



El Futuro Climático de la Amazonía

Informe de Evaluación Científica

Antonio Donato Nobre

ARA
Articulación Regional
Amazônica

El Futuro Climático de la Amazonía

Informe de Evaluación Científica

1ª edición

Antonio Donato Nobre

São José dos Campos – SP
Edición ARA, CCST-INPE e INPA
2014

El Futuro Climático de la Amazonía

Informe de Evaluación Científica

Author:

Antonio Donato Nobre, PhD*
Investigador del CCST** MCTI/INPE
Investigador del MCTI/INPA

Realización:

Articulación Regional Amazónica (ARA)

Patrocinio Institucional:

Centro de Ciencias del Sistema Tierra
Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales
Instituto Nacional de Investigaciones de la Amazonía

Asociación Estratégica:

Avina e Avina Americas
Fundo Vale
Fundação Skoll

Apoyo:

Instituto Socioambiental
Proyecto Ríos Voladores
WWF

N669f Nobre, Antonio Donato

El futuro climático de la Amazonía: informe de evaluación científica / Antonio Donato Nobre ;
traducción Isabela Figueroa, German Poveda, Yana Marull –São José dos Campos, SP: ARA: CCST-INPE: INPA, 2014.
e-book : il.

Traducción de: O futuro climático da Amazônia: relatório de avaliação científica.
ISBN: 978-85-17-00073-7

1 Climatología. 2. Amazonas (Región). 3. Medio ambiente. I. Título

CDU: 551.58

Citar el Informe como:

Nobre AD, 2014, El Futuro Climático de la Amazonía, Informe de Evaluación Científica. Patrocinado por ARA, CCST-INPE y INPA. São José dos Campos, Brasil, 43p.

Disponível online en: http://www.ccst.inpe.br/wp-content/uploads/2014/11/The_Future_Climate_of_Amazonia_Report.pdf



Esta obra está bajo la licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 4.0 Licencia Internacional.
Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

* Antonio Donato Nobre ([currículo Lattes](#)) estudia el sistema terrestre con un enfoque interdisciplinar, orientado a popularizar la ciencia. Es investigador sénior del Instituto Nacional de Investigaciones de la Amazonía (INPA) desde 1985 y trabaja desde 2003 en el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE).

** El [Centro de Ciência do Sistema Terrestre](#) es un nuevo departamento del INPE para la investigación interdisciplinar de la Tierra y su funcionamiento.

Resumen ejecutivo

Este informe de evaluación del futuro climático de la Amazonía consiste en una revisión y síntesis de la literatura científica, articulada con análisis interpretativos de los asuntos más importantes relacionados con el tema.

Sin perder el enfoque científico, aborda los asuntos con un lenguaje accesible y desde una perspectiva holística, es decir, busca vincular fuentes y numerosos análisis de especialistas con una imagen coherente del ecosistema Amazónico.

El trabajo pretende evaluar el potencial climático del *Gran Bosque* – factor crítico para todas las sociedades humanas –, su destrucción por la deforestación y los incendios, y lo que se debe hacer para frenar el tren fuera de control en el que se transformaron los efectos de la ocupación humana sobre el clima en las áreas forestales.

El tema es amplio. Por eso es necesario tratarlo con una cierta secuencia cronológica.

❶ El texto empieza con el telón de fondo de la historia geológica: *la alfombra tecnológica¹ de la biodiversidad amazónica, que tomó decenas de millones de años para formar su capacidad funcional*. Los procesos de la vida que opera en el bosque contienen una complejidad casi incomprensible, con un

número astronómico de seres que funcionan como engranajes articulados en una fenomenal máquina de regulación ambiental.

❷ A continuación, el texto describe las capacidades de la Amazonía en su estado natural: *el Océano Verde del bosque² y su relación con el océano gaseoso de la atmósfera – con el que intercambia gases, agua y energía– y con el Océano Azul de los mares –fuente primaria y repositorio final del agua que irriga los continentes –*.

Desde Humboldt³ hasta nuestros días, la ciencia reveló importantes misterios acerca del poder del *Gran Bosque* sobre los elementos que constituyen el clima.

Cinco Misterios

El primer misterio acerca del bosque y sus funciones es la capacidad que este tiene de mantener húmedo el aire en movimiento, lo que permite llevar lluvia a áreas continentales alejadas de los océanos. Los árboles transfieren grandes volúmenes de agua del suelo a la atmósfera, a través de la transpiración.

El segundo misterio se refiere a la formación de lluvias abundantes en aire limpio. Los árboles emiten sustancias volátiles, precursoras de “Semillas” que ayudan en la condensación del vapor del agua, cuya

¹ Por falta de un mejor término, el uso metafórico del concepto de *tecnología* quiere indicar una dimensión natural (no humana) de la complejidad y la sofisticación increíbles existentes en los sistemas vivos, que opera de forma automática en la nano-escala (billonésimas de metro), de manera que crea y mantiene la habitabilidad y el confort ambiental. La tercera ley propuesta por Arthur C. Clark establece que “*cualquier tecnología suficientemente avanzada es indistinguible de la magia*.” La tecnología de la naturaleza es inconcebiblemente avanzada.

² Este término describe las características oceánicas de esta extensión continental cubierta por densos bosques. La importancia de este concepto nuevo e inusual radica en la sugerencia de un área de bosque, extendido por debajo de la atmósfera, cuyas características de inmensidad, humedad e intercambios por los vientos parecen a los océanos reales.

³ Alexander von Humboldt, influyente científico-naturalista alemán que exploró las Américas durante el cambio del siglo XVIII al XIX, considerado el padre de ciencias como geografía física, meteorología y ecología.

eficiencia en la nucleación de las nubes resulta en lluvias abundantes y benignas.

El tercer misterio es la supervivencia de la selva amazónica ante los cataclismos climáticos y su formidable capacidad de mantener un ciclo hidrológico benéfico, incluso en condiciones externas desfavorables. Según la nueva Teoría de la bomba biótica⁴, la transpiración abundante de los árboles, y una condensación muy potente en la formación de nubes y lluvias –mayor que en los océanos contiguos–, lleva a una disminución de la presión atmosférica sobre el bosque, que aspira el aire húmedo del océano hacia dentro del continente, garantizando las lluvias en cualquier circunstancia.

El cuarto misterio explica por qué la porción meridional de América del Sur, al este de los Andes, no es desértica, al contrario de lo que ocurre en la misma latitud al oeste de los Andes y en otros continentes. El bosque amazónico no sólo mantiene el aire húmedo para sí mismo, sino que exporta ríos aéreos de vapor que transportan el agua necesaria para las abundantes lluvias que irrigan regiones distantes en el verano hemisférico.

El quinto misterio es el motivo por el cual la región amazónica y los océanos próximos no fomentan fenómenos atmosféricos como huracanes y extremos climáticos. La atenuación de la violencia atmosférica se explica, de un lado, por el efecto dosificador,

distribuidor y disipador de la energía de los vientos que ejerce el dosel del bosque con su rugosidad y, del otro, por la aceleración horizontal a gran escala de los vientos en la atmósfera baja, promovida por la *bomba biótica*, impidiendo la formación de huracanes y similares. La condensación espacialmente uniforme sobre el dosel forestal impide la concentración de energía de los vientos en torbellinos destructivos, mientras el agotamiento de la humedad atmosférica, retirada del océano, priva a las tormentas de su alimento (vapor de agua) en las regiones oceánicas adyacentes a los grandes bosques.

Todos esos efectos hacen de la selva amazónica, un majestuoso *Océano Verde*, el mejor y más valioso socio de todas las actividades humanas que requieren lluvia en una medida adecuada, favoreciendo un clima amigo y la protección de los eventos extremos.

③ El informe prosigue con la descripción de los efectos de la deforestación y del fuego sobre el clima: *la devastación del Océano Verde genera un clima dramáticamente inhóspito*. Los modelos climáticos anticiparon, hace más de 20 años, diversos efectos dañinos de la deforestación sobre el clima, ya confirmados por las observaciones. Entre estos, la reducción drástica de la transpiración, un cambio en la dinámica de las nubes y lluvias, y una mayor duración de la estación seca. Otros efectos no previstos también están siendo observados, como los daños que el humo y el hollín provocan en la dinámica de

las lluvias, incluso en áreas de bosque prístino

El daño infligido en el clima de la Amazonía por la deforestación, el fuego, el humo y el hollín ya es manifiestamente evidente, tanto en mediciones científicas de campo como en los principales escenarios de modelos climáticos. Análisis basados en los modelos climáticos actualizados y sobre nuevas teorías físicas predicen un futuro peor. El principal factor de impacto al clima que emerge es la gran extensión acumulada de deforestación en la Amazonía brasileña, que alcanza casi 763.000 km² hasta 2013 (una área equivalente a 184 millones de campos de fútbol o a dos veces la superficie de Alemania). A esta superficie tiene que sumársele el impacto de la menos mencionada y estudiada degradación forestal, que puede ser aún más grave, y cuya extensión acumulada se estima en más de 1,2 millones de km².

④ El informe prosigue relacionando los dos puntos anteriores, el bosque *Océano Verde* y la deforestación, en un contexto más amplio: *el equilibrio vegetación-clima, que se balancea al borde de un abismo*. Los modelos climáticos vinculados interactivamente con modelos de vegetación exploran cuáles son las extensiones de distintos tipos de vegetación y las condiciones climáticas capaces de generar equilibrios vegetación-clima estables.

Para la Amazonía, esos modelos proyectan la posibilidad de dos puntos posibles y alternativos de

⁴ (Makarieva & Gorshkov, 2007) Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land.

equilibrio; uno que favorece el bosque (húmedo, es el actual e histórico para la cuenca amazónica) y el otro que favorece la sabana (más seco, es el actual para el “cerrado”⁵, futuro de la cuenca amazónica).

La cuestión preocupante de esos ejercicios de modelación es la indicación de que aproximadamente un 40% de remoción del bosque *Océano Verde* podrá conducir a una transición de gran escala hacia el punto de equilibrio de sabana, liquidando, con el paso del tiempo, incluso los bosques que no hayan sido deforestados. La deforestación (corte raso, eliminación de bosque) actual se acerca al 20% de la cobertura original, y se estima que la degradación forestal ya habría afectado el bosque remanente en varios grados, impactando directamente más del 20% adicionales de la cobertura original.

- ⑤ La sección final de este informe recomienda un plan de mitigación que se basa en la reversión radical de los daños ocasionados en el pasado y de los que se espera en el futuro: *un Esfuerzo de guerra*. Los bosques tropicales de la Amazonia son esenciales para mantener el ambiente global y la seguridad de las generaciones futuras. Afortunadamente, los avances en la ciencia hacen de esta “guerra” un desafío que puede ser superado con éxito.

Pese a la dificultad que supone separar con precisión los efectos de fondo de los cambios climáticos globales, de aquellos locales y regionales, no cabe

la menor duda de que los impactos de la deforestación, la degradación forestal y sus efectos asociados ya afectan al clima de la Amazonía. Ya lo afectan en alto grado hoy, y prometen hacerlo aún más en el futuro, a tal punto que la única opción responsable es actuar vigorosamente para combatir sus causas.

La primera acción que se impone es la universalización y facilitación del acceso a los descubrimientos científicos, que pueden reducir la presión de la principal causa de la deforestación: la ignorancia.

En segundo lugar, es necesario detener ya la sangría del bosque, es decir, reducir a cero la deforestación, la degradación forestal y el fuego, con todos los recursos y medios éticos posibles, en el interés de la vida. Al mismo tiempo, ante el diagnóstico de que la deforestación y la degradación acumuladas constituyen el más grave factor de impacto al clima, es necesario un amplio esfuerzo para replantar y restaurar el bosque destruido.

Tal esfuerzo requiere de una perspectiva de mediano y largo plazo, que culmine con la regeneración del bosque *Océano Verde* original. Las élites gobernantes pueden y deben liderar la gran movilización de personas, recursos y estrategias que posibiliten recuperar el tiempo perdido.

En la conclusión, al señalar la urgencia de acciones de protección y restauración del *Gran Bosque*, se

identifican oportunidades para delinear nuevos caminos hacia un futuro en el que la selva húmeda protegida y renovada sea el principal aliado de las actividades humanas, dentro y fuera de la Amazonía.

⁵ N. de la T. El “cerrado” es un tipo de sabana existente en el territorio brasileiro.

Agradecimientos

Agradecimientos a todos los que contribuyeron con aporte de información cualificada en este informe, especialmente a Éneas Salati, por la historia de estudios isotópicos; Martin Hodnett, José Marengo y Celso Randow, en las cifras sobre la evapotranspiración; Diógenes Alves y Dalton Valeriano, en las cifras de la deforestación; José Marengo, por sus alertas enfocadas y muy útiles; Anita Drumond, por los cálculos sobre la evaporación en el océano; Antonio Manzi, que llamó la atención sobre los problemas de la circulación planetaria; Victor Gorshkov y Anastassia Makarieva por la solución de esos problemas y correcciones sobre la física de la atmósfera; Claudio Maretti, por ayudar a presentar los asuntos sobre preservación con una mejor perspectiva; Elisángela Broedel, por la excelente revisión crítica de las cifras sobre deforestación y destrucción de árboles; Yosio Shimabukuro y Scott Saleska, por las informaciones relacionadas con el área de la Amazonía y la densidad de los árboles; Gilvan Sampaio por las correcciones críticas al texto sobre modelos de equilibrio vegetación-clima; Meirat Andreae y Steven Wofsy por las referencias y orientaciones sobre química atmosférica; Germán Poveda por las referencias y consejos relacionados con los glaciares en los Andes; Suprabha Sechan por señalar las dificultades relacionadas con la tecnología; a las excelentes críticas y sugerencias hechas por los comentaristas y por el público en la 3ª Reunión Pan-Amazónica de la ARA, en Lima; a las cuestiones y reacciones del público en el debate realizado por Nossa São Paulo y por el Instituto Ethos sobre la crisis del agua en la región metropolitana de São Paulo; a Sérgio Guimarães, Márcio Santilli, Paulo Nobre, Tasso Azevedo, Adriana Cuartas, Lou Gold, Foster Brown, Claudio Maretti, Victor Gorshkov, Anastassia Makarieva, Stephan Schwartzman, Robert Harriss y Germán Poveda por las excelentes e inspiradas revisiones; a Marcos Losekann y a Gerard y Margi Moss por sus inquietantes preguntas, que llevaron a un perfeccionamiento del texto; a Marcelo Leite por la sobria revisión profesional y de alta calidad, esencial al ajuste y mejoría del texto; a Jaime Gesisky y Moema Ungarelli por el cuidado y rigor en la revisión final; a Felipe Horst por su bella diagramación; a Isabela Figueroa por la excelente traducción al español; a Germán Poveda por su cuidadosa revisión científica del idioma; a Yana Marull por su estelar revisión de estilo y fluidez; a la Articulación Regional Amazónica por la encomienda del estudio a la Secretaría Ejecutiva de la ARA, en especial a Sérgio Guimarães y Claudio Oliveira por el apoyo y estímulos constantes. Agradecimientos especiales al CCST del INPE y al INPA, por el apoyo institucional; a Avina y al Fundo Vale y Skoll Foundation, por la valiosa colaboración; al ISA, al Proyecto Ríos Voladores y al WWF, por el apoyo.

Sumario

Introducción – La tecnología de la selva es insustituible	9
1) Los bosques generan el clima amigo: Cinco misterios revelados	11
1.1) Reciclaje de humedad: <i>Geisers</i> de la selva	11
1.2) Nucleación de las nubes: el <i>Polvo de Hadas</i> en el <i>Océano Verde</i>	14
1.3) Bomba biótica de humedad: donar agua para recibir lluvia	16
1.4) Ríos aéreos: agua fresca por arterias colgantes	18
1.5) Dosel rugoso: un freno para los vientos	20
2) La deforestación lleva hacia un clima inhóspito: Sin árboles no hay como cubrir el sol	21
2.1) Deforestación virtual: simulando la aniquilación de los árboles	21
2.2) Deforestación real: ojos de águila en el espacio	23
3) El talón de Aquiles de la Amazonía: El héroe imbatible cae	26
3.1) Punto de no retorno: el paso en falso al abismo	26
3.2) Sabanización y desertificación: ¿Daño extensivo o daño impensable?	27
4) El futuro climático de la Amazonía: Ya llegó	29
4.1) Reciprocidad climática: la deforestación acumulada cobra su factura	30
4.2) Orden de urgencia: más vale tarde que nunca	31
5) Bosques de oportunidades: Cinco pasos para recuperar el clima	33
5.1) Popularizar la ciencia del bosque: saber es poder	33
5.2) Reducir a cero la deforestación: para antes de ayer	33
5.3) Terminar con el fuego, el humo y el hollín: ¡Llamen los bomberos!	34
5.4) Recuperar el pasivo de la deforestación: el fénix resurge de las cenizas	34
5.5) Gobernantes y sociedades necesitan despertar: choque de realidad	35
Conclusión	37
Epílogo: el Prólogo de una nueva era	38
Referencias	39

Introducción

La tecnología de la selva es insustituible

En una definición libre, el bosque húmedo tropical es una alfombra multicolor, estructurada y viva, extremadamente rica. Una colonia extravagante de organismos que salieron del océano hace 400 millones de años y ascendieron a la tierra. Dentro de las hojas aún existen condiciones semejantes a las de la vida marina original. El bosque húmedo funciona como un elaborado y adaptado mar suspendido en el aire, que contiene un sinnúmero de células vivas. Con una evolución de 50 millones de años, el bosque amazónico es el mayor parque tecnológico de la Tierra, porque cada uno de sus organismos, entre billones, es una maravilla de miniaturización y automatización. En temperatura ambiente y utilizando mecanismos bioquímicos de una complejidad casi inaccesible, la vida procesa átomos y moléculas, determinando y regulando flujos de sustancias y de energía.

Los bosques condicionan el clima que les favorezca, y con eso generan estabilidad y confort, bajo cuyo abrigo florecen sociedades humanas.

El confortable clima que apreciamos en la Tierra, desconocido en otros cuerpos siderales, puede ser atribuido, en gran medida – entre muchas otras capacidades-, a la colonia de seres vivos que tienen la capacidad de hacer fotosíntesis. El gas carbónico (CO₂) funciona como alimento para la planta, la materia prima transformada por el instrumental bioquímico, con el uso de luz y agua, en raíces, madera, hojas, y frutos⁶. De forma encadenada, cuando las plantas consumen CO₂, la concentración de este gas en la atmósfera disminuye.

Por eso, en un primer momento, el planeta se enfría, lo que hace que las plantas crezcan menos y consuman menos CO₂. A continuación, la acumulación del CO₂ lleva al calentamiento del planeta, y así sucesivamente, en un ciclo oscilante de auto-regulación⁷. De esta manera, las plantas funcionan como un termostato, que responde a las fluctuaciones de temperatura a través del ajuste de la concentración del segundo principal gas de efecto invernadero en la atmósfera. Pero esta regulación de la temperatura, vía consumo intermediado de CO₂, es apenas uno entre los muchos mecanismos de vida que resultan en la regulación favorable del ambiente.

Como se verá en este trabajo, los bosques tropicales son mucho más que una aglomeración de árboles, repositorio pasivo de biodiversidad o simple reserva de carbono. Su tecnología viva y dinámica de interacción con el ambiente les confiere poder sobre los elementos, una capacidad innata y resistente de condicionamiento climático. Así, los bosques condicionan el clima para que este les favorezca, y con eso generan estabilidad y confort, cuyo abrigo da soporte al florecimiento de las sociedades humanas.

Sudamérica es un lugar privilegiado por la extensa presencia de bosques megadiversos. No es una coincidencia que tuvo, y todavía tiene, uno de los climas más favorables en comparación con cualquier otro. Sin embargo, en 500 años, la mayor parte de la vegetación nativa fuera de la cuenca amazónica fue aniquilada, como

⁶ Animaciones en biología molecular: <http://www.johnkyrk.com/index.esp.html>, en español y varios otros idiomas.

⁷ Regulación biótica del Medio Ambiente: <http://www.bioticregulation.ru/>, en inglés.

la Mata Atlántica, que perdió más del 90% de su cobertura original. El efecto de esta deforestación histórica sobre el clima, aunque perceptible, fue menos percibido de lo que podría esperarse, y la razón fue la *sombra* húmeda del bosque amazónico, que mantuvo el continente razonablemente protegido de extremos, con un clima benigno. Pero en los últimos 40 años, el último Gran Bosque y cabecera de las aguas atmosféricas de la mayor parte del continente, sufrió el ataque implacable de la deforestación. Simultáneamente, aumentaron las pérdidas con desastres naturales conectados a las anomalías climáticas, tanto por exceso (de lluvia, calor y viento), como por defecto (sequías)⁸.

Las regiones andinas, y también las de la costa del Pacífico que dependen de los glaciares para su abastecimiento de agua, podrán verse amenazadas en un futuro próximo, pues el derretimiento acelerado por el calentamiento climático ya es imparable, y también porque casi toda la precipitación en las altas montañas, que abastecen los glaciares año tras año, encuentra su materia prima en el vapor procedente del bosque amazónico⁹. Al este de los Andes, la escala de dependencia del ciclo hidrológico amazónico es inconmensurablemente mayor.

Las regiones de sabana localizadas en el sur de la Amazonia, donde hoy existe uno de los más grandes cinturones de producción de granos y otros bienes agrícolas, también reciben del bosque amazónico el vapor formador de lluvias reguladas y benignas, el principal insumo

de la agricultura. Si no fuese por las lenguas de vapor de agua que, en el verano hemisférico, son impulsadas desde la Amazonía hasta áreas muy lejanas, llevando lluvias esenciales¹⁰ y otras influencias benéficas, muy probablemente habría un clima inhóspito en las regiones Sureste y Sur de Brasil (donde hoy se encuentra su más grande infraestructura productiva nacional), y también en otras áreas como el Pantanal, el Chaco y regiones agrícolas en Bolivia, Paraguay y Argentina.

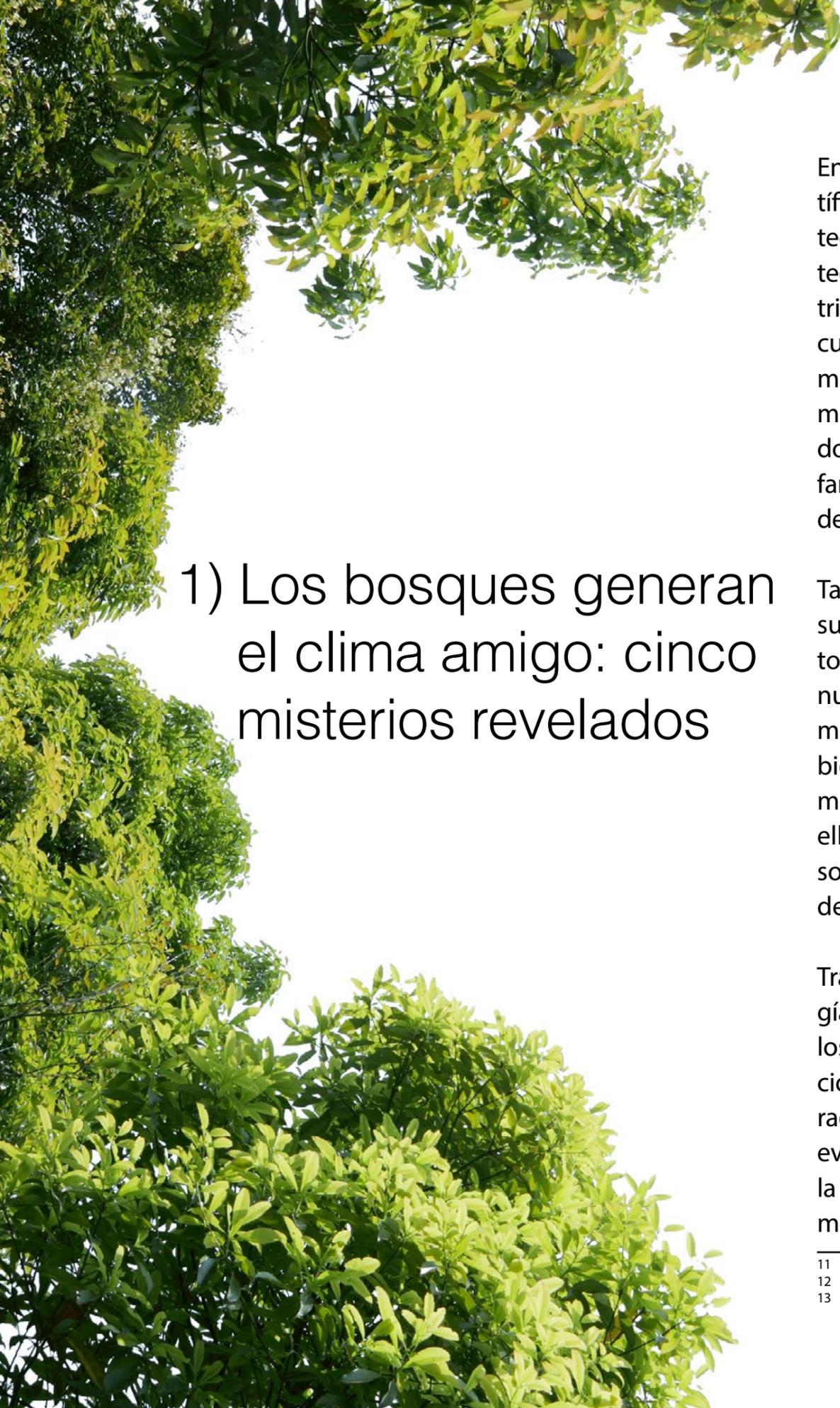
Este trabajo mostrará primero lo que sabemos respecto a cómo el bosque amazónico funciona y mantiene su capacidad de existir y persistir por eras geológicas. Luego ilustrará el efecto que la destrucción del sistema natural está generando sobre el clima y las previsiones de lo que aún podrá generar. Finalmente, explorará las amenazas al equilibrio climático que las alteraciones en curso pueden disparar, con un análisis desde distintas perspectivas de los riesgos climáticos que están al acecho.



8 (Marengo et al., 2013) Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation (Marengo et al., 2011) Extreme climatic events in the Amazon basin.

9 (Rabatel et al., 2012) Review article of the current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change.

10 (Willmot & Webber, 1998) **South American Climate Data:** <http://climate.geog.udel.edu/~climate/>, en inglés.



1) Los bosques generan el clima amigo: cinco misterios revelados

En su afán por aclarar misterios, el trabajo de los científicos no difiere mucho de la investigación de un detective. Exploran pistas, analizan evidencias, desarrollan teorías, construyen modelos. En las deducciones electrizantes de Sherlock Holmes, los casos más intrincados culminaban con soluciones elementales. La realidad del mundo natural se muestra rica y compleja, repleta de misterios y secretos. Pero el método científico, sazonado por la fascinación y humanizado por la curiosidad infantil, abre grandes puertas de acceso a la comprensión de los fenómenos más misteriosos que nos afectan.

Tales fenómenos, cuando son aclarados y elevados a su expresión más simple, democratizan el conocimiento de la ciencia, proporcionando el desarrollo de una nueva y estimulante conciencia compartida sobre el mundo que habitamos. Aún existen muchos secretos bien guardados en la naturaleza acerca del funcionamiento de los bosques. Veamos aquí apenas cinco de ellos, revelados en las últimas décadas, secretos que son cruciales para el entendimiento de las funciones de los bosques en el condicionamiento del clima.

Tratando de modelar los flujos colosales de masa y energía para simular el clima con el uso de computadoras, los meteorólogos inicialmente prestaron poca atención a la cobertura vegetal. Este enfoque ha cambiado radicalmente. Debido a un gran y creciente número de evidencias, hoy en día se conoce el rol vital ejercido por la vegetación en muchos procesos de clima. Y prácticamente todos los modelos de clima, al igual que los más

Debido a un gran y creciente número de evidencias, hoy en día se conoce el rol vital ejercido por la vegetación en muchos procesos del clima.

complejos modelos del sistema terrestre, pasaron a incluir elaboradas representaciones de la vegetación. Los descubrimientos científicos sobre el papel determinante de los bosques en los ciclos (local, regional y planetario) del agua, la energía, el carbono y otras variables, valen para todos los bosques naturales del planeta. Pero aquí nos centraremos más en los bosques tropicales de América del Sur, especialmente la Amazonía.

Todos los estudios de modelación climática consideran la cuenca amazónica en su totalidad. Sin embargo, por haber más datos disponibles, la mayor parte de los trabajos científicos se ha realizado en la Amazonía brasileña¹¹, como también el monitoreo de la deforestación. No obstante, dada la importancia de la cuenca amazónica como un todo, la llamada Pan-Amazónica, y también porque a la atmósfera y a los ríos no les interesan los límites políticos, en el futuro las observaciones, mapeos y análisis necesitan romper con las fronteras nacionales, como ya ocurre en proyectos como la red amazónica RAISG, con un seguimiento extensivo de las presiones humanas sobre la Amazonía¹².

1.1) Reciclaje de humedad: Geisers de la selva

Trecientos años después de la invasión europea en las Américas¹³, el aura del Jardín del Edén en las selvas tropicales ya perdía clamor romántico, posiblemente por

¹¹ Definida dentro de lo que durante la dictadura (1964-1985) se convino llamar de Amazonía Legal.

¹² RAISG Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada: <http://raisg.socioambiental.org/>, Atlas Amazonía bajo presión: http://raisg.socioambiental.org/system/files/AmazoniaBajoPresion_21_03_2013.pdf.

¹³ (Gambini, 2000) Espelho índio: a formação da alma brasileira.

el choque de los codiciosos conquistadores con el infierno verde, ese laberinto sin fin, monótono y peligroso, que pasó a inspirar más miedo y desesperación que fascinación. El siglo XIX, con sus naturalistas científicos, vio nuevamente prender la fascinación, pero esta vez con un tinte de racionalidad. Alexander von Humboldt, el aclamado e influyente científico-naturalista alemán que exploró las Américas durante el cambio del siglo XVIII al XIX, es considerado el padre de ciencias como la geografía física, la meteorología y la ecología. Él aplicó el término *Hileia* (del griego, bosque salvaje) a la Amazonía y, con la riqueza y el encanto de sus descripciones minuciosas, inspiró a generaciones de naturalistas, Darwin entre ellos. De Humboldt vienen las primeras sugerencias de la conexión entre el bosque, la humedad del aire y el clima.

Sin embargo, en el siglo XX, el erudito, autor prolífico y militar brasileño Euclides da Cunha rompió el encantamiento del naturalismo científico, con sus descripciones desengañadas de la *hileia*. Su discípulo Alberto Rangel,

Transpiración: plantas no usan desodorante

Las plantas sudan. El agua, al evaporar, enfría la hoja y el ambiente. Pero la transpiración en las plantas es mucho más importante que eso. La transpiración promueve que el agua del suelo, que carga consigo nutrientes, sea succionada por las raíces y fluya a lo largo del tronco, hasta las hojas; permite que la hoja abra sus micro portales a la atmósfera (estomas), por donde sale el vapor, pero también por donde entra el abono gaseoso más esencial, el CO₂. Y los olores producidos por las plantas, los gases orgánicos que desempeñan muchos roles en el funcionamiento de la atmósfera y de las lluvias, salen junto con el agua transpirada. Por lo tanto, sin transpirar, la planta dejaría de regular su propio bienestar, cesaría de controlar el ambiente y terminaría muriendo por falta de nutrientes y exceso de temperatura.

quien, como el maestro, también se sensibilizara con la miseria de los caucheros y las amarguras de la vida en la selva, resucita en su obra *Infierno Verde* la perspectiva de condena a los invasores españoles y desmonta de una vez la imagen de paraíso verde. El voluntarismo verbal en contra del *hábitat* salvaje, apoyado por la ignorancia admitida de esos autores sobre el valor intrínseco del bosque, al paso con la falencia del fausto del caucho, muy probablemente influyó en los corazones y mentes de las generaciones futuras.

El reciclaje de humedad de la lluvia por la evaporación del bosque mantiene el aire húmedo por más de 3.000 km continente adentro

¿Cuánto del subsecuente ímpetu en la “ocupación” de la Amazonía, con la supresión radical de la selva, no tuvo allí sus raíces? Euclides

da Cunha, al escribir el prefacio del libro del discípulo, niega el valor del abordaje holístico de Humboldt (“*la epistemología de la ‘ciencia amazónica’ florecerá cuando se preocupe menos en revelar la totalidad de la hileia*”) y anticipa la demanda reduccionista que estaba por venir¹⁴.

Los estudios que finalmente empezaron a revelar los secretos del Gran Bosque llegaron tarde. Buscando verificar cálculos preliminares del balance hídrico en la Amazonía¹⁵ que indicaban un reciclaje importante de agua, Enéas Salati lideró estudios de observación de la

lluvia y la evaporación, en los años 1970, que demostraron inequívocamente cómo el bosque mantiene el aire húmedo por más de 3.000 km dentro del continente¹⁶, a través del reciclado de la humedad.

Pero aún hacían falta más explicaciones sobre dónde, cuánto, cómo, por qué y con cuáles implicaciones. Adoptando sin saber la sugestión reduccionista de Euclides da Cunha, en las tres décadas siguientes a los estudios de Salati, más de dos docenas de grandes proyectos de investigación¹⁷ – que congregaron a centenas de científicos y utilizaron muchos laboratorios, instrumentos sofisticados, torres, aviones, barcos, satélites, supercomputadores y todo cuanto había de herramientas científicas –, produjeron millares de artículos, decenas de libros y voluminosos bancos de datos, en su mayoría información de difícil interpretación aislada.

Se dice que el científico de hoy es el que estudia cada vez más sobre cada vez menos, hasta que conoce todo respecto a nada. Y es muy irónico que, 200 años después, la forma más productiva de extraer sentido de la inmensidad de estas investigaciones puntuales sea justamente retomar el abordaje holístico de Humboldt, articulando la riqueza de datos sueltos y construyendo una narrativa integrada y funcional respecto a la concentración fenomenal de vida y su poder sobre los elementos en los bosques de la Amazonía.

14 Rafael Leandro refleja la expresión de Euclides da Cunha en ese prefacio de la siguiente manera: “*la inmensidad del bosque sólo puede ser medida, si repartida... solamente en un futuro tardío, se conocerán los secretos de la Naturaleza [...] La definición de los últimos aspectos de la Amazonía será el cierre de toda la Historia Natural...*” (Leandro, 2009) *Infierno Verde*: Representação Literária da Amazônia na Obra de Alberto Rangel.

15 (Molion 1975) A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects (Villa Nova et al. 1976) Estimativa de evapotranspiração na Bacia Amazônica (Marques et al. 1977) Precipitable water and water vapor flux between Belem and Manaus.

16 (Salati et al, 1979) Recycling of Water in the Amazon Basin: An Isotopic Study.

17 **Proyectos de Investigación en la Amazonía:** ARME, NASA-GTE ABLE, ABRACOS, TRACE-A, RBLE, CAMREX, INPA-Max Planck, INPA-ORSTOM, PDBFF, PELD, LBA, LBA-EUSTACH, LBA-CARBONSINK, LBA-CLAIRE, LBA-ECO, LBA-Barca, LBA-DMIP, GEWEX, ISLSCP, GEOMA, PPBio, Rainfor, AmazonFlux, AMAZE, Amazon Pire, Amazalert, AMAZONICA, Changing Amazônia, ATTO, ACRIDICON-CHUVA, GreenOceanAmazon etc. Solamente dentro del gran proyecto LBA, en 16 años de operación fueron desarrollados, 217 sub-proyectos de investigación.



Veamos cómo podemos captar aspectos espectaculares del funcionamiento del bosque, acompañando la narrativa del recorrido del agua en la atmósfera por la intimidad de las plantas y de regreso a la atmósfera.

Cuando las nubes precipitan su precioso líquido sobre el bosque, gran parte del agua se escabulle por el dosel y se infiltra en el permeable suelo forestal, donde es almacenada en el espacio poroso del suelo, o más abajo, en acuíferos gigantescos, verdaderos océanos subterráneos de agua dulce.

El agua del suelo inicia su regreso a la atmósfera absorbida por profundos y sofisticados succionadores, las raíces; luego sube, desafiando la fuerza de la gravedad, 40, 60 metros o más, en las elaboradas tuberías del xilema (tejido vegetal) de los troncos. En su última etapa, pasa por las estructuras laminares evaporadoras de las hojas, versátiles paneles solares químicos capaces de absorber la energía del sol y aprovechar la caricia de los vientos para transpirar y transferir copiosos volúmenes de agua vaporosa a la atmósfera, completando así el retorno del ciclo vertical iniciado con la lluvia.

Un árbol grande puede bombear del suelo y transpirar más mil litros de agua en un día.

Un árbol grande puede bombear del suelo y transpirar más de mil litros de agua en un sólo día¹⁸. La Amazonía sustenta cientos de miles de millones de árboles en sus bosques. Veinte mil millones de toneladas de agua por día son transpiradas

Geiser de vapor: más grande que el río Amazonas

Buscando cuantificar de manera sencilla la transpiración masiva del bosque sugerido por los estudios de Salati y otros, hicimos, conjuntamente con Adriana Cuartas, en 2007, un cálculo revelador. Utilizando los datos de evaporación colectados en las torres de monitoreo del proyecto LBA (3,6 mm al día, o 3,6 litros por m², en promedio), estimamos la cantidad total diaria de agua fluyendo del suelo hacia la atmósfera a través de los árboles. Aplicado a 5,5 millones de km², el cálculo para el bosque en la cuenca amazónica resultó en el fantástico número de 20.000 millones de toneladas de agua transpirada al día (o 20 billones de litros)¹⁹. Más de 22.000 millones de toneladas si considerados todos los bosques de la porción ecuatorial de América del Sur, y 25.000 millones o más si consideramos los bosques que existían en su estado prístino en 1500¹⁹. Para comparación: el río Amazonas vierte cada día en el océano Atlántico 17.000 millones de toneladas de agua²⁰.

por todos los árboles en la cuenca amazónica¹⁹. En su conjunto, los árboles, esas benevolentes y silenciosas estructuras, similares a *geisers*, vierten hacia el aire un río vertical de vapor más caudaloso que el río Amazonas.²⁰

20.000 millones de toneladas de agua al día son transpiradas por los árboles en la cuenca Amazónica.

Como en un edificio con muchos pisos, un metro cuadrado de suelo en la Amazonía puede tener sobre sí hasta 10

m² de intrincada superficie foliar distribuida en diferentes niveles del dosel del bosque. En eso reside la explicación para el hecho de que una superficie terrestre forestal pueda evaporar igual o más agua que la superficie líquida de un océano o un lago, donde 1 m² de superficie evaporadora coincide con el mismo 1 m² de la superficie geométrica.

¹⁸ Área da copa com raio de 10 m, 324,2 m² x 3,6 litros/m² = 1131,1 litros transpirados em um dia.

¹⁹ Área recente con bosque en la cuenca hidrográfica del río Amazonas, - 5,5 x 10¹² m² x 3,6 litros/m² = 19,8 x 10¹² litros (~20 x 10⁹ toneladas); Área con bosque en toda la Amazonía (*sensu latissimo* Eva et al, 2005, A proposal for defining the geographical Boundaries of Amazônia), incluyendo bosques húmedos, secos e inundados = 6.280.468 km², o 6, 280.468 x 10¹² m² x 3,6 litros/m² = 22,609.6848 x 10¹² litros (22,61 x 10⁹ toneladas); y proyectada para el área histórica cubierta con bosque (área con bosque en - Eva et al., 2005- más deforestación corte raso hasta 2004, Alves 2007) = 6.943.468 km², - o 6,943468 x 10¹² m² x 3,6 litros/m² = 25 x 10¹² litros (25 x 10⁹ toneladas).

²⁰ Caudal de agua vertido al mar por el río Amazonas, de 2 x 10⁵ m³/segundo x 86400 segundos = 17,28 x 10⁹ m³/día

En la transpiración, las plantas transfieren a la atmósfera un 90% de toda el agua evaporada en los continentes.

Corroborando esos hechos fantásticos, un estudio publicado recientemente en la revista científica *Nature*²¹ hizo avanzar el ciclo de descubrimientos sobre la importancia extraordinaria de la vegetación global en el proceso de transferencia del agua a la atmósfera: casi un 90% de toda el agua que llega a la atmósfera oriunda de los continentes lo hizo por medio de la transpiración de las plantas, y apenas un poco más del 10%, por evaporación simple, sin mediación de las plantas. Como esa transferencia por transpiración se da con gran absorción de calor en la superficie, las otrora insospechables plantas interfieren –y mucho– en la lluvia, los vientos y el clima.

Todo ese movimiento de agua cuesta energía. Veamos un paralelo próximo. Para generar la electricidad que tanto se necesita, mucho se habla de aprovechar la energía de las aguas de la Amazonía. Pues bien, la energía hidráulica de los ríos solamente existe porque el agua fue elevada y transportada por la atmósfera hacia sus altas cabeceras. La transpiración de los árboles, eslabón vital en el ciclo de las aguas, absorbe la energía solar. Eso ocurre en el bombeo del agua del suelo y en la transpiración. Así, los árboles funcionan como ascensores que alzan y lanzan agua a la atmósfera, agua que más adelante regresará al suelo como lluvia, transfiriendo parte de la energía solar almacenada en el vapor a la energía potencial del agua que llena los embalses de las hidroeléctricas.

Potencia climática del bosque

¿Cuánta energía del sol es consumida para evaporar 20 billones de litros de agua al día? Para tener una noción de la cantidad de energía involucrada en la transpiración amazónica, basta con hacer una comparación con las hidroeléctricas. Evaporar un gramo de agua líquida consume 2,3 kilojulios de energía solar. Para convertir eso en energía hidráulica/eléctrica, imagine una tetera gigante, de aquellas que se enchufan en la corriente eléctrica, con capacidad para ese volumen de agua, ¿Cuánta electricidad sería necesaria para hervir y evaporar toda esa agua? La hidroeléctrica de Itaipu, la más grande del mundo con 14.000 megavatios de potencia, necesitaría generar electricidad en su capacidad máxima por 145 años para que la tetera evaporara el agua equivalente a la transpirada en tan sólo un día amazónico. O, para rivalizar con los árboles amazónicos y hacer el trabajo en un día, sería necesario sumar la electricidad de 50.000 hidroeléctricas como Itaipu (o 200.000 como Belo Monte en el río Xingú). Esta comparación deja claro que, ante la potencia climática del bosque, las más grandes estructuras humanas se muestran microscópicas.

1.2) Nucleación de las nubes: el Polvo de Hadas en el Océano Verde

Devolver volúmenes colosales de vapor de agua a la atmósfera es solamente la primera parte de la receta para tener y mantener lluvias copiosas y benignas. En 1999, uno de los primeros estudios que utilizó aviones y observaciones del satélite TRMM²², en el marco del proyecto LBA, constató que, en la Amazonía, el aire en la parte inferior de la atmósfera (troposfera) es tan limpio de polvo como el aire sobre el océano, donde las fuentes de polvo son muy reducidas. El estudio también constató que estas nubes típicas de la Amazonía tenían mucho parecido con las nubes marítimas. Esta inusitada similitud inspiró a esos investigadores a bautizar la Amazonía como *Océano Verde*²³. Este término describe las características

Bosque Océano Verde: la atmósfera amazónica posee el aire limpio al igual que la atmósfera del Océano Azul.

oceánicas de esta extensión continental cubierta por densos bosques. La importancia de este concepto, nuevo e inusual, radica en la sugerencia de un área de bosque, extendido bajo la atmósfera, cuyas características de inmensidad, humedad e intercambios debido a los vientos se parecen a las de los océanos reales.

Pero había en la similitud un misterio, pues la mayor parte del *Océano Azul* (marítimo) tiende a la aridez, con poquísimas lluvias, mientras que en el *Océano Verde* (del bosque) las lluvias eran torrenciales y constantes. Tanto que, antes del avance de la deforestación, se decía que allá había solamente dos estaciones, la húmeda y la *más* húmeda. Ahora se sugiere una estación seca pronunciada, y que la duración de la estación húmeda disminuye progresivamente²⁴.

Las nubes son aglomerados de pequeñas gotas suspendidas en el aire. Las gotas visibles se condensan a partir del vapor, que es invisible, por el efecto de la baja temperatura. Pero la temperatura sola no es suficiente para dar inicio al proceso de condensación. Es necesario que también exista una superficie sólida o líquida que funcione como “semilla” (para que se inicie la deposición de las moléculas de vapor de agua). Esas semillas, o núcleos de condensación, son en general aerosoles atmosféricos: partículas de polvo, granos de polen o de sal, hollín y muchos otros.

21 (Jasechko et al., 2013) Terrestrial water fluxes dominated by transpiration.

22 Tropical Rainfall Measurement Mission: <http://trmm.gsfc.nasa.gov/>, en inglés.

23 (Williams et al., 2002) Contrasting convective regimes over the Amazon: Implications for cloud electrification.

24 (Marengo 2011) The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region.

Pero en el bosque *Océano Verde*, los aerosoles son encontrados en bajas concentraciones, al igual que en el Azul. Si la limpieza del aire puede ser atribuida, por un lado, al efecto de la alfombra verde húmeda que mantiene el polvo abajo, y por el otro, a la limpieza del aire por las lluvias constantes, ¿Cómo explicar la formación de lluvias tan abundantes sin las usuales *semillas* para la nucleación?

Estudiando los intercambios de gas carbónico por medio de torres de monitoreo (torres de flujo), científicos brasileños del INPA y de la Universidad de Sao Paulo (USP) y europeos de Holanda, Alemania e Italia, colaboraron en el proyecto LBA para investigar también los intercambios de otros gases producidos por las plantas que contienen carbono, para verificar si constituían parte importante de esos intercambios. Esos otros gases son los "*Aromas del Bosque*", también llamados compuestos orgánicos volátiles biogénicos (BVOCs²⁵). Al igual que un vidrio de perfume abierto pierde su líquido por evaporación, y el gas-perfume se difunde por el ambiente, una variedad de sustancias orgánicas se evapora en las hojas y llega a la atmósfera.

En términos de masa, las cantidades de carbono vertidas a la atmósfera por esos gases orgánicos son muy pequeñas. Sin embargo, un grupo liderado por Meinrat Andreae, del Instituto Max Planck, que estudia la química de los gases en la atmósfera, investigó lo que sucedía con esos BVOCs cuando mezclados con el aire amazónico y reveló el misterio de la nucleación de las

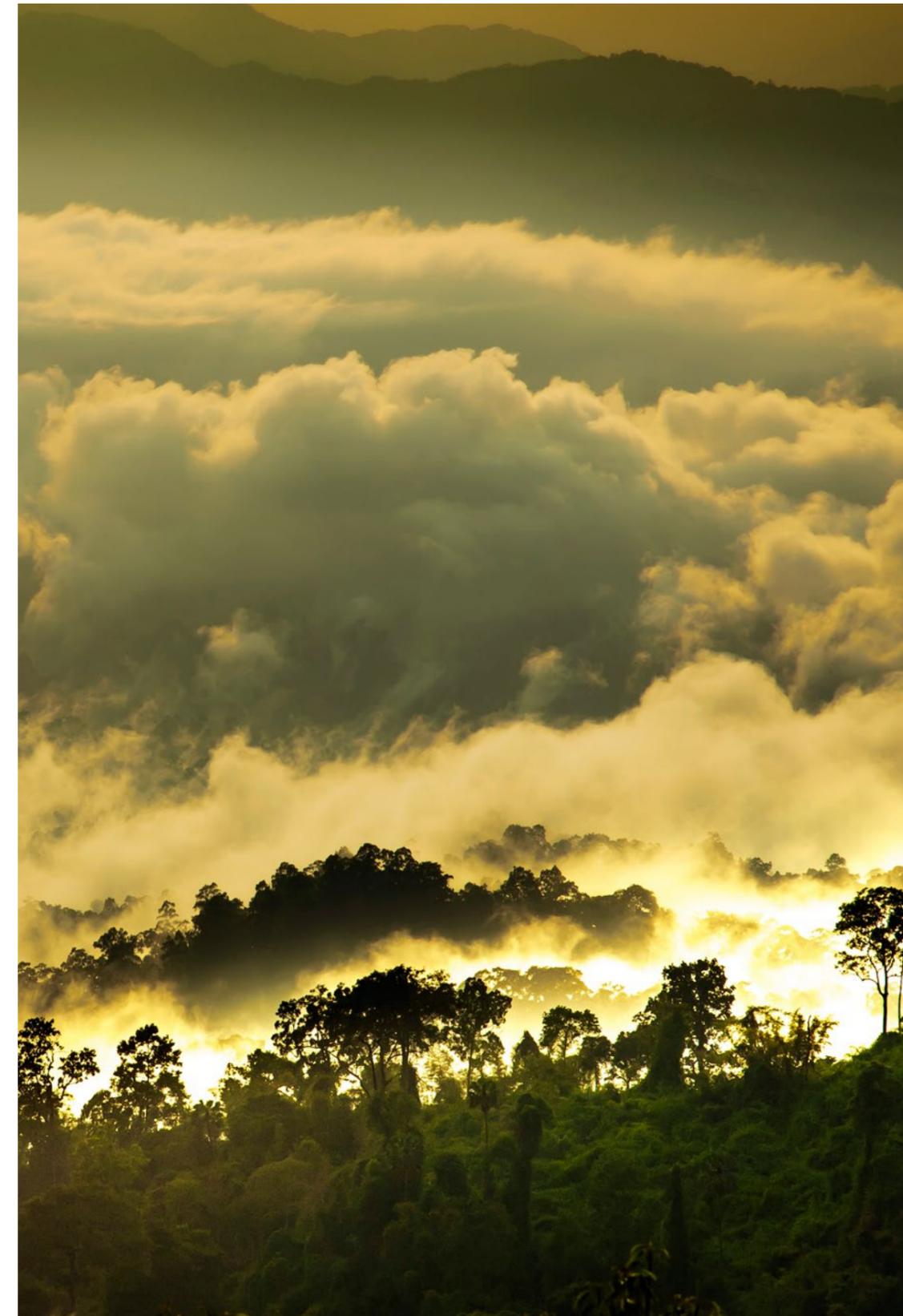
En el aire húmedo y bajo la luz del sol, los aromas de las plantas forman un polvo finísimo con afinidad por el agua: los núcleos de condensación de las nubes.

nubes.²⁶ Los BVOCs (como isopreno, terpenos, etc.), en una atmósfera húmeda, y en presencia de radiación solar, se oxidan y se precipitan, formando un polvo finísimo con afinidad por el agua (higroscópicos), generando eficientes núcleos de condensación de nubes. Poéticamente hablando, este es el *Polvo de Hadas*, un "*polvo mágico*" que surge en el aire cargado de vapor de agua y que provoca las lluvias torrenciales de las nubes bajas, las regaderas del Jardín del Edén. Mientras los BVOCs están en forma de gas, disueltos al aire, la lluvia no los lava. Solamente cuando se oxidan y se precipitan como aerosoles, formando las lluvias, son lavados. Pero siempre hay más BVOCs esperando para formar más *Polvo de Hadas* para la próxima lluvia.

Además de promover lluvias voluminosas y gentiles, otros mecanismos bioquímicos, análogos a los que producen los aromas, actúan como pequeñas "escobas químicas" de la atmósfera. En las condiciones amazónicas, algunos contaminantes peligrosos (como el ozono) son removidos del aire. En los años 1980, en los primeros estudios de química de la atmósfera que emplearon aviones instrumentados, se constató que el aire en la baja atmósfera amazónica contenía menos ozono (por lo tanto era más saludable) que el aire de las regiones más remotas de la Tierra (como la Antártida). En las décadas siguientes, otros proyectos de investigación

25 Del inglés *Biogenic Volatile Organic Carbons*: son compuestos biogénicos porque son sintetizados por los organismos vivos, como los olores de las plantas. Existen otros compuestos orgánicos volátiles no biogénicos llamados sencillamente de VOCs, como el solvente de una tinta, por ejemplo.

26 (Pöschl et al., 2010) Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon. Max Planck Institute news, **Astonishing Discovery over the Amazonian Rain Forest**: <http://www.mpg.de/495047/pressRelease20040224>, en inglés.



indicaron el efecto de los árboles en la limpieza del aire²⁷. En base a esos y otros estudios en desarrollo, se puede sugerir que las plantas amazónicas utilizan algún tipo de vitamina C, como un antioxidante, capaz de remover del aire gases dañinos para la vida.

1.3) Bomba biótica de humedad: donar agua para recibir lluvia

Alrededor del 2005, en el ápice de la peor sequía en la Amazonía hasta entonces, trabajamos en la integración de los primeros seis años de datos del proyecto LBA²⁸. Luego de analizar en varios estudios las evidencias de las observaciones y los resultados de los modelos, reflexioné sobre la pregunta en boga en aquel momento: ¿El bosque húmedo de la Amazonía se secará y morirá con el calentamiento global?

Una región boscosa, que evapora mucha más agua que una superficie oceánica contigua, succionará hacia la tierra los vientos del mar que, cargados de humedad, traerán lluvias al área forestada.

A lo largo de miles²⁹, o probablemente millones de años³⁰, el bosque tropical en América del Sur evolucionó su exuberante biota sin señales de haber sido desconectado por eventos climáticos extremos, como la aridez o el congelamiento. En el mismo espacio de tiempo, sin embargo, es improbable

que el impacto del clima externo haya permanecido siempre benigno, especialmente considerando las interferencias cósmicas y su conocida relación con los cambios climáticos profundos a escala planetaria³¹.

Ante la adversidad climática externa, ¿Cómo este magnífico bioma logró resistir a la extinción? Hoy en día existen suficientes evidencias de que la biosfera no solamente consigue resistir, sino que, en realidad, puede alterar, modelar e incluso regular su propio ambiente³².

Los bosques tropicales de América del Sur están entre los más densos, diversos y complejos biomas terrestres en el planeta. A partir del mecanismo de las lluvias en el *Océano Verde* se puede imaginar cómo esos bosques podrían regular el clima. Controlar la precipitación significa también controlar la convección, lo que, a su vez, significa interferir con una poderosa cadena transportadora de masa y energía: la circulación de Hadley³³. A través de la regulación de las lluvias, la biología podría definir el ritmo de los vientos alisios del Atlántico, arrastrando la necesaria humedad del océano hacia el interior del continente.

En esta misma época, Victor Gorshkov y Anastasia Makarieva, que profundizaban su teoría sobre la regulación biótica del ambiente³⁴, examinaron los

mecanismos que conectan la transpiración de las plantas con los efectos físicos en la atmósfera. A partir de los sorprendentes descubrimientos de sus análisis, desarrollaron la teoría de la bomba biótica de humedad³⁵, revelando físicamente cómo los procesos de transpiración y condensación, mediados y manipulados por los árboles, cambian la presión y la dinámica atmosférica, lo que resulta en el aumento de la oferta de humedad desde el océano hacia el interior, donde hay territorios boscosos.

Makarieva y sus colaboradores descubrieron que la condensación del vapor de agua en la atmósfera genera una reducción localizada de la presión y produce una potencia dinámica que acelera los vientos a lo largo del resultante diferencial de presión³⁶. El punto crucial de la teoría es que los contrastes en la evaporación de la superficie – junto con la clave condensación en las nubes – determinan la dirección e intensidad de los vientos importadores de lluvia, mucho más que los contrastes en la temperatura de la superficie.

Amazonía, Corazón del Mundo

¿Cómo podemos entender la circulación del agua por el paisaje? El agua irriga y drena los suelos de forma análoga a la sangre, que irriga y drena los tejidos del cuerpo. Si los familiares ríos son análogos a las venas, que drenan el agua usada y la regresan al origen en el océano, ¿dónde están las arterias del sistema natural? Son los ríos aéreos, que traen el agua fresca, renovada en la evaporación del océano. Para completar el sistema circulatorio faltaba solamente el corazón, la bomba que impulsa los flujos en las arterias aéreas. La teoría de la bomba biótica vino a explicar que la fuerza que propulsa los vientos canalizados en los ríos aéreos debe ser atribuida al Gran Bosque, que funciona entonces como el corazón del ciclo hidrológico.

27 Por ejemplo (Rummel et al., 2007) Seasonal variation of ozone deposition to a tropical rain forest in southwest Amazonia.

28 (Nobre, 2005) Is the Amazon Forest a Sitting Duck for Climate Change? Models Need yet to Capture the Complex Mutual Conditioning between Vegetation and Rainfall.

29 (Baker et al., 2001) The history of South American tropical precipitation for the past 25,000 years.

30 (Hooghiemstra et al., 2002) Evolution of forests in the northern Andes and Amazonian lowlands during the Tertiary and Quaternary.

31 (Berger and Yin, 2012) Astronomical Theory and Orbital Forcing.

32 (Foley and Costa, 2003) Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate; (Gorshkov et al., 2004) Revising the fundamentals of ecological knowledge: the biota–environment interaction;

(Pielke and Avissar, 1998) Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate.

33 (Poveda and Mesa, 1997) Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena.

34 (Gorshkov et al., 2000) Biotic Regulation of the Environment: Key Issues of Global Change.

35 (Makarieva and Gorshkov, 2007) Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land.

36 (Makarieva et al., 2013) Where do winds come from?



Así, una región forestada, que evapora tanta o más agua que una superficie oceánica contigua – y que tendrá mucha más condensación en la producción de lluvias – succionará los vientos cargados de humedad del mar hacia la tierra, donde ascenderán, llevando lluvias al bosque. Por el contrario, si el bosque es removido, el continente tendrá mucha menos evaporación que el océano contiguo – con la consecuente reducción en la condensación –, lo que determinará una reversión de flujos netos de humedad que irán desde la tierra hacia el mar³⁷, creando un desierto donde antes había bosque.

Entre las previsiones basadas en la teoría de la bomba biótica hechas por Makarieva y Gorshkov, estaba la de que las sequías en los bosques nativos serían contrapuestas por una transpiración vigorosa de los árboles. Pues bien, esa previsión contrariaba el sentido común, pues cualquier persona sabe que basta con dejar un vaso con plantas sin agua por algunos días para que las plantas se marchiten hasta morir. Contrariaba también la creencia de los ecofisiólogos, según la cual, cuando deja de llover y el agua en el suelo disminuye, las plantas enseguida cierran sus estomas y dejan de transpirar para ahorrar agua. Al mismo tiempo, proporciona una pista sobre un viejo enigma ecofisiológico: ¿Por qué la fotosíntesis ha evolucionado a un “despilfarro” de vapor de agua?

De manera sorprendente, sin embargo, Scott Saleska

y sus colaboradores publicaron, en la revista científica *Science*³⁸, observaciones que corroboraban la corrección de la previsión teórica de Makarieva y Gorshkov. Durante el punto álgido de la sequía de 2005, las partes más afectadas de la Amazonía fueron las que más enverdecieron, es decir, en la zona en que llovió menos (según registros del satélite TRMM) brotaron más hojas nuevas en las copas de los árboles (según detectado por el sensor MODIS en el satélite Terra).

Por influencia de la circulación de Hadley, la parte centro-meridional de América del Sur tendería a la aridez.

Las conclusiones de este estudio a partir de imágenes de satélite ya contaban con el apoyo de mediciones en tierra de las torres de flujo del proyecto LBA,

que habían constatado que no ocurre una reducción de la transpiración de los árboles en las épocas secas. En otras palabras, parece que cuando la sequía llega, los árboles con raíces profundas (y acceso a gran cantidad de agua subterránea) ejecutan un programa para mantener o aumentar la transpiración. Así, con el flujo de vapor de la transpiración en la superficie – y la correspondiente condensación en las nubes – se mantiene la succión del aire húmedo sobre los océanos próximos, lo que significa continuar la importación de agua por la atmósfera – contraponiendo la sequía – y garantizando la continuidad del bosque. La Teoría de la bomba biótica viene ganando aceptación³⁹ y ya cuenta con comprobación observacional⁴⁰.

37 Ya considerando y descontando los efectos de la circulación planetaria asociada a movimientos y aceleraciones inerciales.

38 (Saleska et al., 2007) Amazon forests green-up during 2005 drought.

39 Por ejemplo: (Sheil and Murdiyarso, 2009) How Forests Attract Rain : An Examination of a New Hypothesis.

40 (Poveda et al., 2014) Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers.

Ríos Voladores: contando una bella historia

En 2006, contemplando el bosque amazónico desde lo alto de una torre de estudio del proyecto LBA, intercambiamos con el aviador Gerard Moss las primeras ideas que llevaron al proyecto de aventura, investigación, divulgación y educación ambiental Ríos Voladores⁴². Con financiamiento de Petrobras y la participación de Enéas Salati - el pionero de los estudios sobre reciclaje de humedad en la Amazonía - y otros científicos de renombre, Moss persiguió por años los ríos de vapor con su avión monomotor, colectando numerosas muestras para su estudio y capturando la atención lúdica de las personas en la aventura que creó. Hizo también un trabajo extraordinario de educación ambiental en las escuelas y a través de internet, publicando con frecuencia en las redes sociales las trayectorias de los ríos voladores y mostrando cómo llevan agua a las personas. Lo más valioso de ese proyecto fue su capacidad de cautivar el lado emocional de las personas a través del estímulo lúdico de la aventura, de la ciencia comprometida, conectándolas al interés por el medio ambiente, el agua y el bosque.

1.4) Ríos aéreos: agua fresca por las arterias colgantes

Un mapa del mundo revela interesantes disposiciones y simetrías en la distribución de bosques y desiertos alrededor del globo, y tres cinturones llaman la atención: uno de bosques alrededor de la línea del Ecuador y otros dos de desiertos alrededor de los trópicos de Cáncer y Capricornio. Tal geografía de paisajes contrastantes tiene explicación conocida, la circulación de Hadley⁴¹.

Existe una mayor incidencia solar en la zona ecuatorial y, por lo tanto, allá ocurre, debido a efectos físicos,

una mayor ascensión del aire que se enfría y hace llover, favoreciendo a los bosques. El aire que ascendió y perdió humedad necesita ir hacia algún lugar, desplazándose en altitud en los dos hemisferios, en la dirección de los subtropicos. Ese aire seco, cuando baja y se calienta, absorbe humedad de la superficie, favoreciendo desiertos.

Pero existen excepciones, y la parte centro-meridional de Suramérica es una de ellas. Por la influencia de la circulación de Hadley, esa región tendería a la aridez. Basta con ver el desierto de Atacama, al otro lado de los Andes, o los desiertos de Namibia y Kalahari, en África, y el desierto de Australia. Todos esos desiertos están alineados latitudinalmente con la afortunada área verde centro-meridional de Suramérica, responsable por un 70% del PIB del continente, en el cuadrilátero delimitado por Cuiabá al Norte, São Paulo al Este, Buenos Aires al Sur y la cordillera de los Andes al Oeste.

Las escuelas enseñan que el agua se evapora del mar, "va" a los continentes, cae como lluvia, es colectada en los ríos de la superficie y regresa al mar. Al hacer la conexión entre la evaporación del agua del mar con su tránsito por la tierra, ese concepto simplista del ciclo hidrológico no está equivocado, pero tampoco explica mucho. Por ejemplo, por qué existen desiertos o por qué el vapor marítimo se adentra en los continentes de forma heterogénea.

Comparando las firmas químicas⁴³ entre el flujo de entrada de vapor oceánico en el gran anfiteatro amazónico y las correspondientes firmas del agua de desembalse que regresa al océano por el río Amazonas, Salati y colaboradores percibieron que una parte significativa del agua que entraba como vapor en el canal aéreo no regresaba por el canal terrestre⁴⁴.

Ríos aéreos conectan los vientos alisios cargados de humedad del Atlántico ecuatorial con los vientos sobre el Gran Bosque Amazonico, hasta los Andes, y luego estacionalmente hacia la parte meridional de América del Sur.

De ello concluyeron que la Amazonía debía estar exportando ese vapor a otras regiones del continente e irrigando otras cuencas hidrográficas distintas a la del Amazonas. Análisis preliminares realizados en aquella época en las aguas de lluvia recolectadas en la ciudad de Rio de Janeiro detectaron señales de que parte de estas venía del interior del continente, y no del océano contiguo. Y, de manera más específica, que había pasado por la Amazonía. Ese grupo fue el primero que sugirió que las lluvias en América del Sur, fuera de la Amazonía, podrían ser alimentadas por el transporte continental de vapor de agua.

El concepto de ríos atmosféricos fue introducido en 1992 por Reginald Newell y Nicholas Newell⁴⁵ para describir los flujos filamentosos en la baja atmósfera, capaces de transportar grandes cantidades de agua como vapor, típicamente en volúmenes superiores al

41 **Célula de Hadley definición:** https://es.wikipedia.org/wiki/Célula_de_Hadley en español.

42 **Proyecto Ríos Voladores:** <http://riosvoadores.com.br/>, en portugués.

43 Son utilizados trazadores que portan firmas isotópicas. Se dice que son isótopos dos o más átomos con el mismo número de protones pero con masas distintas. Una buena analogía es pensar en gemelos con características idénticas, excepto el peso. Firma isotópica es la relación numérica entre la inmensa multitud de "gemelos" atómicos en un material o sustancia. El agua puede contener una variada combinación de gemelos de oxígenos (¹⁶O e ¹⁸O) e hidrógeno (¹H, ²H), generando moléculas de agua con pesos distintos. La proporción de esos gemelos atómicos que ocurre en el agua del mar, por ejemplo, se altera con la evaporación (fluctúan primero los mas livianos) y también con la lluvia (precipitan primero los mas pesados). Así, al analizar la firma isotópica de una muestra de agua o de vapor, se puede saber desde donde vino, si del océano o del bosque.

44 (Salati et al., 1979) Recycling of Water in the Amazon Basin : An Isotopic Study; (Matsui et al., 1976) Isotopic hydrology in the Amazonia, 2, Relative discharges of the Negro and Solimões rivers through ¹⁸O concentrations.

45 (Newell and Newell, 1992) Tropospheric Rivers? - A Pilot Study.

Eventos extremos: la vida buscando equilibrio

Con el calentamiento global ocurre mayor acumulación de energía en la atmósfera, lo que aumenta la probabilidad de ocurrencias y fenómenos climáticos más intensos. La naturaleza de esta tendencia fue prevista hace décadas por los meteorólogos. Pero la mayor intensidad y frecuencia de esas ocurrencias está siendo observada décadas antes de lo previsto. Algún factor en la complejidad del clima debe explicar la aceleración de los efectos. El registro geológico nos muestra que climas extremos ya ocurrieron en la historia de la Tierra, mucho antes de que la humanidad surgiera. Pero, al contrario de lo que sería de esperar después de los cataclismos, todas las evidencias apuntan siempre hacia una recuperación estabilizadora, atenuando los extremos. Sistemas puramente geofísicos no tendrían esa capacidad. Solamente la vida y sus procesos de auto-regulación ofrecen explicación satisfactoria para la historia climática de la Tierra.⁵²

transportado por el río Amazonas (que tiene un caudal de 200.000 metros cúbicos por segundo – 17.000 millones de toneladas al día).

Casi tres décadas después de los hallazgos de Salati, la circulación que conecta los vientos alisios cargados de humedad del Atlántico ecuatorial con los vientos sobre el Gran Bosque hasta los Andes, y de allá estacionalmente hacia la parte meridional de América del Sur, fue descrita por José Marengo y colaboradores⁴⁶. Pese a que ellos hayan llamado ese transporte “*Chorros de bajos niveles*”, el concepto es muy similar al de los ríos atmosféricos. Según su explicación, en América del Sur funciona un sistema de monzones similar al de Asia. Debido al efecto del bosque (*Geisers del bosque*) y también de la cordillera de los Andes (una barrera de hasta 6 km de altura), el persistente

aire húmedo amazónico voltea en el Estado de Acre y, durante el verano, lleva cantidades generosas de vapor de agua al cuadrilátero afortunado, contrariando su tendencia a la aridez.

Recientemente, Josefina Arraut⁴⁷ y colaboradores hicieron una revisión climatológica de los ríos aéreos de América del Sur, estimando el transporte del vapor asociado e introduciendo un nuevo concepto, los “*Lagos Aéreos*”, es decir, una región de remanso atmosférico con una reserva de vapor precipitable.

Con el concepto de ríos aéreos establecido y haciéndose popular, Dominick Spracklen⁴⁸ y colaboradores desarrollaron un nuevo enfoque. Este correlaciona una superficie cubierta por vegetación que está expuesta a una parcela de aire en un río aéreo (medida por el índice acumulativo del área foliar a lo largo de la trayectoria) con lluvia “río abajo”, en el mismo sentido de la trayectoria de aquella parcela de masa de aire. Es decir, un río aéreo conecta regiones donadoras de humedad con otras receptoras de humedad. De ahí la importancia crucial de los bosques aguas arriba: se constató que la Amazonía es, de hecho, la *cabecera* de los manantiales aéreos del mayor volumen de lluvias en América del Sur.

46 (Marengo et al., 2004) Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalysis: Characteristics and temporal variability.

47 (Arraut et al., 2012) Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America.

48 (Spracklen et al., 2012) Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests.



1.5) Dosel rugoso: un freno para los vientos

Makarieva y Gorshkov⁴⁹ introdujeron una nueva definición física para huracanes, ciclones o tornados: “... son implosiones (explosiones en reversa) que pasan a cámara lenta, debidas a la desaparición volumétrica del vapor de agua en la atmósfera por condensación”⁵⁰. Paulo Nobre les presentó, entonces, un problema: “La pregunta que se impone... es entender por qué los huracanes no se desarrollan sobre bosques tropicales, como en la Amazonía, donde el aprovisionamiento de vapor de agua por el bosque y su extinción, en forma de lluvia tropical, es tan abundante”⁵¹.

Entre los servicios que el bosque presta al clima, está un seguro contra eventos atmosféricos destructivos, atenuando la concentración de la energía en los vientos.

En respuesta, Makarieva y Gorshkov demostraron teóricamente cómo una gran área terrestre cubierta por bosque no permite la formación de huracanes

y otros fenómenos climáticos anómalos, incluyendo sequías e inundaciones. En su explicación, la fricción turbulenta local con el dosel de la selva – que transpira activamente, resultando en lluvias uniformes sobre grandes áreas – y la tracción del viento por la *bomba biótica* en distancias mayores disminuye mucho la posibilidad de formación de tormentas como tornados o huracanes. Las trayectorias registradas de

los huracanes comprueban el ambiente ameno en las regiones cubiertas por bosques extensos y áreas oceánicas próximas⁵³.

Es decir, además de todos los servicios del bosque al clima, este también ofrece un seguro contra los destructivos eventos atmosféricos, atenuando la concentración de la energía en los vientos. Otras funciones clásicas de los bosques en la regulación del ciclo hidrológico en tierra son bien conocidas, como el favorecimiento de la recarga de acuíferos y la atenuación de inundaciones⁵⁴, entre muchas otras.

49 (Makarieva et al., 2008) On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine.

50 Según los autores: “The driving force of all hurricane processes is a rapid release, as in compressed spring, of potential energy previously accumulated in the form of saturated water vapor in the atmospheric column during a prolonged period of water vapor evaporation under the action of the absorbed solar radiation.” (Makarieva et al., 2014) Condensational power of air circulation in the presence of a horizontal temperature gradient.

51 (Nobre P., 2009a) Peer Review Question Interactive comment on “On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine”.

52 (Gorshkov et al., 2000) Biotic Regulation of the Environment.

53 **Storm track** mapa mostrando todas las trayectorias observadas de huracanes, ilustrando que las regiones ecuatoriales de los bosques y sus inmediaciones oceánicas están libres de esos fenómenos: http://en.wikipedia.org/wiki/Storm_track_Track, en inglés.

54 **La mitigación de los riesgos de inundación**, por ejemplo: <http://www.forestry.gov.uk/fr/URGC-7QJDH7>, en inglés.



2) La Deforestación lleva a un clima inhóspito

Teniendo en cuenta los extensos y elaborados efectos de los bosques en el clima, demostrados por la ciencia, ¿Qué resultados esperar de su devastación? Para evaluar los impactos de la deforestación en el clima, se viene haciendo una creciente cantidad de experimentos de campo y modelación, estudios observacionales y, más recientemente, análisis teóricos. ¿Cuáles son las consecuencias proyectadas de la deforestación y cuáles son las ya observadas?

2.1) Deforestación virtual: simulando la aniquilación de los árboles

Una de las principales virtudes de los modelos climáticos es su capacidad de simular escenarios distantes del momento presente. Ese tipo de ejercicio no es predictivo en el sentido físico, sino que, donde la teoría física aún no está disponible, es el mejor conocimiento y la única herramienta para analizar sistemas complejos y hacer extrapolaciones bien fundamentadas.

Tales ejercicios de simulación son valiosos para situaciones específicas, como explorar riesgos climáticos asociados a la deforestación. En el ambiente virtual, como en un simulador de vuelo, es posible evaluar de manera repetida escenarios de desastres, desmenuzando los factores atenuantes, las condiciones iniciales y las potenciales consecuencias de maniobras arriesgadas.

En 1991, Carlos Nobre lideró uno de los más citados

estudios para simular el impacto de la deforestación total del bosque amazónico en el clima⁵⁵. Utilizando un modelo general de circulación de la atmósfera (GCM⁵⁶) con un módulo acoplado de representación de la vegetación (SiB⁵⁷), los autores concluyeron que, cuando los bosques son sustituidos por pasto degradado en el modelo, se verifica un aumento significativo en la temperatura media de la superficie (cerca al 2,5°C) y una disminución de la evapotranspiración anual (reducción del 30%), así como de la precipitación (reducción del 25%) y de la escorrentía superficial (reducción del 20%). En la simulación ocurría también un aumento de la duración de la estación seca en la mitad sur de la cuenca amazónica.

En las siguientes dos décadas, otros estudios avanzaron en el detalle y la generalización de esas conclusiones. Deborah Lawrence y Karen Vandecar hicieron recientemente una revisión de la literatura⁵⁸ sobre los impactos de la deforestación tropical en el clima y concluyeron que varios GCMs concuerdan en que la deforestación a escala regional lleva a un clima más caliente y seco sobre el área deforestada. Los modelos que simulan la deforestación completa de la Amazonía prevén un clima con calentamiento en la franja de 0,1-3,8°C (promedio de 1,9°C) y una reducción de lluvias en la franja de 140-640 mm al año (promedio de 324 milímetros/año, o una reducción de 10-15%).

Pero la deforestación puede tener implicaciones mucho más serias. En 1997, Germán Poveda y Oscar Mesa⁵⁹

⁵⁵ (Nobre C. et al., 1991) Amazonian Deforestation and Regional Climate Change.

⁵⁶ Definición de GCM por Lawrence e Vandecar (2014): "...son modelos computacionales tridimensionales globales del sistema climático que operan a gran escala... Los modelos más recientes incluyen representaciones de la atmósfera, océanos y de la superficie de la tierra... e incorporan el ciclo hidrológico y una representación explícita... de la vegetación y sus efectos sobre los flujos de energía y de agua, incluyendo las transferencias radiativas y turbulentas, y los controles físicos y biológicos de la evapotranspiración."

⁵⁷ Simple Biosphere Model (Sellers et al., 1986).

⁵⁸ (Lawrence and Vandecar, 2014) Effects of tropical deforestation on climate and agriculture.

⁵⁹ (Poveda and Mesa, 1997) Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena.

propusieron el rol de puente hidrometeorológico para el bosque amazónico, al conectar los dos grandes océanos próximos, es decir, sugiriendo la existencia de efectos climáticos cruzados entre los océanos, por la vía de la atmósfera e intermediados por el bosque.

Explorando con modelos en una dirección similar, más recientemente, Paulo Nobre⁶⁰ y colaboradores estudiaron el impacto de la deforestación en la lluvia amazónica, utilizando simulaciones numéricas incluyendo o excluyendo las respuestas de los grandes océanos a los escenarios de deforestación⁶¹. Comparando simulaciones hechas con un GCM atmosférico usual y con un GCM acoplado a otro modelo que simula las condiciones internas de los océanos (salinidad, corrientes, etc.), esos autores encontraron una reducción considerablemente mayor de la precipitación cuando el GCM acoplado con el océano fue programado para un escenario de deforestación total de la Amazonía: un 42% de reducción de la lluvia contabilizando los mecanismos internos de los océanos, contra 26% de reducción de la lluvia sin considerarlos. Los océanos siempre estuvieron presentes, y la inclusión de sus respuestas internas ofrece más realismo a las simulaciones.

Ya existen comprobaciones de muchas de las proyecciones hechas por los modelos sobre las consecuencias de la deforestación, especialmente la ampliación de la estación seca. Sin embargo, esos experimentos virtuales indicaban un prolongamiento de la estación seca luego de la destrucción del 100% del bosque, lo que ya se observa con la deforestación de un poco menos que el 19% la Amazonía. Es decir, parece que esos modelos

La eliminación del bosque - principal agente de la condensación continental - equivale a desconectar el interruptor de una bomba de humedad.

océanos, agravan el cuadro y aumentan el alerta.

Es necesario también considerar la teoría de la bomba biótica y su previsión de reducción de lluvias. Diferente de los modelos numéricos convencionales, una teoría física construye entendimiento basada exclusivamente en leyes fundamentales de la naturaleza. Si la teoría es correcta, hace posible prever cuantitativamente los efectos físicos solamente con el análisis de los escenarios y de su lógica funcional.

Makarieva y Gorshkov prevén que la deforestación completa de la Amazonía reduciría la precipitación, primordialmente como resultado de la disipación del efecto de la baja presión (succión) asociada a la condensación que está vinculada a una reducción de la evaporación en la superficie. Como la teoría de la bomba biótica también asigna la disponibilidad de vapor para las lluvias en la Amazonía como resultado de esa capacidad de transpirar, la eliminación total del principal agente de la transpiración lleva al cese completo del “bombeo biótico”.

La teoría sugiere que, desconectado el interruptor de la bomba que succiona el aire húmedo hacia el continente, el flujo de humedad cambiaría de dirección cuando la condensación pasase a ser mayor sobre el océano (más débil que la biótica, la *bomba oceánica* de condensación

tienden a subestimar las consecuencias negativas en los escenarios simulados. Los resultados de las proyecciones más recientes, incluyendo los



60 (Nobre P. et al., 2009b) Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation.

61 Utilizando sólo la serie de tiempo de temperatura superficial del mar observada.

está siempre conectada). Esa situación succionaría el aire del continente, llevando aridez a la tierra.⁶²

Los modelos climáticos utilizados para simular la deforestación aún no acoplaron esa nueva teoría física, por lo tanto no proyectan ese efecto, que podría significar hasta un 100% de reducción de las lluvias.

2.2) Deforestación real: ojos de águila en el espacio

La deforestación real es inmensa y sus efectos sobre el clima son bien documentados. Estudios en torres micrometeorológicas muestran que la sustitución del bosque por pastizales lleva, tal como prevén los modelos, a un aumento de la temperatura de la superficie y a una reducción de la evapotranspiración.⁶³ Observaciones de satélite muestran que, durante la estación seca, tal como es previsto por la teoría de la bomba biótica, la evapotranspiración de los bosques persiste e incluso aumenta, lo que no ocurre en las áreas deforestadas.⁶⁴

Observaciones muestran que, durante la estación seca, como previsto por la teoría de la bomba biótica, la evapotranspiración de los bosques persiste e incluso aumenta, pero no en las áreas deforestadas.

en el caso de la reducción de la precipitación con la deforestación. Aunque algunos estudios observacionales han revelado un aumento localizado de la lluvia con la

deforestación, estudios más comprensivos, simulaciones con modelos climáticos e incluso análisis teóricos aclaran el carácter local y transitorio de este efecto, que depende básicamente de la existencia de bosques circundantes al área deforestada y de la extensión de esos bosques. El aumento de lluvia se convierte en reducción tan pronto los bosques remanentes se hacen más distantes, en relación al tamaño del área abierta. De ahí en adelante, habrá reducción de las lluvias.

Datos de satélites para lluvia y presencia de bosque mostraron una reducción de la precipitación en el mismo sentido de los vientos que pasaron sobre áreas deforestadas.

El estudio de Spracklen y colaboradores⁶⁵ con datos de satélites para lluvia y presencia de bosques constató que, con la deforestación, ocurre la reducción de la precipitación en el mismo sentido de los vientos. En el 60% de las áreas tropicales, el aire que pasa sobre densos bosques produce por lo menos dos veces más lluvia que el aire que pasa sobre áreas deforestadas. Pese a que aún no se haya considerado el mecanismo y los efectos de la Teoría de la bomba biótica, esos autores demostraron con evidencias fuertes que el impacto negativo de la deforestación en el clima no es solamente local, sino que puede afectar regiones próximas y distantes.

Aplicando los conceptos de la bomba biótica, Makarieva y colaboradores pusieron los hallazgos de Spracklen en perspectiva, explicando cuantitativamente cuáles eran los factores físicos responsables por la reducción de las lluvias en el mismo sentido de los vientos por

En la porción más deforestada de la Amazonía ya se constata un progresivo retardo en el inicio de la estación húmeda, lo que genera un significativo impacto en el sector agrícola.

deforestada de la Amazonía, ya se constata un retardo progresivo en el inicio de la estación húmeda, lo que genera un significativo impacto en el sector agrícola.

Así, en la discusión sobre la deforestación ya no planea la duda sobre sus evidentes efectos directos e indirectos en la reducción de las lluvias, y el debate se centra en la extensión del área deforestada. En el periodo 2011/2012, fueron deforestados en la Amazonía brasilera “apenas” 4.571 km². Si lo comparamos con las tasas de deforestación en los años más graves, como 2004 (27.772 km²), ese valor parece modesto. Brasil merece ser reconocido por haber logrado esa reducción. La velocidad y la eficacia alcanzadas en la reducción recomiendan aplicar esta estrategia a los esfuerzos que todavía son necesarios para eliminar y revertir la deforestación, en Brasil y en el mundo.

Pese a la noticia alentadora de la reducción, esa tasa, que parece tan pequeña, sería suficiente para deforestar un área equivalente a Costa Rica en tan sólo diez años. Además, las reducciones en las tasas anuales atenúan la percepción momentánea de pérdida y ocultan la deforestación acumulada en la Amazonía, lo que es muy grave.

62 Ya considerando y descontando los efectos de la circulación planetaria asociada a movimientos y aceleraciones inerciales.

63 Por ejemplo (Gash, 1996) Amazonian Deforestation and Climate. (von Randow et al., 2004) Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in southwest Amazonia.

64 (Huete et al., 2006) Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season; (Saleska et al. 2007) Amazon forests green-up during 2005 drought.

65 (Spracklen et al., 2012) Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests.

66 (Makarieva et al., 2013) Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure and atmospheric moisture content.



En lo que respecta al clima, importa sobre todo el área total devastada y su distribución espacial. Compilando estudios pioneros con datos de satélites, Diógenes Alves⁶⁷ contabilizó hasta el 2004 una deforestación total de 663.000 km². Si se le agregan los números más recientes del proyecto PRODES del INPE, la deforestación acumulada total hasta el 2013 alcanza 762.979 km².

Desde el punto de vista del daño al clima, la Amazonía tiene un pasivo gigantesco de destrucción del *Océano Verde*. No existe, por lo tanto, ningún motivo para celebrar las tasas relativamente más bajas del corte raso del bosque de los últimos años, incluso porque, tras la aprobación en 2011 del nuevo Código Forestal (que supuso una amplia amnistía a los deforestadores), ya se observa una nítida tendencia de aumento de las tasas anuales.

Según la contabilidad del INPE, el corte raso brasileño (sin considerar el de los demás países de la cuenca amazónica) alcanzó en 2012 un 18,85% del área original del bosque⁷⁰. Pero la destrucción no es uniforme, ya que existe una gran concentración de corte raso en el llamado Arco del Fuego – o Arco de la Deforestación⁷¹. Si la vastedad deforestada ya es gravísima para el clima, la situación empeora si se considera el bosque *Océano Verde* herido.

La explotación maderera y la deforestación gradual producen extensas áreas de bosques degradados que raramente entran en la contabilidad oficial de la

Deforestación acumulada: 762.979 km²

Ese valor supera tres veces el área del estado de Sao Paulo, y equivale a dos Alemaniass o dos veces Japón. Utilizando una unidad de área más próxima al brasileño: la deforestación amazónica acumulada equivale a 184 millones de estadios de fútbol⁶⁸. Puesto en perspectiva temporal, equivale a 12.635 estadios deforestados al día (526 estadios por hora; 8,8 estadios –o 36.291 m²– por minuto; 605 m² por segundo) ininterrumpidamente, en los últimos 40 años. Para comprender la enormidad de estos números es necesario extender la imaginación más allá de esas analogías. Un mega-tractor ficticio, operando una lámina frontal de 3 m de ancho, necesitaría acelerar casi a la velocidad de un jet (726 km/h) para deforestar el área raspada en la Amazonía al ritmo registrado en imágenes satelitales. Como un tractor deforesta mucho más lentamente (0,24– 0,36 ha/ h⁶⁹, o ~0,8 km/h si esa área tuviese 3 m de ancho), con la misma lámina de 3 m serían necesarios más de 900 tractores derrumbando simultáneamente el bosque, lado a lado, formando un frente destructivo de casi 3 km de ancho. Otra comparación impresionante: la deforestación acumulada en la Amazonía equivaldría a una carretera de 2 km de ancho entre la Tierra y la Luna (cuya distancia es de 380.000 km).

destrucción, pero que, en lo que se desprende de los informes y estimaciones disponibles, pueden tener un impacto significativo sobre el clima.

Dalton Valeriano lideró un estudio pionero sobre la degradación⁷² que encontró en el estado de Mato Grosso, en el período de 2007 a 2010, “apenas” 7.856 km² con corte raso (eliminación total del bosque), pero otros 32.926 km² de bosques degradados (parcialmente deforestados). Sumando el corte raso con la degradación, sobró poco de la característica original de este estado llamado *Mato Grosso (Bosque Espeso)*.

En el mismo período, el INPE mapeó 64.205 km² de

67 (Alves 2007) Science and technology and sustainable development in Brazilian Amazon.

68 Área deforestada, 762.979 km² / 0,004136 km² = 184.472.679 de campos de fútbol.

69 (Viana, 2012) Máquinas e Métodos de Desmatamento.

70 INPE, , interfaz de base de datos de monitoreo de la deforestación: <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php>. Lista (una tabla) y Consolida (sumatorios para la unidad de área considerada), en portugués.

71 Porcentaje de área deforestada até 2012: TO 75%, MA 72%, RO 41%, MT 40%, PA 22% e AC 13%.

72 Prodes 2008, reporte pdf: http://www.obt.inpe.br/prodes/Relatorio_Prodes2008.pdf, en portugués.

bosque degradado y 39.026 km² de corte raso en la Amazonía brasilera. Utilizando la proporción de esas áreas, se puede extrapolar el área de selva degradada para toda la Amazonía brasilera. En tal caso, hasta 2013 el área total degradada pudo haber alcanzado los 1.255.100 km². Si se le suma el área medida de corte raso, el impacto acumulado en el bioma por la ocupación humana puede haber alcanzado 2.018.079 km².

Entre los más de 200 países que hay en el mundo, sólo 13 poseen un área más grande que esa. En esta contabilidad, la degradación de los bosques en la Amazonía brasilera puede haber alcanzado un 29,44% del área original⁷³, que sumada a la deforestación por corte raso sugiere que un 47,34% del bosque haya sido impactado directamente por la actividad humana desestabilizadora del clima. Para la Pan-Amazonía, ese impacto agregado de la Amazonía brasilera, contabilizando la deforestación y estimando la degradación, sobre el área original del bosque representa de 26,68% a 29,03%⁷⁴.

Pero el área del impacto en el sentido ecológico puede ser aún más grande, pues los bosques contiguos a las áreas de degradación o corte raso sufren directa e indirectamente los efectos de los cambios ambientales vecinos (biogeofísicos y biogeoquímicos)⁷⁵.

La destrucción del dosel en el proceso de degradación, frecuentemente superior al 60% de la cobertura⁷⁶, cambia las características estructurales, ecológicas y fisiológicas del bosque, comprometiendo sus capacidades ambientales.

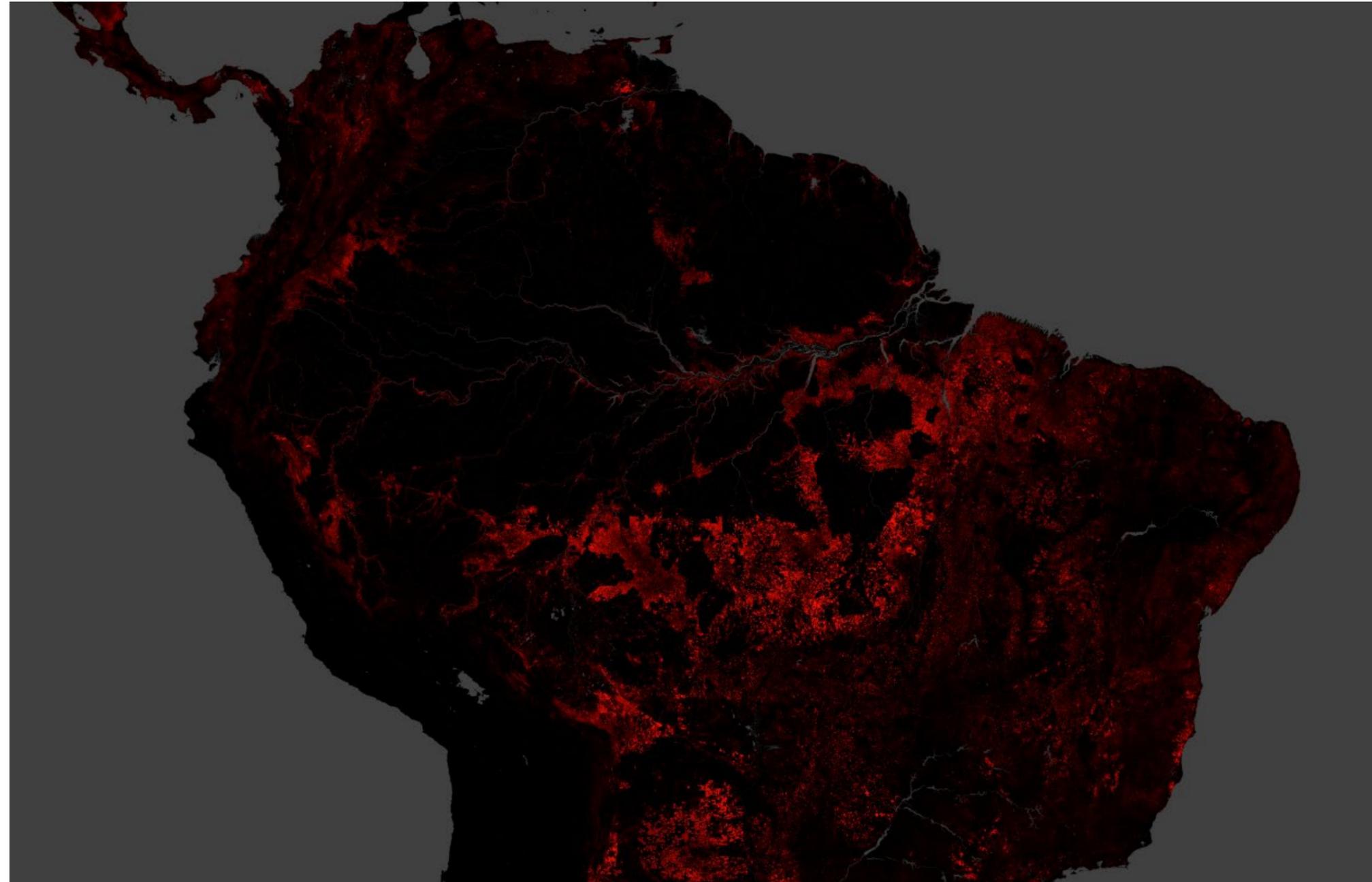


Figura 1 Deforestación acumulada entre 2000 y 2010 (tonos fuertes) y anterior (tonos más claros) en America der Sur.⁷⁷

73 Cálculo utilizando la medición de Espírito-Santo et al., (2014) para el bosque remanente en la Amazonía brasilera [3.500.000 km²], aumentada por el área acumulada de la deforestación [762.979 km²], alcanzando 4.262.979 km² de bosques originales en la Amazonía brasilera.

74 Impacto usando el área total de bosque original estimado por la cobertura actual (bosques remanentes + deforestación acumulada) basado respectivamente en Espírito-Santo et al. (2014) con 7.562.979 km² y en Eva et al. (2005) con 6.943.468 km².

75 (Laurance & Williamson, 2001) Positive Feedbacks among Forest Fragmentation, Drought, and Climate Change in the Amazon.

76 (Valeriano et al., 2008) Monitoreo de la Cobertura Forestal de la Amazonía por Satélites. Sistemas **PRODES** (monitoreo de deforestación utilizando imágenes satelitales): <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>; **DETER** (detección de deforestación en tiempo real): <http://www.obt.inpe.br/deter/>; **DEGRAD** (mapeamiento de la degradación forestal en la Amazonía brasilera): <http://www.obt.inpe.br/deggrad/>; e **QUEIMADAS** (monitoreo de incendios en tiempo casi real): <http://www.inpe.br/queimadas/>; 2007-2008, todos links en portugués.

77 **University of Maryland, cobertura Forestal Global:** <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>, en inglés.



3) El talón de Aquiles de la Amazonía: el héroe imbatible cae

El bosque sobrevivió por más de 50 millones de años a vulcanismos, glaciaciones, meteoritos, deriva continental. Pero en menos de 50 años está amenazado por la acción humana. Existe un paralelo entre la leyenda griega del talón de Aquiles y la importancia del Gran Bosque amazónico para el clima de la Tierra. Como el héroe griego, la Amazonía – esa asamblea astronómica de extraordinarios seres vivos – debe poseer algún tipo de capacidad que la hizo una guerrera invulnerable por decenas de millones de años, cuando resistió a los cataclismos geofísicos que asolaron el planeta.

Los hallazgos respecto al poder del *Gran Bosque* sobre los elementos – del condicionamiento atmosférico humidificador, pasando por la nucleación de nubes, a la bomba biótica – revelan y sugieren sofisticados mecanismos de invulnerabilidad. ¿Dónde estaría, entonces, su punto débil?

Respuesta: en la degradación y en la deforestación.

Dado que el *Gran Bosque* ejerce un rol determinante de servicios para la estabilidad del clima local, regional y global, su ruptura física significa llevar el “*Gran Guerrero*” a la derrota en esos roles, tal como la ruptura del talón de Aquiles, que le hizo perder la guerra. La flecha del enemigo es la motosierra, el fuego, el humo, el hollín y otros factores de origen humano, que surgieron

del uso equivocado, descontrolado y terrible de las invenciones del Antropoceno⁷⁸, la nueva era en la que la humanidad se convirtió en una fuerza geológica capaz de cambiar la faz del planeta.

3.1) Punto de no retorno: el paso en falso al abismo

Si imaginamos la metáfora de un vehículo (el Gran Bosque) transitando en una carretera llena de baches (clima), cuyas llantas flexibles absorben y amortiguan los impactos de los baches (resiliencia ecoclimática), ¿cuál sería la profundidad del bache climático necesaria para reventar el *neumático* de la Amazonía *Océano Verde*?

El bosque Océano Verde intacto tiene muchos recursos para absorber los impactos de sequías, regenerándose completamente a lo largo de los años.

En 2005 ocurrió la sequía más severa en un siglo. Cinco años después, el impacto de la sequía de 2010 fue más intenso y extenso.⁷⁹ En 2010, por primera vez emergieron en las rocas del fondo del río Negro pinturas rupestres hechas cuando el nivel de los mares estaba más de 100 m por debajo del actual, durante la era glacial hace miles de años. Las explicaciones físicas para esos dos megaeventos aún no son concluyentes, pero numerosas observaciones en tierra y desde el espacio⁸⁰ no dejan dudas sobre los daños registrados en el bosque⁸¹, indicando que el *neumático* amazónico ya

78 **Antropoceno, un planeta transformado por la humanidad:** <http://www.anthropocene.info/en/anthropocene>, en inglés.

79 (Marengo et al., 2011) The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region.

80 Por ejemplo: (Brando et al., 2014) Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions; (Saatchi et al., 2013) Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy; (Fu et al., 2013) Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection; (Marengo et al., 2013) Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation; (Phillips et al., 2009) Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest; (Cox et al., 2008) Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution; (Hutyra et al., 2005) Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazonia.

81 (Nepstad et al. 1999) Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire; Por ejemplo, una extensa mortalidad de árboles, que cambia significativamente la estructura de la vegetación y frustra el mecanismo normal de regeneración en claros.

presenta señales de fatiga, o por lo menos cicatrices significativas de los impactos sufridos.

En condiciones estables del *Océano Verde*, la selva amazónica tiene un amplio repertorio de respuestas ecofisiológicas para absorber los impactos de sequías como esas⁸², regenerándose completamente a lo largo de los años. Pero lo que se ve en áreas extensas, principalmente a lo largo del Arco de la Deforestación, es una *“insuficiencia orgánica múltiple”* en los remanentes forestales fragmentados e incluso en áreas más continuas⁸³.

La deforestación rompe el mecanismo de las lluvias. Sin lluvias, el bosque se hace inflamable. El fuego entra en la selva, quemando raíces superficiales y matando árboles grandes.

Varios factores nocivos combinan sus efectos, de modo que sequías resultantes de la presión externa hacen un daño mayor, reduciendo la capacidad

de regeneración del bosque. El primero y principal de esos factores es la propia deforestación. Sin bosque, desaparecen todos sus servicios para el clima, lo que, a su vez, afecta la parte remanente de selva. La deforestación rompe la bomba biótica de humedad, debilitando la capacidad de importar aire húmedo a la región, generadora de lluvias. En el proceso de remoción con quema, el humo y el hollín dañan el mecanismo de nucleación de nubes, generando nubes contaminadas y disipativas que no producen lluvias⁸⁴.

El suelo de una selva tropical en estado prístino es

demasiado húmedo para quemar, incluso durante la temporada *“seca”*. Sin embargo, cuando en la estación seca no hay lluvia en absoluto – algo que no pasaba, pero que ahora se está volviendo cada vez más común –, la materia orgánica en el suelo del bosque se seca más allá del umbral en el que se vuelve inflamable. El fuego entra en la selva, quema las raíces superficiales y mata grandes árboles⁸⁵. Todos esos efectos de la deforestación se potencializan. Así, rápidamente, los enemigos humanos van golpeando el talón del guerrero. ¿Cuándo lo tumbarán? Varios estudios sugieren la respuesta: cuando se atravesase el *Punto de no retorno*.⁸⁶

El *Punto de no retorno* es el inicio de una reacción en cadena, como una fila de fichas de dominó. Derrumbando la primera, caerán todas las demás. El sistema vivo en el bosque, brutalmente desequilibrado, saltará hacia otro estado de equilibrio.

3.2) Sabanización y Desertificación: ¿Daño extensivo o daño impensable?

Con la sequedad, el fuego y la alteración del bosque, la sabana pasaría a ser favorecida por el nuevo equilibrio climático, en detrimento del bosque.

El *Equilibrio estable* es un estado parecido al de una pelota dentro de una vasija, que en condiciones normales siempre regresa a la parte más profunda del recipiente. Con oscilaciones crecientes de la vasija, la pelota se mueve cada vez más cerca de los bordes. Cuando el vigor del movimiento de

82 (Phillips et al., 2010) Drought-mortality relationships for tropical forests.

83 (Laurance & Williamson, 2001) Positive Feedbacks among Forest Fragmentation, Drought, and Climate Change in the Amazon.

84 (Andreae et al., 2004) Smoking rain clouds over the Amazon.

85 (Nepstad et al., 2004) Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis.

86 Por ejemplo (Nobre and Borma, 2009) “Tipping points” for the Amazon forest.



la vasija impulsa a la pelota más allá del borde, ésta salta hacia fuera y abandona la vasija del primer equilibrio.

En 2003, Marcos Oyama y Carlos Nobre presentaron la hipótesis de la *Sabanización* de la Amazonía utilizando un GCM y un modelo de equilibrio de vegetación⁸⁷. Como el clima interactúa con la vegetación, al cambiarse uno, el otro tiende a cambiar en una retroalimentación positiva (desestabilizadora) o negativa (estabilizadora), hasta que ocurra un nuevo equilibrio.

El clima y la vegetación en la Amazonía *Océano Verde* están en un equilibrio estable y resiliente en la condición húmeda. Con la deforestación, el clima cambia gradualmente y se desestabiliza hasta rebasar un *Punto de no retorno* (el borde de la vasija húmeda). El sistema puede entonces avanzar hacia otro equilibrio (mucho más seco).

Según ese estudio, habría dos estados posibles de equilibrio para la vegetación en la Amazonía. Uno que corresponde a la distribución actual de la vegetación, donde el bosque tropical cubre la mayor parte de la cuenca, y otro con el bosque tropical al Este de la Amazonía siendo sustituido por la sabana. Con la sequedad progresiva, la entrada del fuego y la modificación en gran escala del bosque, la sabana pasaría a ser favorecida por el nuevo equilibrio climático, en detrimento de la selva. En el segundo estado de equilibrio, incluso las áreas remanentes de bosques no deforestados desaparecerán como tales, transformándose en sabanas.

Esta hipótesis indica que apenas proteger el bosque remanente no impedirá su desaparición, por causa del cambio climático en el nuevo equilibrio. Tal perspectiva arroja nuevas luces sobre la política centrada en preservar intactas solamente las áreas de conservación designadas.

En general, tales extrapolaciones consideran escenarios de reducción de lluvia relativamente modestos, siempre presumiendo que la dirección de los vientos no cambiará mucho sin el bosque. En ese escenario, los vientos alisios que llevan humedad desde el océano seguirían entrando al continente y apenas se alterarían algunos intercambios verticales sobre la Amazonía.

Pero la Teoría de la bomba biótica, que explica cómo la potencia de los vientos está relacionada con la condensación, prevé que la reducción significativa de la evaporación/condensación en tierra lleve a una reducción profunda de la convergencia de aire sobre el continente, asociado a una reducción radical del transporte de humedad neta o incluso su posible reversión. Podríamos comparar esta relación tierra-mar con un juego de la soga: el lado donde se produce mayor condensación atmosférica va a ganar la disputa atrayendo la humedad hacia sí. Así, con el bosque, los vientos traen la humedad del mar hacia la tierra; sin el bosque, el aire atmosférico podría dejar de converger sobre la tierra, lo que significaría eliminar hasta el 100% de las lluvias. Cero lluvias conduce hacia un desierto, y no a una sabana.

El escenario proyectado por el modelo de Oyama y Nobre (y más tarde detallado en otros estudios)⁸⁸ ya sería suficientemente malo al prever la *Sabanización*, con la aniquilación del tesoro de biodiversidad forestal. Pero en la sabana aún existe lluvia, y la agricultura aún tiene alguna probabilidad. Ya la desertificación ocasionada por la deforestación progresiva, prevista por la teoría de la bomba biótica, aniquilaría todo, incluso la mayor parte de las actividades humanas en la Amazonía.

¿Y fuera de la Amazonía? Como la mayor parte del agua que irriga el granero productivo en el cuadrilátero de América del Sur meridional procede de los bosques de la Amazonía, el futuro clima del continente podría secarse considerablemente, en su extremo pudiendo asemejarse con el presente de Australia: un inmenso desierto interior, rodeado en uno de sus lados por franjas húmedas próximas al mar.

87 Utilizando los mismos tipos de vegetación del SSiB. (Oyama and Nobre, 2003) A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America.

88 Por ejemplo: (Malhi et al., 2009) Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest.



4) El futuro climático de la Amazonía: ya llegó

Los cambios climáticos en la Amazonía y fuera de ella ya llaman a la puerta. Pero saber si los escenarios catastróficos se harán realidad o no, y cuánto tiempo eso tomará, depende de muchos factores difíciles de prever, entre ellos cuánto de la cobertura vegetal original habrá sido modificada y a qué velocidad.

Acelerando la deforestación y rebasando el punto de no retorno que parece estar próximo, se estima que en pocas décadas el clima salte hacia otro estado de equilibrio⁸⁹.

Si se reduce a cero la deforestación y se propicia la regeneración del bosque, se evita la amenaza inmediata para un futuro más o menos distante, todo dependerá de la extensión de bosque *Océano Verde* remanente y del tamaño de las fuerzas climáticas externas.

Lo que la ocupación humana de la Amazonía ya deflagró fue una competición impensable. Una carrera donde dos influencias nefastas disputan el podio en la destrucción final del más grande y más diverso bosque tropical de la Tierra: la deforestación y los cambios climáticos globales⁹⁰.

El bosque preservado tiene capacidades innatas para resistir a los impactos climáticos externos, tales como oscilaciones en las lluvias. En los últimos diez años, la mayor parte de los modelos climáticos concordó en atribuir alguna resistencia del bosque al impacto del calentamiento global. Aún así, existen incertidumbres

El bosque Océano Verde preservado tiene capacidades innatas para resistir a los impactos climáticos externos, como la oscilación en las lluvias.

respecto a cuál es la resistencia efectiva de los bosques tropicales húmedos a la acción directa del hombre, lo que hace difícil, a partir de esos modelos, proyectar una fecha segura para la extinción del bosque por esta causa.

Falta de lluvia: amenaza mortal para la Amazonía

En 2000, Peter Cox y colaboradores del Hadley Center publicaron un impactante artículo en la revista *Nature*⁹¹. Por primera vez habían unido un gran modelo general de circulación de la atmósfera con un modelo interactivo de vegetación en el que el ciclo del carbono estaba bien detallado. Entre los resultados, el modelo proyectaba una reducción acentuada, progresiva y permanente de lluvia en la Amazonía, lo que llevaría hacia su muerte gradual. Con el bosque seco entraría el fuego y liberaría vastas cantidades de carbono, lo que resultaría en un empeoramiento acentuado del calentamiento global. Es decir, por primera vez un modelo climático generaba un vaticinio terrible para el *Gran Bosque*. Catorce años después, el nuevo modelo del Hadley Center es similar a los demás, es decir, ya no suprime el bosque por efectos externos como antes⁹². Sin embargo, los efectos del modelo original del Hadley center afectaban al bosque por la reducción de lluvias, como consecuencias del exceso de CO₂ en la atmósfera y su resultante calentamiento. Pero son muy comunes los errores de los modelos climáticos en la previsión de las lluvias. Es justamente en la reducción de las lluvias dónde está la más grande amenaza al bosque. Si esos modelos no prevén correctamente la reducción de lluvias, no pondrán el bosque en peligro. Como ningún modelo climático actual incorpora los mecanismos y los efectos previstos por la Teoría de la bomba biótica de humedad, especialmente en relación a los posibles efectos de los cambios en la circulación del viento (suprimiendo la convergencia a gran escala sobre la tierra seca), sus proyecciones son inciertas. Podemos llegar a descubrir en el futuro que el modelo original de Hadley Center fue el único que previó – quizá no por las razones correctas- el futuro climático de la Amazonía.

⁸⁹ (Coe et al., 2013) Deforestation and climate feedbacks threaten the ecological integrity of south-southeastern Amazonia.

⁹⁰ (Malhi et al., 2008) Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon.

⁹¹ (Cox et al., 2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model.

⁹² (Good et al., 2013) Comparing Tropical Forest Projections from Two Generations of Hadley Centre Earth System Models, HadGEM2-ES and HadCM3LC.

De una manera burda – y sin considerar los efectos debilitantes de la degradación forestal – se puede extrapolar la historia conocida de la deforestación corte raso –aproximadamente 20% de la cobertura forestal de la Amazonía brasilera removida en 40 años, con efectos ya evidentes sobre el clima- y proyectar otros 40 años para la remoción de otro 20%, totalizando un 40% de corte raso acumulado, el número sugerido por los modelos como el *Umbral climático*⁹³. Pero los efectos de la deforestación se suman a los impactos del fuego, la degradación forestal y los cambios climáticos, lo que implica una aceleración del escenario esperado.

Sin embargo, pese a que los modelos climáticos sean extrapolaciones bien fundadas y útiles, los climas pasados pueden no ofrecer una buena base para prever el futuro, especialmente cuando se trate de sistemas complejos y cuando los equilibrios climáticos estén próximos al “borde de la vasija”, en la inminencia de saltar hacia otro estado de equilibrio. Lo sabremos con seguridad cuando llegue el futuro, pero sería irresponsable apenas esperar.

El futuro climático de la Amazonía ya llegó. La responsabilidad es nuestra sobre lo que haremos con este conocimiento.

La perturbación antropogénica, ya extensa y probablemente demasiada, es el factor más imprevisible en una proyección respecto al destino final de la Amazonía. La simple razón es que tenemos libre albedrío. Si escogiéramos seguir con el ritmo del “seguir-haciendo-más-de-lo-mismo” (*business as usual*)

y, principalmente, si optáramos por no recuperar los daños infringidos al *Gran Bosque*, la teoría sugiere que el sistema amazónico puede colapsar en menos de 40 años. Los umbrales de la deforestación, en los cuales las simulaciones indicaban una ruptura del sistema climático actual, están aproximándose. Los efectos locales y regionales en el clima ya están siendo observados mucho antes de lo esperado, especialmente en las zonas más devastadas, pero también en las áreas más alejadas que dependían del bosque para la lluvia⁹⁴.

Así, por las evidencias de las alteraciones, el futuro climático de la Amazonía ya llegó. Por lo tanto, la decisión urgente y ya tardía de emprender una intensificación de la acción no debe esperar, si es que aún existe cualquier posibilidad de que se revierta el cuadro amenazador. La inversión hecha en la actividad científica en la Amazonía ha rendido frutos de información rica, fundamentada y disponible. La responsabilidad es nuestra sobre lo que haremos con este conocimiento.

4.1) Reciprocidad climática: la deforestación acumulada cobra su factura

Con una reducción notable en las tasas anuales de deforestación, Brasil despunta como ejemplo de un país que hizo parte de la tarea respecto a los cambios climáticos. Para una nación que pasó 40 años invirtiendo fuertemente en la malversación del medio ambiente, incumpliendo la propia ley de protección forestal, la reducción de la deforestación no es una conquista



93 (Sampaio et al., 2007) Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion.

94 (Sampaio et al., 2007).



La fiesta de la deforestación sin límites está encontrando en el clima un juez que sabe contar los árboles y que no olvida ni perdona.

(clima), después de que el agua vaciada en los últimos 40 años (deforestación) ya amenaza con llevar el bote a pique. La fiesta de la deforestación sin límites está encontrando en el clima un juez que sabe contar árboles y que no olvida ni perdona.

El enfoque usual cuando se discute el futuro del clima en la Amazonía es la deforestación futura, o cuánto de la selva que queda podría ser cortada. Injustificadamente ausente, la asombrosa deforestación acumulada del pasado debe volver a entrar en el foco, pues sobre ella recae el principio de la reciprocidad climática. Sin abordar la devastación pasada, las pesadillas del pasado vendrán a buscarnos.

Con un promedio diario de alrededor de 4mm de agua transpirada⁹⁸, lo que equivale a 4 litros por m², el bosque es un socio generoso del clima amigo. Cuando se remueve, la transpiración cae – si todavía llueve – a 1mm, en el caso de los pastizales⁹⁹, y a menos con la aridez.

Adicione el fuego al caldero de las iniquidades, y

pequeña. Pero la reducción de las tasas anuales, aunque esencial, se asemeja a cerrar con las manos un hueco en el fondo de un bote inflable

Guillotina decapitadora de árboles

Se estima que el bioma amazónico haya sostenido 400.000 millones o más de árboles con diámetro y altura de pecho superior a 10 cm⁹⁵. Distribuyendo esta población de árboles por área, se infiere que la deforestación de corte raso haya destrozado, solo en Brasil, más de 42.000 millones de árboles en los últimos 40 años⁹⁶. Poniéndolos en una fila y considerando una altura promedio de 15 m, los troncos de estos árboles cubrirían 635 millones de km, o casi 1.700 veces la distancia de la Tierra a la Luna. Ese ritmo de destrucción significa más de mil millones de árboles cortados al año: casi 3 millones al día; más de 120.000 a cada hora; más de 2.000 a cada minuto; y 34 a cada segundo⁹⁷. Y eso sin contar un número quizá aún más grande de los árboles decapitados en los llamados bosques degradados. En las últimas cuatro décadas fueron destruidos casi 6 árboles por cada habitante de la Tierra, más de 200 por cada brasilero. Son esos árboles ausentes los que son percibidos por el clima, ya que cada árbol diezmado representa, entre muchos servicios cortados, menor evaporación de la superficie.

también el humo y el hollín, con su efecto aniquilador sobre el bosque, las nubes y las lluvias, y la maldición del clima inhóspito habrá sido la respuesta justa de la naturaleza a tanta destrucción. El problema es que el “castigo” afecta a todos, no sólo a aquellos que deforestaron e incentivaron la deforestación, sino también a la mayoría de las personas que estuvieron y siguen estando en contra la deforestación.

4.2) Orden de urgencia: más vale tarde que nunca

Para que contemplemos la dimensión de lo que se requiere hacer en relación al futuro climático de la

95 La densidad promedio de árboles (DAP > 10 cm) en el Amazonas (*sensu latissimo* Eva et al, 2005, A proposal for defining the geographical Boundaries of Amazônia) = 555 (± 114) /ha, es decir, 55.500 (± 11.400) árboles por km² (Feldpausch et al., 2011, Height-diameter allometry of tropical forest trees); área total cubierta por dosel cerrado en el Amazonas en 2004 = 6.280.468 km² (Eva et al, 2005, entre ellos los bosques húmedos, secos e inundados); área histórica cubierta de bosque (área con bosque en 2004 más la tala en 2004, Alves 2007) = 6.943.468 km² (puede ser mayor si se incluye la deforestación acumulada fuera de Brasil); estimación mínima total de los árboles originales de la selva amazónica: 385 362 474 000 (± 79.155.535.200).

96 La tala rasa rapó 762.979 km² de la cubierta original (sólo en Brasil); se estima que los árboles removidos con la tala rasa sea igual a 42345334500 (± 8.697.960.600).

97 El ritmo temporal del corte: 42345334500 (± 8.697.960.600) árboles cortados en 40 años; 1058633363 (± 217 449 015) por año; 2900365 (± 595 750) por día; 120848 (± 24,823) por hora; 2014 (± 413) por minuto; 33,5 (± 6,9) por segundo.

98 (von Randow et al., 2013) Inter-annual variability of carbon and water fluxes in Amazonian forest, Cerrado and pasture sites, as simulated by terrestrial biosphere models. (Marengo, 2004) Characteristics and spatiotemporal variability of the Amazon River Basin Water Budget.

99 (Hodnett et al., 1996) Comparisons of long-term soil water storage behavior under pasture and forest in three areas of Amazonia.

Amazonía (y por consecuencia de América del Sur), imaginemos un futuro próximo en el cual el Brasil fuese atacado por una poderosa nación enemiga con una tecnología secreta que emplea ondas perturbadoras emitidas por satélite para disipar nubes y, así, reducir las lluvias. La nación enemiga tendría sus intereses comerciales amenazados por el éxito del sector agrícola brasileiro. Su arma “mata-lluvias” serviría para menguar las plantaciones, arruinando cosechas y haciendo que los precios internacionales se desborden. Informados por el servicio secreto brasileiro de los maleficios de aquél país sobre Brasil, ¿Cuál sería la reacción de los agricultores brasileiros? ¿Cuál sería la reacción de la sociedad y del gobierno? Con toda la humillación que el ultraje impone, no necesitamos clarividencia para sospechar que la reacción sería inmediata y poderosa.

La remoción de los bosques no derrota apenas a la agricultura; la falta de agua afecta a la producción de energía, a las industrias y a las ciudades.

nación extranjera. En una guerra no declarada, en los últimos 40 años centenas de miles se dedicaron a exterminar los bosques.

La remoción del bosque, amenazando las lluvias y el clima, no derrotaría apenas a la agricultura competitiva; la falta (o exceso) de agua afecta a la producción de energía, las industrias, el abastecimiento de las poblaciones y la vida en las ciudades. Pero, a

diferencia de Europa y a Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial, nosotros estuvimos y permanecemos prácticamente inertes en relación a los ataques sufridos, dejando que sigan, año tras año, destruyendo la *Cuna Espléndida*.¹⁰⁰ ¿Quiénes son los que atentan contra el bienestar de la nación? ¿Por qué la sociedad no se levantó y el Ejército no fue accionado en defensa del país?

Para enfrentar la gravedad de la situación, necesitamos una movilización similar a un esfuerzo de guerra, pero no direccionada al conflicto. En primer lugar, es urgente una “guerra” contra la ignorancia, un esfuerzo sin precedentes para el esclarecimiento a la sociedad, incluso y especialmente a aquellos que aún se aferran al gran error de creer que la devastación de los bosques es inocua. Entre ellos, los que manejan motosierras, tractores con cadenas y antorchas incendiarias, y los grupos que formularon políticas públicas, financiaron, controlaron y dieron cobertura legal y propagandística a los *comandos* de la devastación. Sin embargo, solamente una pequeña minoría de la sociedad estuvo y aún está directamente involucrada en la destrucción de bosques. Y es esa minoría la que empuja la nación en dirección al abismo climático.

Esa minoría deforestadora no es uniforme, pero su cultura privilegia intereses arraigados en una visión de corto plazo, sin compromiso con las consecuencias. Embotados por los intereses inmediatos, parecen ignorar que la supresión de las selvas puede poner el

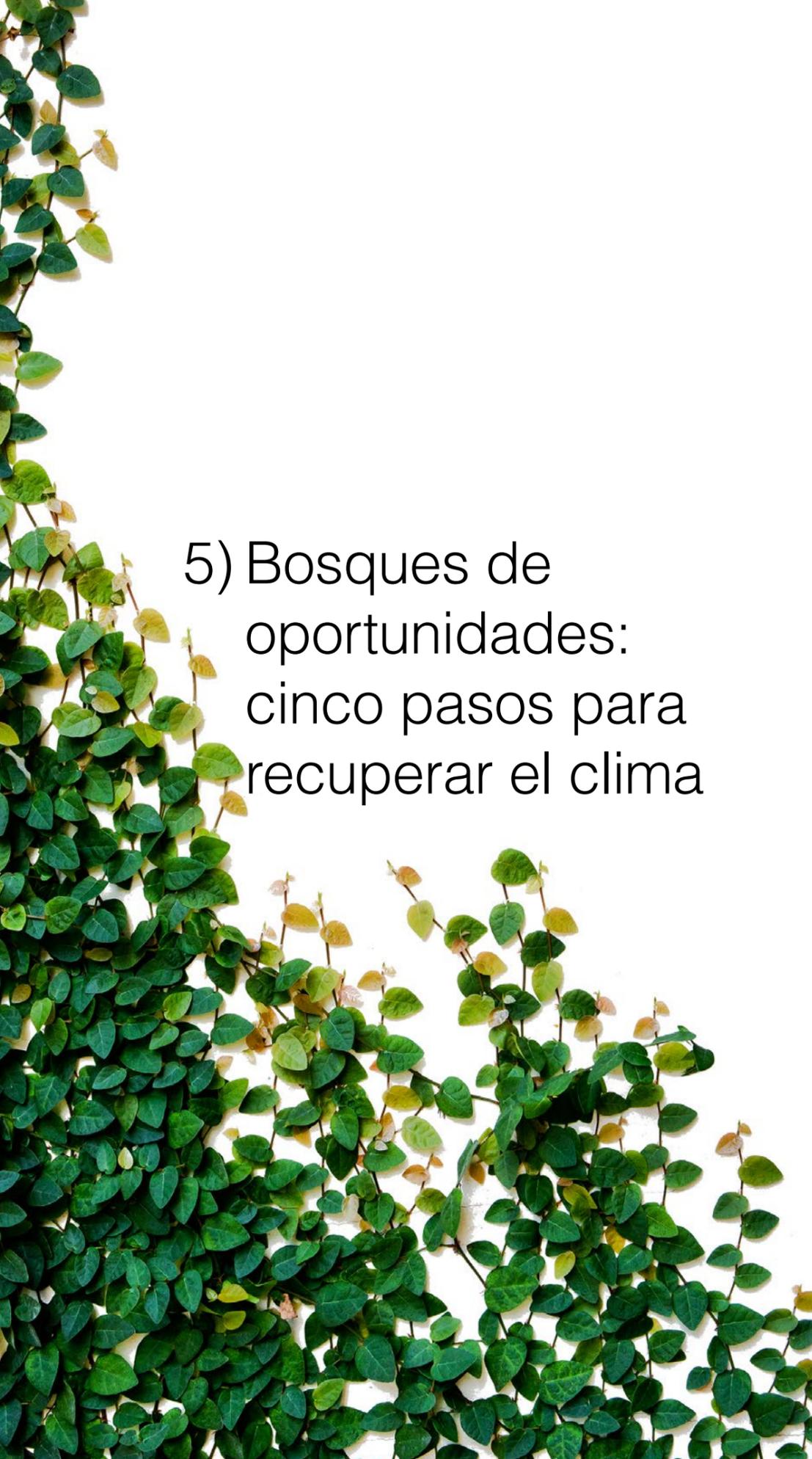
Esfuerzo de Guerra

Ante grandes amenazas a una nación, las fuerzas militares se preparan. Después del ataque japonés a Pearl Harbor, Estados Unidos decidió que era necesario entrar en la Segunda Guerra Mundial. En pocos meses organizó un “esfuerzo de guerra” en el que las fábricas de automóviles pasaron a producir tanques y aviones militares y otras fábricas no bélicas pasaron a producir munición, armamento y otros materiales y equipos requeridos. Aquél esfuerzo de guerra llegó hasta la Amazonía, con los soldados del caucho. Sin tal esfuerzo concentrado y extraordinario, los Aliados no habrían vencido.

clima en riesgo. Sin embargo, ante las evidencias, continuar con este tipo de práctica no es sostenible. Por eso, en la medida en que comprendan que la destrucción sistemática de los bosques es un tiro en el pie, hay la posibilidad de que los agentes deforestadores se convenzan a cambiar. Acabar con la ignorancia sobre la función esencial de los bosques en la generación del clima amigo será un vector en la conversión de deforestadores en protectores, y quizá incluso en restauradores de los bosques. Ya existen ejemplos en los que esa conversión ya se ha dado, con grandes ventajas para todos los involucrados¹⁰¹.

100 N. de la T. “*Deitado eternamente em berço esplêndido*” [acostado eternamente en *cuna espléndida*] es un verso del himno nacional brasileiro.

101 En proyectos como **Lucas do Rio Verde Legal**: <http://www.tnc.org.br/tnc-no-mundo/americas/brasil/projetos/lucas-do-rio-verde.xml>; **Paragominas: De vilões a mocinhos do desmatamento**: <http://www.tnc.org.br/nossas-historias/destaques/paragominas-deixa-lista-do-desmatamento.xml>; **Y Ikatu Xingu**: <http://www.yikatuxingu.org.br/>; etc. Todos links en portugués.



5) Bosques de oportunidades: cinco pasos para recuperar el clima

Mientras no sobrepasemos el punto de no retorno, existen unas pocas ventanas de oportunidad para la acción reparadora. Este es el momento de comprometer aquél vigoroso y sanador *esfuerzo de guerra* en el intento de revertir el desastre climático de la destrucción del bosque *Océano Verde*. En este sentido, se imponen varias tareas:

5.1) Popularizar la ciencia del bosque: saber es poder

Bosque: quien lo conoce lo protege. Es vital conseguir que los hechos científicos sobre el rol determinante del bosque para el clima amigo y el efecto de la deforestación en la generación del clima inhóspito lleguen a la sociedad y se transformen en conocimiento común y corriente. Se deben hacer todos los esfuerzos para simplificar el mensaje sin desvirtuar su esencia. Ante todo, es preciso hablarle a la sensibilidad de las personas.

5.2) Reducir a cero la deforestación: para antes de ayer

Reducir a cero la deforestación en el corto plazo es indispensable si queremos contener un daño mayor al clima.

Es necesario erradicar vigorosamente la complacencia y la dilación con la destrucción. Un nivel adecuado de rigor se compara con el tratamiento dado al tabaco. Constatados los males al ser humano y los daños económicos a la sociedad, se adoptaron una serie de medidas para desestimular el tabaquismo.

En lo que se refiere a la deforestación en Brasil, varias

providencias del gobierno federal iniciaron ese proceso de control y desincentivo, alcanzando resultados significativos. Pero es preciso ir más allá y llegar a la raíz del problema. Ampliar las políticas del Poder Ejecutivo, movilizar a la sociedad para neutralizar acciones desagregadoras del Poder Legislativo, como la amnistía ofrecida a los deforestadores en el nuevo Código Forestal Brasileiro. Infelizmente, las discusiones alrededor del Código Forestal no incluyeron las consecuencias climáticas del uso del suelo.

Una situación extraordinaria requiere de medidas extraordinarias. Siempre hay tiempo para revisar las leyes y adecuarlas a las demandas de la realidad y de la sociedad. Solamente multar a los deforestadores, que más adelante serán amnistiados por la burocracia o por el Congreso, es una receta de fracaso.

Otras vulnerabilidades del programa de control de la deforestación incluyen el estímulo de ciclos económicos¹⁰², la demanda creciente de mercados por maderas y productos agrícolas, la codicia por la tierra y los vectores representados por carreteras, hidroeléctricas, y otros programas de desarrollo cuyas debilidades de planificación fomentan la invasión y ocupación de las áreas de bosque¹⁰³. Para que la deforestación sea efectivamente reducida a cero en el corto plazo, lo cual es indispensable para contener un mayor daño al clima, todos esos huecos deben ser cubiertos con movilización y articulación de la sociedad y del gobierno, estrategia, inteligencia, visión de largo plazo y sentido de urgencia.

102 Picos de deforestación en 1995 (29.059 km²) y 2004 (27.130 km²) ocurrieron en el ápice del fuerte desempeño de la economía.

103 (Laurance et al., 2001) The Future of the Brazilian Amazon.

5.3) Acabar con el fuego, el humo y el hollín: ¡llamen los bomberos!

Cuanto menos humo y hollín, menor el daño a la formación de lluvias, menor daño al bosque océano-verde.

Todas las formas de ignición originarias de las actividades humanas sobre el bosque necesitan ser rigurosamente eliminadas. El fuego, en áreas de bosque, pastizales y áreas agrícolas próximas o distantes de la Amazonía, es un problema grave¹⁰⁴. Cuantas menos fuentes de humo y hollín existan, menor el daño a la formación de nubes y lluvias, por lo tanto menor el daño al bosque Océano Verde. Dada la cultura del fuego, que aún prevalece en el campo, esa no será una tarea fácil, pero es fundamental.

Pero regresemos a la comparación con el tabaco. Durante décadas, la industria ocultó la realidad sobre los daños del humo a la salud. Empleó elaboradas estrategias y muchos recursos en la confusión cognitiva, buscando desmerecer la ciencia y confundir a la sociedad. Pero la verdad triunfó. Algo que parecía imposible se hizo tendencia mundial irreversible. El mismo camino de la prohibición del fuego es facilitado por la existencia de una infinidad de alternativas a la quema que pueden ser empleadas con ventaja por los productores.

5.4) Recuperar el pasivo de la deforestación: el fénix resurge de las cenizas

Aunque reducir a cero la deforestación sea una tarea obligatoria, de la que no se puede escapar, y desde hace

mucho tiempo necesaria, apenas eso ya no es suficiente para revertir las amenazadoras tendencias climáticas. Es necesario confrontar el pasivo de la deforestación acumulada, empezar a pagar la principal parte de la enorme deuda ambiental que se tiene con el bosque.

Aunque el esfuerzo de reforestación sea desafiador, es el mejor y quizá el único camino para desviar un riesgo más grande en relación con el clima.

Pero ¿Cómo reconstruir un paisaje devastado? Si fuese un paisaje urbano, sería el caso trabajar con las estructuras y edificios que demandarían una penosa reconstrucción, ladrillo por ladrillo, un esfuerzo de años. Ya las estructuras inertes de la naturaleza, como los suelos, las rocas y las montañas, llevan miles, millones e incluso miles de millones de años para componerse o recomponerse, fruto de la acción de lentas fuerzas geofísicas.

¿Y el paisaje vivo? Si la vida anterior no llegó a ser extinguida, es decir, si hay propágulos, semillas, huevos, padres y sus crías, una fuerza misteriosa y automática de reconstrucción entra en acción. Los “ladrillos” biológicos son los átomos, que se unen en las moléculas, componen las sustancias que construyen las células, se articulan en los tejidos, se aglomeran en los órganos, constituyen los organismos, habitan los ecosistemas, interactúan en los biomas cuya suma total es la biosfera.

Para que tengamos una idea práctica de lo que está implícito en este orden vivo encadenado y automático, imaginemos como sería si pudiésemos disponer de

bienes modernos (de la tecnología humana), de la misma manera que lo hace la naturaleza. Podríamos encarar un automóvil (especie) que vendría en un módulo desarrollador (semilla). Puesto en una maceta al sol y al agua por algunas semanas, crecería el automóvil.

¿Parece difícil? Ocurre que esa tecnología ya existe, funcionando a toda máquina en los ecosistemas de la Tierra, desde su origen. Un árbol portentoso, cuyas habilidades físicas y bioquímicas para existir y sobrevivir bordean la ficción, salió entero de una sencilla y minúscula semilla, tomando del aire y de la tierra los materiales para formarse.

En la perspectiva del clima, necesitamos y debemos regenerar todo lo que fue alterado.

Así, el mismo bosque nos ofrece una solución estafalaria para la reconstrucción de los paisajes forestales nativos, pues dispone de ingeniosos mecanismos para recomponerse a partir de semillas, o cicatrizarse, con el proceso natural de regeneración de los árboles en los claros de luz. Existe una rica colección de especies de plantas pioneras que tienen la capacidad de crecer en condiciones ambientales extremas. Esas plantas forman un bosque secundario denso, creando condiciones para que el complejo y duradero bosque tropical pueda restablecerse por sucesión ecológica de mediano y largo plazo¹⁰⁵.

Sin embargo, cuando el área deforestada es muy grande, el proceso natural entra en déficit por no lograr hacer llegar al suelo descubierto las semillas de las pioneras.

104 (Koren et al., 2004) Measurement of the Effect of Amazon Smoke on Inhibition of Cloud Formation.

105 (Nobre, 2006) Fênix Amazônica, Renascendo das Cinzas da Destruição. Proposta para a construção de um ecossistema de empreendimentos sustentáveis na Amazônia.

Entonces se hace necesario plantar especies nativas. Si aún existen las lluvias, el bosque se regenerará en las áreas replantadas. Una colección de árboles plantados es mejor que el suelo expuesto, pero aún está lejos de reconstituir en toda su complejidad la parte funcional del ecosistema destruido¹⁰⁶.

Es necesario utilizar el paisaje de modo inteligente, zonificando las tierras a partir de sus potencialidades, vulnerabilidades y riesgos.

original garantizó, a lo largo de las eras geológicas, la salud benigna y preservadora del ciclo hidrológico en América del Sur.

Esa recomposición forestal implicaría la reversión del uso del suelo en vastas áreas que hoy están ocupadas, algo improbable en el orden actual. Sin embargo, existen caminos alternativos con posibilidades de generar condiciones inmediatas de aceptación. Se trata de hacer un uso inteligente del paisaje, con aplicación de tecnologías de zonificación de las tierras en función de sus potencialidades, vulnerabilidades y riesgos¹⁰⁷.

La agricultura y otras actividades económicas en las zonas rurales pueden ser optimizadas, aumentando su capacidad productiva y liberando espacio para la reforestación con especies nativas. Varios estudios de Embrapa¹⁰⁸ muestran cómo intensificar la producción

pecuaria, reduciendo enormemente la demanda por áreas de pastos. Proyectos como el *Y Ikatu Xingu*¹⁰⁹ y *Cultivando Água Boa*¹¹⁰ demuestran que es posible la asociación de interesados de variados sectores en la recuperación de selvas ciliares y otras valiosas acciones de sustentabilidad.

El caos climático previsto tiene el potencial de ser inconmensurablemente más dañino que la Segunda Guerra Mundial. Lo que es impensable el día de hoy puede convertirse en una realidad inevitable en un plazo menor de lo que esperamos. China, con todos sus graves problemas ambientales, ya anda en este camino y se transformó en el país que más reforesta. Restaurar los bosques nativos es la mejor apuesta que podemos hacer en contra del caos climático, una verdadera póliza de seguro.

5.5) Gobernantes y sociedad necesitan despertar: choque de realidad

En quince días y utilizando billones de dólares, gobernantes de varias naciones decidieron salvar los bancos en la crisis financiera de 2008.

En 2008, cuando explotó la burbuja financiera de Wall Street, los gobiernos de todo el mundo necesitaron solamente 15 días para decidir utilizar billones de dólares de recursos públicos para rescatar bancos privados y evitar lo que amenazaba con transformarse en un colapso del sistema financiero. La crisis climática tiene potencial para ser



106 **Partners:** La gente y la reforestación en los trópicos: una red de educación, investigación y síntesis: <http://partners-rcn.uconn.edu/page.php?4>, WeForest: <http://www.weforest.org/>, los dos en inglés.

107 Esto podría lograrse mediante la aplicación del modelo de terreno **HAND**, desarrollado en el grupo de Modelaje de Terrenos del Centro de Ciencia del Sistema Terrestre en INPE: <http://modelohand.blogspot.com.br/>, en portugués.

108 **Corporación Brasileña de Investigación Agrícola**, <https://www.embrapa.br/meio-ambiente>, en portugués.

109 **Y Ikatu Xingu, salve la buena agua del Xingú**, <http://www.yikatuxingu.org.br/>, en portugués.

110 **Cultivando el Agua buena**, un programa de la Itaipu Binacional (compañía hidroeléctrica): <http://www.cultivandoaguaboa.com.br/>, en portugués.



Pese a ser urgente, reducir a cero la deforestación aún es presentado como una meta para el futuro distante.

inconmensurablemente más grave que la crisis financiera, aunque las élites gobernantes vienen postergando desde hace más de quince años la adopción de decisiones efectivas que desvíen a la humanidad del desastre climático. Y esta dilación parece empeorar con el tiempo, pese a la disponibilidad de tantas evidencias científicas y salidas viables, atractivas y creativas¹¹¹.

En la Amazonía, el retardo decisivo está en los plazos dilatados para establecer metas y acciones que deberían ser urgentes, pero quedan atrancados en la burocracia impenetrable e impeditiva. Se encuentra también en mora el financiamiento de proyectos alternativos y benéficos y, principalmente, la lenta apropiación de los hechos científicos sobre la importancia de los bosques para el clima. Ignorar soluciones innovadoras, disponibles y viables de valorización económica de los bosques¹¹² es postergar el problema. La deforestación cero, que ya era cuestión urgente hace una década, todavía es colocada como una meta a ser realizada en un futuro distante. Muy distinto, por lo tanto, de los quince días utilizados para salvar a los bancos.

Vimos que el primer esfuerzo coherente y consecuente para reducir efectivamente la deforestación en la Amazonía brasilera tiene su *momentum* a partir de 2003, y sus resultados son visibles, demostrando que es posible

llegar más lejos. Sin embargo, y a pesar de las auspiciosas iniciativas y también de las promesas importantes en proyectos de carbono, estamos muy lejos de aquél “Esfuerzo de guerra” que se requiere para enfrentar la degradación climática. Para avanzar de manera efectiva, son urgentes y necesarias otras iniciativas creativas.

Las élites gobernantes aún tienen cómo cambiar el curso de los acontecimientos. Para eso necesitan tener la buena voluntad y humildad de reconocer el riesgo del colapso en el sistema ambiental.

Suficientemente documentados por la ciencia, los cambios climáticos globales y los amenazadores impactos regionales y locales de la deforestación colocan el pie en la puerta cerrada de

la inacción política, ofreciendo presión creciente sobre los tomadores de decisiones. Si el conocimiento científico calificado, o el buen sentido y la precaución no logran generar una reacción adecuada de quienes detentan los medios financieros y los recursos estratégicos, el caos de grifos secos aquí, ciudades inundadas allá y otros desastres naturales producirán una reacción.

111 Por ejemplo: (Stern, 2007) Stern Review on the Economics of Climate Change; (Sukhdev, et al., 2009) [TEEB](#) - The Economics of Ecosystems & Biodiversity: Climate Issues Update.

112 Por ejemplo: (Meir et al., 2011) Ecosystem Services for Poverty Alleviation in Amazonia; (Trivedi et al., 2009) REDD and PINC: A new policy framework to fund tropical forests as global 'eco-utilities'.

Conclusión

En el Gran Bosque Amazónico, la Tierra guarda uno de sus más espectaculares tesoros: la profusión de vida que inhala gas carbónico y exhala oxígeno, transpira agua, emite olores mágicos, remueve gases tóxicos, pulsa y regula, humedece y hace llover, propulsa vientos y alimenta ríos aéreos, calmando la furia de los elementos, haciendo que el clima próximo y también el más distante sean amigables. Las sociedades abrigadas bajo su hálito dador de vida tienen en ella un cordón umbilical que sostiene sus economías y les ofrece bienestar. Por todo eso, es necesario, deseable, viable e incluso rentable, alterar el *modus operandi* de la ocupación humana en la Amazonía.

Existen muchas y excelentes alternativas para recuperar la competencia de convivencia respetuosa con el bosque de las civilizaciones ancestrales.

Aunque las acciones de salvación propuestas sean todas necesarias para lograr el restablecimiento funcional de la regulación climática

por el bosque, la novedad está en enfrentar el pasivo de la deforestación con reforestación y restauración ecológica. Existen muchas y excelentes alternativas para revivir la competencia de convivencia respetuosa (y tecnológica)¹¹³ con el bosque de las civilizaciones ancestrales¹¹⁴.

El *Esfuerzo de guerra* contra la ignorancia y a favor de la consciencia de la necesidad vital de los bosques es la mejor estrategia para armonizar la sociedad – empezando por los gobernantes – alrededor del objetivo común de recuperar el tiempo perdido, creando posibilidades reales de que evitemos el peor de los desastres climáticos. Sin embargo, si a pesar de la montaña de evidencias científicas aún no somos capaces de actuar, o si nos hacemos demasiado lentos, entonces es probable que tengamos que lidiar con perjuicios incomprensibles para quien siempre tuvo sombra y agua fresca provistos gratuitamente por el Gran Bosque.



113 (Balée, 2003) Native Views of the Environment in Amazonia.

114 (Heckenberger et al., 2003) Amazonia 1492: pristine forest or cultural parkland?

Epílogo: el Prólogo de una nueva era

El mítico bosque amazónico es infinitamente mayor de lo que la humanidad logra ver. Va mucho más allá de un museo geográfico de especies amenazadas guardadas en unidades de conservación y representa mucho más que un simple depósito de carbono, referenciado como masa muerta en los tratados climáticos.

El bosque es un espectacular parque tecnológico de la naturaleza, un complejo vivo que forma una poderosa y versátil fábrica de servicios ambientales. Cualquier invocación que se haga por la valoración del bosque necesita recuperar ese valor intrínseco. Es necesario despertar la capacidad de asombrarse ante la enormidad de la biología tropical en todas las escalas, desde la manipulación de los ínfimos átomos y moléculas hasta la interferencia en los océanos y en la atmósfera global.

Lo que vemos de las acciones humanas sobre el bosque amazónico revela una enorme inconsciencia, tanto de los que están involucrados en su destrucción, como de aquellos que remotamente desean su protección. Cada nueva iniciativa en defensa del bosque ha recorrido los mismos caminos y presionado las mismas teclas. En este comportamiento, hemos insistido en lo que Einstein definió como la misma locura: "Hacer siempre lo mismo, una y otra vez, esperando resultados distintos".

El abundante conocimiento científico, al igual que otras

formas accesibles de percepción y entendimiento ya nos permiten resolver problemas empleando un nuevo enfoque – iluminado, integrador, propositivo y constructivo. Un abordaje distinto, por lo tanto, del pragmatismo reduccionista e inconsecuente que nos trajo hasta acá¹¹⁵.

Análisis serios y amplios muestran un sinnúmero de oportunidades para armonizar la presencia y los intereses de la sociedad contemporánea con una Amazonía viva y vigorosa, reconstituida en sus múltiples capacidades. Para que lleguemos allá, es necesario compenetración y modestia, dedicación y compromiso con la vida. Con los recursos tecnológicos disponibles, podemos agregar inteligencia a la ocupación, optimizando un nuevo uso del suelo que abra espacio para la reconstrucción ecológica del bosque. Podemos también revelar muchos otros secretos que aún están bien guardados por la resiliente biología tropical y, con eso, ir mucho más allá de solamente comprender sus mecanismos.

Pionera en la percepción de esas posibilidades, Janine Benyus lanzó en su libro *Biomimética, la innovación inspirada por la Naturaleza*,¹¹⁶ una revolución en la idea de la conexión entre naturaleza y tecnología. Presentando la propuesta de que los seres humanos deberían copiar conscientemente el genio de la naturaleza en sus propias creaciones, ella anuncia tres principios básicos de esa reaproximación:

- *La Naturaleza como modelo*: estudiar e inspirarse en los sistemas de la naturaleza, sus diseños y procesos para resolver problemas humanos.

- *La Naturaleza como medida*: utilizar un modelo o criterio ecológico para juzgar la corrección de nuestras innovaciones. Luego de 3.800 millones de años de evolución, la naturaleza aprendió qué es lo que funciona, qué es lo apropiado y qué es lo que tiene durabilidad.

- *La Naturaleza como mentora*: un nuevo modelo de ver y valorar la naturaleza, del cual surge una era basada ya no en aquello que podemos "extraer" del mundo natural, sino en lo que podemos aprender a partir de él.

Además de esos, una serie de otros principios que guían el funcionamiento de la naturaleza ofrecen potencial para resolver una gran parte de los problemas actuales. Una lista corta de esos principios listados por Janine Benyus constata que la naturaleza es propulsada por la luz solar; utiliza solamente la energía que necesita; ajusta la forma a la función; recicla todas las cosas; recompensa la cooperación; apuesta en la diversidad; demanda conocimiento local; limita los excesos internamente, y aprovecha el poder de los límites.

116 As seen by Einstein: "We cannot solve problems by using the same kind of thinking we used to create them." Pragmatism, the generator of problems, should not be the solution to solving the same problems.

117 (Benyus, 1997) *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*.

Referencias

- Alves D.S., 2007. Science and technology and sustainable development in Brazilian Amazon Tscharrntke T. et al., (eds), **The stability of tropical rainforest margins, linking ecological, economic and social constraints of land use and conservation**, Springer Verlag Berlin, pp 493-512.
- Agrawala, S., Baiocchi, G., Bashmakov, I., Blanco, G., Bruckner, T., Bustamante, M., Clarke, L., 2014. **IPCC WGIII AR5 TS** Technical Summary.
- Andreae, M.O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A.A., Frank, G.P., Longo, K.M., Silva-Dias, M. a F., 2004. **Smoking rain clouds over the Amazon**. Science 303, 1337–42.
- Arraut, J.M., Nobre, C., Barbosa, H.M.J., Obregon, G., Marengo, J., 2012. **Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America**. J. Clim. 25, 543–556.
- Baker, P.A., Seltzer, G.O., Fritz, S.C., Dunbar, R.B., Grove, M.J., Tapia, P.M., Cross, S.L., Rowe, H.D., Broda, J.P., 2001. **The history of South American tropical precipitation for the past 25.000 years**. Science 291, 640–3.
- Balée, W., 2003. **Native views of the environment in Amazonia, in:** Selin, H. (Ed.), Nature across Cultures: Views of Nature and the Environment in Non- Western Cultures. Kluwer Academic Publishers, pp. 277–288.
- Benyus, J.M., 1997. **Biomimicry: Innovation Inspired by Nature**. New York: William Morrow, 1997.
- Berger, A., Yin, Q., 2012. Astronomical Theory and Orbital Forcing, in: Mathews, J.A., et al. (Eds.), **The SAGE Handbook of Environmental Change: Volume 1**. pp. 405–425.
- Brando, P.M., Balch, J.K., Nepstad, D.C., et al., 2014. **Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought-fire interactions**. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.
- Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S. a, Totterdell, I.J., 2000. **Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model**. Nature 408, 184–7.
- Cox, P.M., Harris, P.P., Huntingford, C., Betts, R.A, Collins, M., Jones, C.D., Jupp, T.E., Marengo, J.A, Nobre, C.A, 2008. **Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution**. Nature 453, 212–5.
- Edenhofer, O., Madrugá, R.P., Sokona, Y., et al., 2014. IPCC WGIII AR5 SPM : **Summary for Policymakers Contents**. ONU - UNFCC
- Espírito-Santo, F.D.B., Gloor, M., Keller M., et al., 2014. **Size and frequency of natural forest disturbances and the Amazon forest carbon balance**. Nature. DOI: 10.1038/ncomms4434
- Eva, H.D., and Huber, O., (editores) 2005. **A proposal for defining the geographical Boundaries of Amazônia**. Synthesis of the results from an Expert Consultation Workshop organized by the European Commission in collaboration with the Amazon Cooperation Treaty Organization - JRC Ispra, Italy
- Feldpausch, T.R., Banin L., Phillips, O.L., et al., 2011. **Height-diameter allometry of tropical forest trees**. Biogeosciences, 8, 1081–1106, 2011
- Foley, J., Costa, M., 2003. **Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate**. Front. Ecol. Environ. 1(1): 38-44
- Fu, R., Yin, L., Li, W., et al., 2013. **Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection**. Proc. Natl. Acad. Sci., 110, 18110–5.
- Gambini, 2000, **Espelho índio: a formação da alma brasileira**. Terceiro Nome Editora, 2000.
- Gash, J.H.C. et al, 1996. **Amazonian Deforestation and Climate**, 1st ed. John Wiley & Sons, West Sussex.
- Good, P., Jones, C., Lowe, J., Betts, R., Gedney, N., 2013. **Comparing Tropical Forest Projections from Two Generations of Hadley Centre Earth System Models, HadGEM2-ES and HadCM3LC**. J. Clim. 26, 495–511.
- Gorshkov, V.G., Makarieva, A.M., Gorshkov, V. V, 2004. **Revising the fundamentals of ecological knowledge: the biota–environment interaction**. Ecol. Complex. 1, 17–36.
- Gorshkov, V.G., Makarieva, A.M., Gorshkov, V.V., 2000. **Biotic Regulation of the Environment: Key Issues of Global Change**. Springer Verlag.
- Heckenberger, M.J., Kuikuro, A., Kuikuro, U.T., Russell, J.C., Schmidt, M., Fausto, C., Franchetto, B., 2003. **Amazonia 1492: pristine forest or cultural parkland?** Science 301, 1710–4.
- Hodnett, M.G., Oyama, M.D., Tomasella, J., Filho, A.O.M., 1996. **Comparisons of long-term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia**. Amaz. Deforestation Clim. Chapter 3, 1–21.
- Hooghiemstra et al., 2002. **Evolution of forests in the northern Andes and Amazonian lowlands during the Tertiary and Quaternary, in** Guariguata M & G Kattan, eds. Ecology of Neotropical Rainforests. Ediciones LUR, Cartago, Costa Rica, 2002
- Huete, A.R., Didan, K., Shimabukuro, Y.E., Ratana, P., Saleska, et al., 2006. **Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season**. Geophys. Res. Lett. 33.

- Hutyra, L.R., Munger, J.W., Nobre, C.A., Saleska, S.R., Vieira, S.A., Wofsy, S.C., 2005. **Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazônia.** *Geophys. Res. Lett.* 32, L24712.
- Jasechko, S., Sharp, Z.D., Gibson, J.J., Birks, S.J., Yi, Y., Fawcett, P.J., 2013. **Terrestrial water fluxes dominated by transpiration.** *Nature* 496, 347–50.
- Koren, Y.J., Kaufman, L.A., Remer, J.V., Martins, 2004. **Measurement of the Effect of Amazon Smoke on Inhibition of Cloud Formation.** *Science*, 303, 5662, 1342-1345
- Laurance WF, MA. Cochrane, S. Bergen, et al., 2001a. **The Future of the Brazilian Amazon.** *Science*, 291, 5503, 438-439.
- Laurance, W.F., Williamson, G.B., 2001b. **Positive Feedbacks among Forest Fragmentation, Drought, and Climate Change in the Amazon Conservation Biology.** 15, 6 p1529
- Lawrence, D., Vandecar, K., 2014. **Effects of tropical deforestation on climate and agriculture.** *Nature Climate Change*, DOI :10.1038/NCLIMATE2430 DOI: 10.1038/NCLIMATE2430 DOI: 10.1038/NCLIMATE2430
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Li, B.-L., 2008. **On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine.** *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 8, 17423–17437.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., 2007. **Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land.** *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1013–1033.
- Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Sheil, D., Nobre, A.D., Li, B.-L., 2013. **Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics.** *Atmos. Chem. Phys.* 13, 1039–1056.
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Nefiodov A.V. (2014) **Condensational power of air circulation in the presence of a horizontal temperature gradient.** *Physics Letters A*, 378, 294-298.
- Makarieva A.M., Gorshkov V.G., Sheil D., Nobre A.D., Bunyard P., Li B.-L. (2014) **Why does air passage over forest yield more rain? Examining the coupling between rainfall, pressure, and atmospheric moisture content.** *Journal of Hydrometeorology*, 15, 411-426.
- Malhi, Y., Aragão, L., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., Mcsweeney, C., Meir, P., 2009. **Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest.** *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 106, 20610–20615.
- Marengo, J.A., 2004. **Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget.** *Clim. Dyn.* 24, 11–22.
- Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A., 2011. **The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region.** *Geophys. Res. Lett.* 38.
- Marengo, J., Borma, L., Rodriguez, D., 2013. **Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation.** *Am. J. Clim. Chang.* 2013, 87–96.
- Marengo, J., Soares, W., Saulo, C., Cima, M., 2004. **Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability.** *J. Clim.* 17, 2261–2280.
- Marengo, J.A., Tomasella, J., Soares, W.R., Alves, L.M., Nobre, C.A., 2011. **Extreme climatic events in the Amazon basin.** *Theor. Appl. Climatol.* 107, 73–85.
- Marques et al. 1977. **Precipitable water and water vapor flux between Belem and Manaus.** *Acta Amazonica*, 7, 355-362
- Matsui et al., 1976. **Isotopic hydrology in Amazonia 2: Relative discharges of the Negro and Solimões rivers through 180 concentrations.** *Water Resour. Res.*, 2(4), 781-785.
- Meir, P., Mitchell, A., Marengo, J., Young, C., Poveda, G., Llerena, C.A., Rival, L., Meneses, L., Hall, A., Betts, R., Farley, J., Fordham, S., Trivedi, M., 2011. **Ecosystem Services for Poverty Alleviation in Amazonia.** Global Canopy Programme
- Molion, 1975. **A climatonic study of the energy and moisture fluxes of the Amazonas basin with considerations of deforestation effects.** Ph.D. thesis, University of Wisconsin, Madison.
- Nepstad, D., Lefebvre, P., Lopes da Silva, U., Tomasella, J., Schlesinger, P., Solorzano, L., Moutinho, P., Ray, D., Guerreira Benito, J., 2004. **Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis.** *Glob. Chang. Biol.* 10, 704–717.
- Nepstad, D.C., Verissimo, A., Alencar, A., et al., 1999. **Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire.** *Nature*, 398, 505-508.
- Newell, R., Newell, N., 1992. **Tropospheric Rivers? - A Pilot Study.** *Geophys. Res. Lett.* 12, 2401–2404.
- Nobre, A.D., 2006. **Fênix Amazônico, Renascendo das Cinzas da Destruição. Proposta para a construção de um ecossistema de empreendimentos sustentáveis na Amazônia.** report, preprint. não publicado.
- Nobre, A.D., 2005. **Is the Amazon Forest a Sitting Duck for Climate Change? Models Need yet to Capture the Complex Mutual Conditioning between Vegetation and Rainfall, in:** Silva Dias, P.L., Ribeiro, W.C., Nunes, L.H. (Eds.), *A Contribution to Understanding the Regional Impacts of Global Change in South América.* Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, São Paulo, pp. 107–114.
- Nobre, C., Borma, L., 2009. **“Tipping points” for the Amazon forest.** *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 28–36.
- Nobre, C., Sellers, P., Shukla, J., 1991. **Amazonian Deforestation and Regional Climate Change.** *J. Clim.* 4, 957–988.

- Nobre, P., 2009a. **Peer Review Question Interactive comment on “On the validity of representing hurricanes as Carnot heat engine”** by AM Makarieva et al. *Atmos. Chem. Phys. Discuss* 8669–8670.
- Nobre, P., Malagutti, M., Urbano, D.F., de Almeida, R. a. F., Giarolla, E., 2009b. **Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation**. *J. Clim.* 22, 5686–5697.
- Oyama, M.D., Nobre, C.A., 2003. **A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America**. *Geophys. Res. Lett.* 30, 2199.
- Phillips, O., Aragão, L., Lewis, S., Fisher, J., 2009. **Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest**. *Science* (80). 323, 1344–1347.
- Phillips, O.L., van der Heijden, G., Lewis, S.L., et al., 2010. **Drought-mortality relationships for tropical forests**. *New Phytol.* 187, 631–46.
- Pielke, R., Avissar, R., 1998. **Interactions between the atmosphere and terrestrial ecosystems: influence on weather and climate**. *Glob. Chang. Biol.* 461–475.
- Pöschl, U., Martin, S.T., Sinha, B., et al., 2010. **Rainforest aerosols as biogenic nuclei of clouds and precipitation in the Amazon**. *Science* (80) 329, 1513–6.
- Poveda, G., Jaramillo, L., Vallejo, L.F., 2014. **Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers**. *Water Resour. Res.* 50, 98–118.
- Poveda, G., Mesa, O., 1997. **Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena**. *J. Clim.* 2690–2702.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., 2012. **Review article of the current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change**. *Cryosph. Discuss.* 6, 2477–2536.
- Rummel, U., Ammann, C., Kirkman, G.A., et al., 2007. **Seasonal variation of ozone deposition to a tropical rain forest in southwest Amazonia**. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5415–5435.
- Saatchi, S., Asefi-Najafabady, S., Malhi, Y., 2013. **Persistent effects of a severe drought on Amazonian forest canopy**. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 110, 565–70.
- Salati, E., Dall’Olio, A., Matsui, G., J.R., 1979. **Recycling of Water in the Amazon Basin: An Isotopic Study**. *Water Resour. Res.* 15, 1250–1258.
- Saleska, S.R., Didan, K., Huete, A.R., da Rocha, H.R., 2007. **Amazon forests green-up during 2005 drought**. *Science* 318, 612.
- Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M.H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B.S., Cardoso, M., 2007. **Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion**. *Geophys. Res. Lett.* 34.
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C., Dalcher, A., 1986. **A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models**. *J. Atmos. Sci.* 43, 505–531.
- Sheil, D., Murdiyarso, D., 2009. **How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis**. *Bioscience* 59, 341–347.
- Spracklen, D.V., Arnold, S.R., Taylor, C.M., 2012. **Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests**. *Nature* 489, 282–5.
- Stern, N., 2006. **Stern Review: The economics of climate change**. London: HM treasury.
- Sukhdev, P., Bishop, B., Brink, J., et al., 2009. **TEEB - The Economics of Ecosystems & Biodiversity: Climate Issues Update**
- Trivedi, M., Mitchell, A., Mardas, N., Parker, C., Watson, J., Nobre, A., 2009. **REDD and PINC: A new policy framework to fund tropical forests as global “eco-utilities”**. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 8, 012005.
- Valeriano, D. de M., Monteiro, A.M.V., et al., 2008. **Monitoramento da Cobertura Florestal da Amazônia por Satélites**. *Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD E QUEIMADAS 2007-2008 INPE*. Sao Jose dos Campos.
- Viana, E. de S., 2012. **Máquinas e Métodos de Desmatamento**. Monografia, Universidade Estadual de Goiás. 18p.
- Villa Nova et al., 1976. **Estimativa de evapotranspiração na Bacia Amazônica**. *Acta Amazônica*, 6(2): 215 - 228.
- Von Randow, C., Manzi, a. O., Kruijt, B., et al., 2004. **Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia**. *Theor. Appl. Climatol.* 78, 5–26.
- Von Randow, C., Zeri, M., Restrepo-Coupe, N., et al., 2013. **Inter-annual variability of carbon and water fluxes in Amazonian forest, Cerrado and pasture sites, as simulated by terrestrial biosphere models**. *Agric. For. Meteorol.* 182-183, 145–155.
- Williams, E., D. Rosenfeld, N. Madden, et al., 2002. **Contrasting convective regimes over the Amazon: Implications for cloud electrification**. *J. Geophys. Res.*, 107, 8082, doi:10.1029/2001JD000380.

Créditos

Edición en la versión original:

Jaime Gesisky – Green Editora e Comunicação

Diagramación:

Felipe Horst – www.felipehorst.com

Imágenes:

Agência Brasil, André Villas Bôas/ISA, Antonio Nobre, Gerlando Lo Savio, Margi Moss, Meirat Andreae, Philip Davison and image banks.

REALIZACIÓN



PATROCINIO INSTITUCIONAL



ASOCIACIÓN ESTRATÉGICA



APOYO



Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-17-00074-4



9 788517 000744