales asociados a PANGEA. PANGEA se asociará con los programas existentes de la NASA, así como con las instituciones colaboradoras locales e internacionales, para planificar y ejecutar actividades de formación que sean apropiadas para una gama de posibles alumnos, incluidos los estudiantes, los científicos que inician su carrera, la fuerza de trabajo en general, y los pueblos indígenas y las comunidades locales.

El Estudio Decenal de 2017 nos insta a "perseguir objetivos cada vez más ambiciosos y soluciones innovadoras que mejoren y aceleren el valor científico/aplicable de las observaciones y análisis de la Tierra desde el espacio para la nación y el mundo, de forma que aporten un gran valor". Ahora es el momento de realizar inversiones estratégicas en colaboraciones internacionales ambiciosas para salvar la distancia entre los rápidos avances de la ciencia y la tecnología y la capacidad de la sociedad para aprovecharlos en pro de un mundo más resistente. PANGEA es muy relevante para el objetivo estratégico de la NASA de avanzar e integrar el conocimiento de las ciencias de la Tierra para capacitar a la humanidad para crear un mundo más resistente. En concreto, PANGEA apoya la estrategia de la NASA "Earth Science to Action" mediante:

- Investigar los riesgos de cruzar puntos de inflexión con posibles impactos en cascada.
- Apoyar los esfuerzos para aumentar la resiliencia de la Tierra mediante la mitigación y la adaptación.
- Facilitar el desarrollo de herramientas, modelos y sistemas de evaluación eficientes, interactivos y de extremo a extremo, con latencias, escalas temporales y espaciales adecuadas y cuantificación de la incertidumbre para permitir acciones basadas en la ciencia a las comunidades, los responsables de la toma de decisiones y los responsables políticos.



Estrategia de aplicación de **PANGEA Earth Science to Action**, con posibles áreas focales en el secuestro de carbono y la mitigación del cambio climático, la conservación de la biodiversidad y la agricultura sostenible.

PANGEA desarrollará nuevas capacidades para vigilar el carbono, la biodiversidad y la agricultura utilizando la teledetección por satélite y apoyará el desarrollo de herramientas para traducir la ciencia en acción a través de la asociación con diversos socios, incluidos los gobiernos, los IPLC, la sociedad civil y la industria privada. Entre ellos se incluyen avances en: 1) **cartografía de la estabilidad del secuestro de carbono a largo plazo**; 2) **seguimiento del flujo de metano**; 3) **conservación de la biodiversidad**; 3) **agricultura sostenible**. PANGEA involucra a diversas comunidades para abordar las cuestiones científicas y aplicaciones de PANGEA, identificar sinergias con las prioridades locales de investigación, e implementar PANGEA de una manera que sea ampliamente beneficiosa en los paisajes y países seleccionados para la investigación. La estrategia se basa en los conocimientos, la pericia y las experiencias compartidas a lo largo de la campaña de alcance de PANGEA, y complementará y ampliará muchos de los esfuerzos existentes, pero también es urgentemente necesaria para llenar los vacíos que estas otras actividades han dejado sin cubrir.

La coproducción está en el centro de la ciencia y las aplicaciones transdisciplinarias de PANGEA y de la formación de la próxima generación de científicos y líderes.