



Investigasi tropis PAN tentang bioGeokimia dan Adaptasi Ekologi (PANGEA): Melingkupi Kampanye Lapangan yang Disponsori NASA

Hutan tropis merupakan hutan dengan keanekaragaman hayati tertinggi di dunia dan menyumbang 40% biomassa terestrial bumi dan 20% emisi metana global tahunan (CH_4). Hutan tropis memompa uap air ke atmosfer yang mendinginkan daerah tropis sekaligus mengairi pertanian di daerah beriklim sedang. Hutan tropis secara historis merupakan penyerap karbon yang signifikan, namun deforestasi, kekeringan dan badai yang ekstrem, serta kebakaran hutan yang semakin sering terjadi mengubah beberapa wilayah menjadi sumber karbon bersih. Namun, perubahan ini tidak seragam. Bentang alam hutan tropis memiliki tren fluks karbon yang berbeda dalam hal tren fluks karbon terkini, sensitivitas terhadap kejadian ekstrem, dan interaksi dengan perubahan iklim dan perubahan tata guna lahan. Sejarah evolusi yang berbeda dan heterogenitas yang sangat besar dalam kondisi lingkungan dan interaksi manusia mendukung variasi regional yang berpotensi signifikan dalam ketahanan hutan tropis, dengan konsekuensi bagi seluruh sistem bumi. Namun, kesenjangan data yang besar menghalangi kita untuk mengonfirmasi hal ini dan memanfaatkan data satelit secara maksimal. Perubahan regional memiliki dampak global terhadap dinamika siklus karbon dan hilangnya keanekaragaman hayati yang membutuhkan tindakan yang disesuaikan secara regional untuk memitigasi dampak tersebut dan melestarikan bioma hutan tropis yang penting secara global. PANGEA sangat dibutuhkan untuk menjembatani kesenjangan pengetahuan yang kritis terkait perubahan iklim yang cepat dan berskala besar serta perubahan tata guna lahan yang sedang berlangsung di hutan tropis.

PANGEA akan menyelidiki apakah hutan tropis - dengan penekanan khusus pada Afrika dan Amerika - akan mengalami nasib yang sama atau berbeda dalam merespon perubahan.

Pada tahun 2022, NASA menyerukan studi pelingkupan untuk memandu pemilihan kampanye lapangan Ekologi Terestrial yang baru. *Penyelidikan tropis PAN tentang bioGeokimia dan Adaptasi Ekologi* (PANGEA) menanggapi seruan ini, dengan mengusulkan kampanye hutan tropis berskala besar:

- **Menjawab** pertanyaan-pertanyaan sains yang relevan dan mendesak secara global yang menekankan pada perbandingan di antara formasi hutan tropis utama di planet kita melalui analisis dan interpretasi yang efektif dari pengamatan penginderaan jarak jauh (satelit dan udara) yang dikombinasikan dengan pengukuran di lapangan serta pemodelan lingkungan dan ekosistem.
- **Memberikan** informasi yang akan berkontribusi pada konservasi dan regenerasi hutan tropis, serta mitigasi dan adaptasi perubahan iklim.
- **Memastikan** kolaborasi transdisipliner dan membangun hubungan baru di antara berbagai mitra, termasuk para ilmuwan dari Amerika Serikat dan negara-negara yang memiliki hutan tropis, badan antariksa internasional, masyarakat adat dan masyarakat setempat, para pengambil keputusan, dan masyarakat yang mengambil tindakan di daerah tropis.
- **Melatih dan Mendidik** generasi ilmuwan berikutnya dan tenaga kerja yang lebih luas dari Amerika Serikat dan negara-negara tropis yang menjadi lokasi penelitian lapangan.
- **Membangun** warisan data terbuka dan ilmu pengetahuan terbuka untuk memperkuat kemitraan di antara para ilmuwan dan institusi di AS, negara-negara tropis, dan negara-negara lain sebagai dasar untuk penelitian dan aplikasi di masa depan.

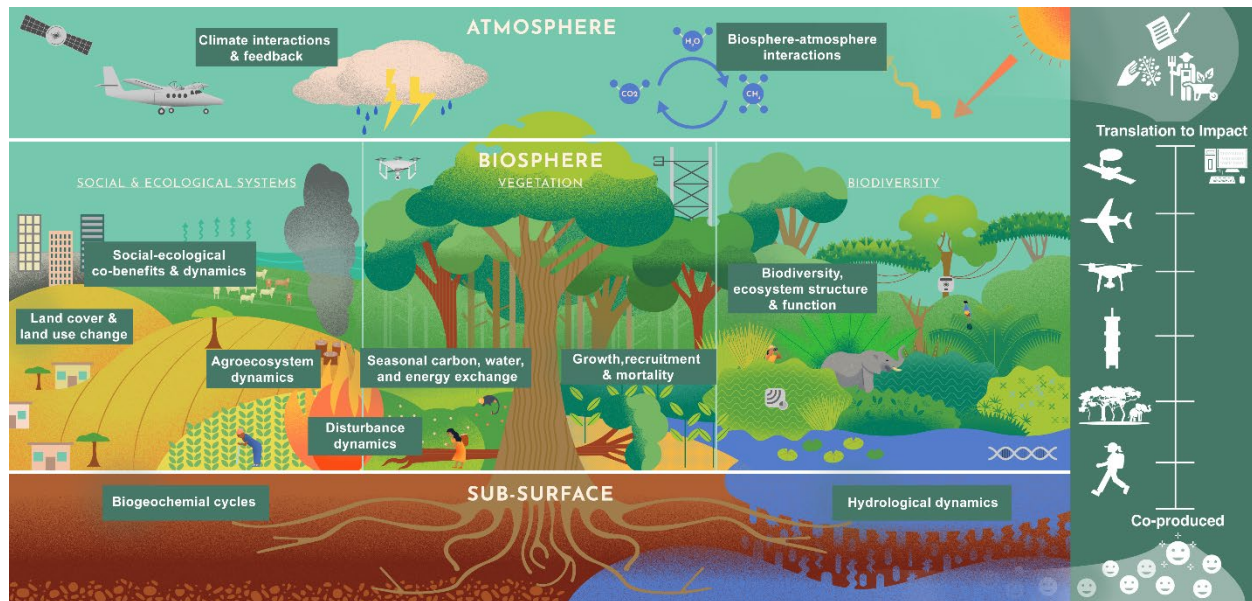
Kita berada pada masa yang kaya data, kaya model, dan maju secara komputasi. Dengan adanya pengamatan satelit yang baru dan yang akan datang menggunakan lidar, radar, dan spektroskopi pencitraan, terdapat peluang untuk mempelajari dan mengamati biomassa hutan tropis, fluks karbon, keanekaragaman hayati, dan fungsi ekosistem dengan lebih rinci daripada sebelumnya. Namun, kesenjangan pengetahuan, data, dan metodologi di daerah tropis perlu diatasi untuk mendapatkan manfaat penuh dari misi satelit saat ini dan di masa depan dalam menjawab pertanyaan-pertanyaan sains yang penting, PANGEA sangat penting untuk memungkinkan pengukuran di darat, udara, dan satelit yang terkoordinasi yang beroperasi secara bersamaan untuk mengatasi keterbatasan ini.

PANGEA akan menyelidiki variasi antara dan di dalam dua hutan tropis terbesar di dunia, yaitu di **Amerika** dan **Afrika Tengah**, sembari mengintegrasikan kumpulan data dan penelitian dari berbagai kegiatan yang sudah ada dan yang saling melengkapi di wilayah tropis. Pertanyaan penelitian PANGEA berfokus pada lima area tematik, yaitu **Siklus Biogeokimia; Keanekaragaman Hayati; Interaksi dan Umpa Balik Iklim; Sistem Sosial-Ekologi; dan Dinamika Gangguan**. Untuk menginformasikan strategi mitigasi dan adaptasi iklim serta konservasi keanekaragaman hayati, diperlukan jawaban atas tiga pertanyaan penting:

1. Bagaimana **pola** perubahan terkini (5-30 tahun) dan yang sedang berlangsung pada kondisi, dinamika, dan umpan balik lanskap hutan tropis, serta bagaimana **pola-pola** tersebut bervariasi secara geografis?
2. **Proses** apa yang mengendalikan heterogenitas kerentanan bentang alam hutan tropis terhadap perubahan struktural dan fungsional pada masa Antroposen?
3. Bagaimana perubahan yang sedang berlangsung dan yang **diproyeksikan** di masa depan pada lanskap hutan tropis akan mengubah umpan balik terhadap iklim lokal, regional, dan global serta sistem sosial-ekologi?

Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan di atas, **tujuan PANGEA** adalah untuk:

1. **Mengkarakterisasi dan mengukur** respons hutan tropis yang heterogen terhadap perubahan iklim dan perubahan tata guna lahan;
2. **Mengatasi** kebutuhan kalibrasi, validasi, dan pengembangan algoritme untuk memastikan pengukuran dapat diambil secara akurat dari set data penginderaan jauh satelit di hutan tropis, yang pada akhirnya akan memajukan kegunaan misi satelit secara global;
3. **Membatasi** ketidakpastian model prediksi fluks karbon tropis dan siklus biogeokimia, keanekaragaman hayati, dan umpan balik hutan-iklim dengan meningkatkan pemahaman proses dan memajukan integrasi model data penginderaan jauh.
4. **Mengembangkan** kemampuan baru untuk memantau karbon, keanekaragaman hayati, dan pertanian dengan menggunakan penginderaan jarak jauh satelit dan mendukung pengembangan alat untuk menerjemahkan ilmu pengetahuan menjadi tindakan.
5. **Melatih** generasi ilmuwan dan pemimpin berikutnya untuk melanjutkan pekerjaan ini setelah PANGEA.



Pengukuran dan penskalaan PANGEA. PANGEA mengambil pendekatan terpadu terhadap ilmu pengetahuan dan aplikasi, dengan pengukuran di darat, menara, drone, dan pesawat terbang di lanskap hutan tropis di Afrika dan Amerika. Pemodelan dan analisis penginderaan jauh satelit mengintegrasikan secara pan-tropis

Struktur dan biomassa hutan pan-tropis sekarang dapat dipelajari menggunakan lidar dari **GEDI** dan misi radar yang akan datang, termasuk misi NASA-ISRO **NISAR** dan misi ESA **BIOMASS**. Saat ini, kita dapat mempelajari keanekaragaman daun dan kimiawi ekosistem dan tanaman secara terperinci menggunakan spektroskopi dengan ketelitian tinggi dari misi saat ini termasuk misi **EMIT** dan **PACE** dari NASA dan Badan Antariksa Italia **PRISMA** serta misi NASA **SBG** dan ESA **CHIME** yang akan datang. Fluoresensi yang diinduksi oleh matahari (SIF) kanopi, yang berkorelasi dengan produktivitas primer bruto (GPP), sekarang diukur oleh instrumen pada beberapa platform satelit termasuk **OCO-2** dan **OCO-3** dan **TROPOMI**. Suhu permukaan tanah telah lama tersedia pada resolusi kasar dari satelit cuaca dan sekarang diukur pada resolusi 70 m dari **ECOSTRESS** yang memberikan wawasan baru tentang evapotranspirasi. Pengamatan satelit terhadap total kolom CO₂ (misalnya dari **GOSAT**, **OCO-2/3** dan **TROPOMI**) dan anomali gravitasi (**GRACE** dan **GRACE-FO**) memberikan batasan regional terhadap anggaran karbon dan air di atmosfer. Demikian pula, pengukuran ketinggian air permukaan sekarang tersedia dari luar angkasa melalui **SWOT**. Data resolusi spasial dan temporal yang tinggi pada permukaan tanah sekarang tersedia dari sumber-sumber seperti Planet dan rangkaian misi geostasioner **GOES-R**. Banyak dari sumber informasi ini yang hampir tidak pernah digunakan untuk studi hutan tropis. **PANGEA mendukung kalibrasi dan validasi, pengembangan algoritma dan produk, serta pemanfaatan global dari satelit-satelit yang ada saat ini dan yang akan diluncurkan oleh NASA dan lembaga-lembaga antariksa lainnya.** Kampanye multi-skala terkoordinasi PANGEA mengintegrasikan pengukuran drone dan pesawat terbang (misalnya, AVIRIS, LVIS, lidar tapak kecil, UAVSAR, CARAFE) dengan pengukuran di lapangan (misalnya, menara fluks dan pengukuran ruang, pengukuran sifat, pergerakan satwa, bioakustik, dan Pengetahuan Ekologi Pribumi) untuk memajukan pemahaman tentang sistem hutan tropis dan kegunaan penginderaan jarak jauh satelit untuk mengukur dan memantaunya.

Hutan tropis adalah yang paling sedikit diselidiki di antara semua bioma terestrial utama di Bumi. Langkanya pengamatan di wilayah tropis menyulitkan untuk memperluas temuan dari lokasi penelitian individual ke tingkat regional, pan-tropis, dan global yang lebih luas.

PANGEA berdiri di atas pundak kampanye lapangan dan udara NASA yang sangat sukses di Afrika dan Amerika Selatan, termasuk namun tidak terbatas pada **SAFARI 2000, LBA, AfriSAR-1 dan -2, BioSCape**, dan beberapa misi Earth Venture Suborbital (EVS). PANGEA akan membangun preseden-preseden ini untuk memungkinkan para peneliti yang didanai NASA menjawab pertanyaan-pertanyaan ilmiah yang krusial melalui perbandingan di antara sistem-sistem hutan tropis yang utama. Pencapaian terbaru yang menunjukkan kelayakan termasuk kampanye AfriSAR-2 yang sangat sukses yang mengumpulkan data UAVSAR L-band dan P-band dari udara di atas Kamerun, Republik Demokratik Kongo (RDK), Gabon, Ghana, Republik Kongo, dan Sao Tome dan Principe. Kampanye ini memberikan data awal yang berharga, namun masih ada kebutuhan penting untuk pengukuran di darat, udara, dan satelit yang dilakukan secara bersamaan di lanskap tropis yang sangat bervariasi, untuk menangkap variasi struktur dan fungsi ekosistem di dalam dan di seluruh benua. Pengukuran yang dilakukan secara bersamaan ini sangat penting di Afrika, di mana kesenjangan data adalah yang terbesar, dan pemahaman berbasis proses adalah yang paling buruk.

Kampanye PANGEA akan dilaksanakan selama 6 hingga 9 tahun, dimulai pada tahun 2026 setelah fase definisi sains. Kami memperoleh **Baseline, Ambang Batas, dan Cakupan Pengukuran Ilmiah Esensial** dari Tujuan Sains PANGEA:

- **Baseline:** Pengukuran PANGEA mencakup ~3-6 lanskap tropis Afrika dan ~3-6 lanskap tropis Amerika yang menangkap akhir musim hujan dan akhir musim kemarau.
- **Ambang batas:** Pengukuran PANGEA mencakup 2 lanskap tropis Afrika dan 2 lanskap tropis Amerika yang menangkap akhir musim hujan dan akhir musim kemarau.
- **Cakupan:** Pengukuran PANGEA mencakup 2 lanskap tropis Afrika yang menangkap akhir musim hujan dan musim kemarau, yang akan dibandingkan dengan informasi untuk daerah tropis Amerika yang dikumpulkan dari data yang ada, proyek dan kampanye lain yang dipimpin oleh para kolaborator, pembelian data komersial, dan pesawat tak berawak yang dapat dikerahkan. Opsi cakupan ini memenuhi sebagian tujuan PANGEA dengan tetap memperhitungkan potensi pembatasan pendanaan atau ketidakpastian geopolitik.

PANGEA akan mencakup domain inti dan domain yang diperluas. Domain yang diperluas akan mencakup hutan pan-tropis dan akan diprioritaskan untuk penginderaan jarak jauh satelit dan analisis pemodelan. Domain inti PANGEA akan berfokus pada bioma tropis di Afrika dan Amerika. Baik domain inti maupun domain yang diperluas akan mencakup hutan tropis yang lembab, termasuk hutan yang tergenang, lahan basah, dan lahan gambut. Domain yang diperluas akan memungkinkan penyertaan set data yang ada dan koleksi oportunistik di Asia dan Australia.

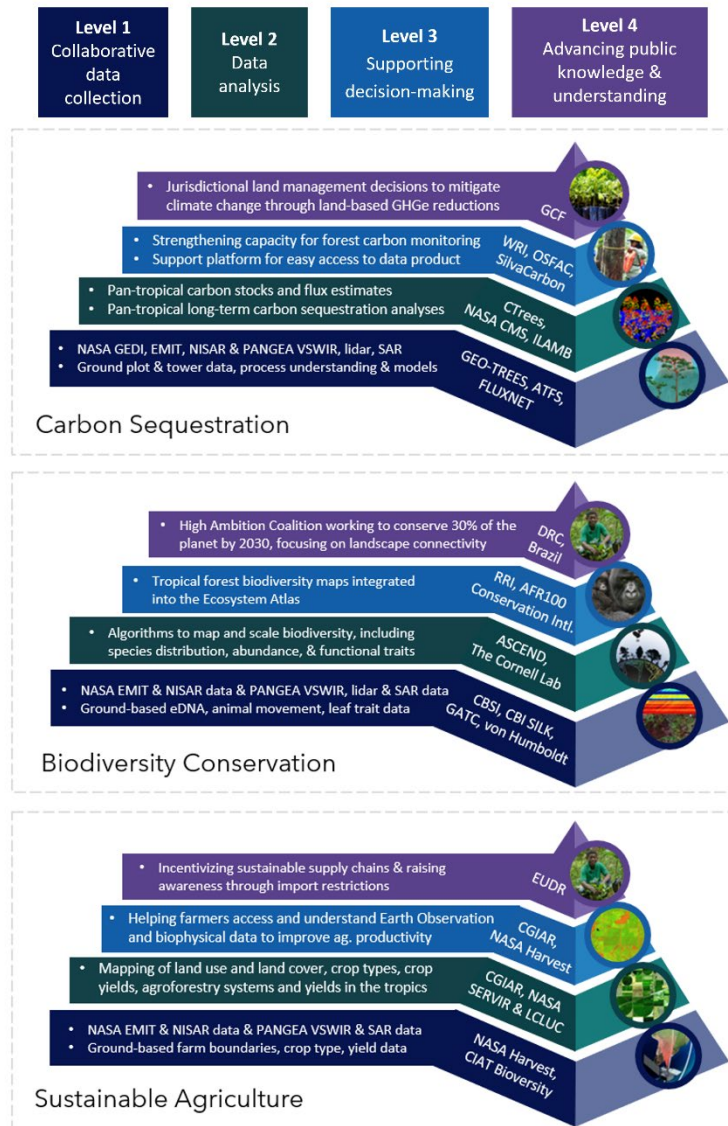
PANGEA akan mengkoordinasikan pemilihan lanskap secara erat dengan upaya-upaya yang secara aktif sedang dalam proses pemilihan lokasi untuk pengumpulan data pelengkap dan investasi infrastruktur. Upaya-upaya tersebut termasuk GEO-TREES, kampanye INPE-ESA Amazon, One Forest Vision Initiative, Moore Foundation dan pengukuran lapangan metana dan lahan gambut tropis yang didanai oleh NSF, serta berbagai proposal dari Schmidt Science Virtual Institute for the Carbon Cycle yang berfokus pada daerah tropis. Proses pemilihan lanskap akan diformalkan sebagai bagian dari Rencana Percobaan Ringkas untuk memastikan transparansi. Proses ini akan dibangun berdasarkan diskusi yang sedang berlangsung dengan mitra lembaga lokal dan manajer lokasi yang dimulai selama proses pelingkupan dan akan mencakup desain bersama dengan Masyarakat Adat dan Komunitas Lokal.

Dalam kemitraan dengan institusi lokal, PANGEA akan memprioritaskan pelatihan, pengembangan kapasitas, dan pendidikan yang mempersiapkan generasi berikutnya untuk melanjutkan pekerjaan ini dengan baik setelah kampanye PANGEA. PANGEA merupakan kesempatan penting untuk meningkatkan pemahaman tentang pengamatan Bumi dan memperluas penggunaan data, produk, dan layanan Bumi NASA di seluruh dunia. Seiring dengan kemajuan pengetahuan mengenai hutan tropis serta kerentanan dan ketahanannya terhadap perubahan iklim, PANGEA akan mengembangkan metode inovatif, mengumpulkan kumpulan data yang berharga, dan menghasilkan temuan-temuan penting yang dapat membantu para ilmuwan, pemerintah, masyarakat adat dan masyarakat lokal, praktisi konservasi, perusahaan swasta, dan lebih banyak lagi untuk lebih memahami dampak lingkungan mereka dan mengambil tindakan mendesak untuk memitigasi dan beradaptasi terhadap perubahan iklim serta hilangnya keanekaragaman hayati.

PANGEA memiliki tujuan strategis yang sama dengan NASA Earth Science dalam memajukan dan mengintegrasikan pengetahuan ilmu bumi untuk memberdayakan umat manusia dalam menciptakan dunia yang lebih tangguh dalam dekade mendatang. Memperkuat kapasitas dan berinvestasi dalam pendidikan yang terkait dengan PANGEA merupakan inti dari tujuan ini, dan sangat penting untuk mempersiapkan generasi berikutnya dengan keahlian dan alat yang diperlukan. Pengembangan kapasitas, pelatihan, dan pendidikan PANGEA akan menyasar komunitas penelitian dan tenaga kerja yang berbasis di Amerika Serikat, serta komunitas lokal dan nasional di negara-negara hutan tropis yang bermitra dengan PANGEA. PANGEA akan bermitra dengan program-program NASA yang sudah ada, serta dengan lembaga-lembaga lokal dan internasional yang berkolaborasi, untuk merencanakan dan melaksanakan kegiatan pelatihan yang sesuai untuk berbagai calon peserta pelatihan, termasuk mahasiswa, ilmuwan karir awal, tenaga kerja yang lebih luas, serta Masyarakat Adat dan Masyarakat Setempat.

Survei Dekade 2017 mengarahkan kita untuk "mengejar tujuan yang semakin ambisius dan solusi inovatif yang meningkatkan dan mempercepat nilai sains/aplikasi pengamatan dan analisis Bumi berbasis ruang angkasa bagi bangsa dan dunia dengan cara yang memberikan nilai yang besar." Sekaranglah saatnya untuk investasi strategis dalam kolaborasi internasional yang ambisius untuk menjembatani kesenjangan antara kemajuan pesat dalam ilmu pengetahuan dan teknologi dan kemampuan masyarakat untuk memanfaatkannya demi dunia yang lebih tangguh. PANGEA sangat relevan dengan tujuan strategis NASA untuk memajukan dan mengintegrasikan pengetahuan ilmu pengetahuan bumi untuk memberdayakan umat manusia dalam menciptakan dunia yang lebih tangguh. Secara khusus, PANGEA mendukung strategi Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi NASA dengan:

- Menyelidiki risiko melewati titik kritis dengan potensi dampak berjenjang.
- Mendukung upaya untuk meningkatkan ketahanan bumi melalui mitigasi dan adaptasi.
- Memfasilitasi pengembangan alat, model, dan sistem penilaian end-to-end yang efisien dan interaktif dengan latensi, skala temporal dan spasial yang tepat, serta kuantifikasi ketidakpastian untuk memungkinkan tindakan berbasis ilmu pengetahuan bagi masyarakat, pengambil keputusan, dan pembuat kebijakan.



Strategi implementasi **PANGEA Earth Science to Action**, dengan area fokus potensial dalam penyerapan karbon dan mitigasi iklim, konservasi keanekaragaman hayati, dan pertanian berkelanjutan.

PANGEA akan mengembangkan kemampuan baru untuk memantau karbon, keanekaragaman hayati, dan pertanian dengan menggunakan penginderaan jarak jauh satelit dan mendukung pengembangan alat untuk menerjemahkan ilmu pengetahuan ke dalam tindakan melalui kemitraan dengan berbagai mitra, termasuk pemerintah, IPLC, masyarakat sipil, dan industri swasta. Hal ini mencakup kemajuan dalam: 1) **pemetaan stabilitas penyerapan karbon jangka panjang**, 2) **pemantauan fluks metana**, 3) **konservasi keanekaragaman hayati**, 3) **pertanian berkelanjutan**. PANGEA melibatkan berbagai komunitas untuk menjawab pertanyaan dan aplikasi ilmu pengetahuan PANGEA, mengidentifikasi sinergi dengan prioritas penelitian lokal, dan mengimplementasikan PANGEA dengan cara yang bermanfaat secara luas di bentang alam dan negara yang menjadi target penelitian. Strategi ini memanfaatkan pengetahuan, keahlian, dan pengalaman yang telah dibagikan selama kampanye pelingkupan PANGEA, dan akan melengkapi serta memperluas berbagai upaya yang telah ada, namun juga sangat dibutuhkan untuk mengisi kesenjangan yang tidak terisi oleh kegiatan-kegiatan lainnya.

Produksi bersama merupakan inti dari ilmu pengetahuan transdisipliner dan aplikasi PANGEA serta melatih generasi ilmuwan dan pemimpin berikutnya.