



*por un planeta vivo*

## Los círculos viciosos de la Amazonía

*Sequía y fuego en el invernadero*

*Puntos ecológicos y climáticos críticos del bosque húmedo tropical más grande del mundo y medidas prácticas de prevención*



*Un reporte preparado para WWF, la organización mundial de conservación conocida también como World Wildlife Fund en Estados Unidos y Canadá  
Autor: Daniel C. Nepstad*

*Este reporte fue apoyado por*

- *Woods Hole Research Center,*
- *Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia,*
- *Universidade Federal de Minas Gerais.*

*Con especial agradecimiento dedicado a Britaldo Soares Filho, Claudia Stickler, Paul Lefebvre, Paulo Moutinho, Karen Schwalbe y Wendy Kingerlee.*



*Una evaluación científica independiente del contenido de este reporte fue realizada por el Prof. Yadvinder Malhi, Profesor de Ecosystem Science de la Universidad de Oxford.*

## **Agradecimientos**

Las siguientes personas aportaron valiosa asesoría e información para este reporte:

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| – Keith Allot                  | – Matthew Perl                           |
| – Gabriel Azevedo              | – Duncan Pollard                         |
| – Mauro Armelin                | – George Powell                          |
| – Michael Case                 | – Nima Raghunathan                       |
| – Soh Koon Chng                | – Juan Carlos Riveros                    |
| – Ken Creighton                | – Carlos Alberto<br>de Mattos Scaramuzza |
| – Mónica Echeverría            | – Kirsten Schuyt                         |
| – Michael Evers                | – Karen Suassuna                         |
| – Sarah Hutchison              | – Meg Symington                          |
| – Guènola Kahlert              | – Rodney Taylor                          |
| – Rebeca Kritsch               | – Alois Vedder                           |
| – Urbano Lopes da Silva Júnior | – Hans Verolme                           |
| – Claudio C. Maretti           |  |
| – Christine Pendzich           |  |

## Contenido

<b>Resumen ejecutivo</b> .....	<b>4</b>
El enlace íntimo entre el bosque amazónico y el clima .....	4
El punto de no retorno podría estar más cerca de lo que pensamos .....	4
Posibilidades para un giro completo .....	5
<b>Introducción</b> .....	<b>7</b>
<b>Sequía, fuego y el punto crítico ecológico</b> .....	<b>8</b>
<b>Deforestación, humo, calentamiento global y el punto crítico climático</b> .....	<b>11</b>
<b>Nuevas presiones para deforestar podrían acelerar la muerte regresiva</b> .....	<b>13</b>
<b>¿Avanzando hacia una muerte regresiva?</b> .....	<b>15</b>
<b>Evitando un punto crítico en la Amazonía: procesos claves</b> .....	<b>17</b>
<b>Conclusión</b> .....	<b>19</b>
<b>Literatura citada</b> .....	<b>20</b>

## Resumen Ejecutivo

“Amazonía” evoca en nuestras mentes un vasto bosque lluvioso, el sistema fluvial más grande del mundo, abundancia de vida, diversidad cultural y biológica entremezclada e interdependiente. Encerrados en los compuestos de sus plantas y animales se encuentran las curas aún no descubiertas para muchas enfermedades y los componentes de la tecnología molecular que necesitaremos para vivir más sosegadamente en este planeta. En sus recodos más remotos habitan sociedades indígenas que nunca han estado frente a frente con extraños del mundo moderno. Pero la “Amazonía” está tomando un nuevo significado. Se ha convertido en un símbolo global de la dependencia humana en los ecosistemas naturales. Regula el clima que conocemos hoy día y podría estar amenazada por un clima mundial cada vez más caliente y errático. El propósito de este informe es explorar la relación entre la Amazonía, el clima y los cambios dentro de esta relación que están ocurriendo como consecuencia de la destrucción del bosque y la liberación a la atmósfera de gases que atrapan calor. También pretende interpretar la mejor información disponible para determinar cuan cerca estamos del punto sin retorno de una “muerte regresiva” considerable del bosque en la Amazonía e identificar algunos pasos que podríamos tomar para contrarrestar este proceso.

### El enlace íntimo entre el bosque amazónico y el clima

1) El complejo de bosques de la Amazonía está íntimamente conectado al clima mundial. En principio, influye sobre el clima actuando como un gigantesco consumidor de calor cerca de la tierra, absorbiendo la mitad de la energía solar que le llega a través de la evaporación del agua de su follaje<sup>1</sup>. En segundo lugar, es una reserva amplia y relativamente sensible de carbono que se libera a la atmósfera a través de la deforestación, la sequía y el fuego, contribuyendo a la acumulación atmosférica de gases que atrapan calor y que son la causa del calentamiento global. En tercer lugar, el agua que drena de estos bosques hacia el Océano Atlántico constituye del 15 al 20 por ciento de la descarga total mundial de agua dulce fluvial y podría ser suficiente para influir sobre

<sup>1</sup> La mayor parte de la energía atrapada en el agua se libera cuando el vapor se condensa para formar nubes y lluvia, y esta es una de las principales maquinarias de circulación atmosférica global.

algunas de las grandes corrientes oceánicas que son, en sí, importantes reguladoras del sistema climático global. *La conservación del bosque amazónico será necesaria para estabilizar el clima mundial*

2) La Amazonía está en la cúspide de un período dramático de transformación a través del cambio climático. El calentamiento global probablemente reducirá la precipitación en más del 20 por ciento y aumentará la temperatura en más de 2°C, y quizá hasta 8°C, para el final del siglo si la sociedad no es capaz de hacer los grandes recortes en las emisiones de gases de invernadero necesarios si queremos evitar cambios climáticos peligrosos. El efecto de secado será más severo en la Amazonía oriental. Esta tendencia a la sequía y calor podría estar reforzada por la muerte regresiva a gran escala del bosque húmedo en la Amazonía oriental al reemplazarse el bosque por vegetación tipo sabana y semi-árida. *La estabilización del clima mundial será necesaria para conservar el bosque amazónico.*

### El punto sin retorno podría estar más cerca de lo que pensamos

1) Muchos cambios que se están dando en la Amazonía hoy día podrían conducir a una conversión y degradación extensa del bosque amazónico en los próximos 15 a 25 años, mucho más pronto que las predicciones de muerte regresiva de final de siglo de algunos modelos. Las tendencias actuales de expansión agrícola y ganadera, el fuego, la sequía y la tala podrían deforestar o severamente dañar el *55 por ciento del bosque húmedo amazónico para el año 2030.*

2) *La extensa degradación del bosque podría acelerarse a través de la influencia sinérgica de varios círculos viciosos de retroalimentación que existen dentro y entre los ecosistemas y el clima de la región amazónica.* Si se alcanza el punto crítico de la selva amazónica, el prospecto de conservar el bosque lluvioso de la Amazonía se reducirá considerablemente, mientras que la pérdida de biodiversidad y la emisión de gases de efecto invernadero de la región aumentarán.

3) *El punto crítico ecológico* será alcanzado cuando los bosques nativos resistentes al fuego sean degradados a matorral propenso al fuego a través del daño continuo del bosque provocado por la sequía, tala o el fuego. Este punto crítico es favorecido por círculos viciosos dentro del régimen de fuego de la Amazo-

nía. Los bosques que se queman son más susceptibles a mayores quemas ya que la muerte de árboles inducida por el fuego permite que más luz solar llegue hasta el interior del bosque, secando más las hojas y ramas muertas del sustrato forestal. La invasión del bosque con pastos, helechos y bambúes inflamables después del fuego refuerza el ciclo vicioso de quema aumentando la cantidad de combustible en el sustrato forestal. El punto crítico ecológico es favorecido por las prácticas agrícolas dependientes del fuego y que proveen abundantes fuentes de ignición, tales como la ganadería extensiva y la agricultura migratoria de tala y quema.

4) *El punto crítico climático* se alcanza cuando la deforestación; humo; anomalías en la temperatura de la superficie del mar, tales como los eventos El Niño; y el calentamiento global en sí inhiben la precipitación a una escala regional. Este punto crítico climático se perpetúa a sí mismo al favorecer la degradación y quema del bosque que reduce la liberación de vapor de agua y aumenta las emisiones de humo a la atmósfera, ambas de las cuales suprimen la precipitación. La inhibición de la precipitación impulsada por la deforestación parece volverse más fuerte cuando la pérdida del bosque excede el 30 por ciento.

5) *La deforestación amazónica podría acelerarse en el futuro* a través de dos tendencias principales. Primero, el incremento en la demanda mundial de frijol de soya, biocombustibles y carne está aumentando la rentabilidad de la producción agrícola y ganadera en la Amazonía, mejorando a su vez los incentivos para que los agricultores y ganaderos conviertan sus reservas forestales legalmente requeridas a parcelas agrícolas y pastizales. En segundo lugar, el riesgo de incendio accidental desalienta a los propietarios a invertir en cultivos de árboles vulnerables al fuego, manejo del bosque o mejoramiento de forraje ya que refuerza la dependencia en la ganadería extensiva (con densidades bajas de pastoreo) y la agricultura de tala y quema que, a su vez, aumenta todavía más el riesgo de incendio accidental.

6) *Estas fuertes sinergias entre el bosque amazónico, las economías y el clima favorecen una muerte regresiva a gran escala de bosque en los próximos 15 a 25 años.* En un escenario de muerte regresiva, los incendios forestales son cada vez más comunes; la ganadería extensiva dependiente del fuego y la agricultura de tala y quema proveen una frontera en expansión de fuentes de ignición, y las sequías regionales son cada vez más frecuentes debido a la

disminución en la transpiración y el aumento en la producción de humo. La creciente demanda de frijol de soya, biocombustibles y carne aumenta las ganancias obtenidas de la deforestación.

7) *La degradación a gran escala del bosque amazónico podría acelerar la alteración climática global, afectando la precipitación en lugares remotos alrededor del planeta.* Las predicciones para el período entre hoy en día y el 2030 descritas en (6) liberarían 15-26 mil millones de toneladas de carbono a la atmósfera, equivalentes de 1.5 a 2.6 años de las emisiones actuales mundiales. A mayor destrucción de la selva amazónica, se anticipan cambios en la precipitación en otras partes del mundo. Algunos modelos indican que la precipitación podría declinar en la India y Centro América y que la precipitación durante la temporada de crecimiento agrícola podría disminuir en los cinturones de producción de granos de Brasil y los Estados Unidos de América.

8) *Las tendencias económicas actuales y el cambio climático a escala regional y global podrían también destruir importantes ecorregiones de la Amazonia, tales como los bosques de babaçu del Maranhão en Brasil, el bosque seco del Marañón en Perú y los bosques de neblina de Bolivia.* Dadas las tendencias actuales, muchas especies de animales, incluyendo varios primates, perderán más del 80 por ciento de su hábitat de bosque primario en las próximas décadas.

## Posibilidades de un giro completo

1) *Diversos procesos y círculos virtuosos de retroalimentación podrían prevenir que la Amazonía alcance estos puntos críticos* y lograr una base para una nueva y decidida estrategia de conservación amazónica.

2) *El círculo virtuoso de retroalimentación ecológica* es la tendencia del bosque a volver a crecer rápidamente cuando se le libera de la quema periódica. La mayoría de las tierras degradadas de la Amazonía regresarán a bosque de dosel cerrado si se les protege del fuego, recuperando las funciones de estabilización de la precipitación de los bosques primarios al cabo de 15 años. Con cada año de recuperación libre de fuego que pasa, se reduce el carácter inflamable del bosque y se incrementa la cantidad de vapor formador de nubes de lluvia que se emite a la atmósfera.

3) En el *círculo virtuoso de retroalimentación climática*, la recuperación de la producción de vapor de

agua del bosque (transpiración) a lo largo de grandes extensiones debido a la regeneración del bosque y el establecimiento de cultivos de árboles combinado con la disminución del fuego da como resultado mayor precipitación. Esto, a su vez, facilita la recuperación del bosque y ayuda a reducir la incidencia del fuego

4) *Dos círculos virtuosos de retroalimentación económica* involucran cambios en el comportamiento de los propietarios de tierras que pueden reducir la incidencia del fuego e incrementar el cumplimiento de la legislación de uso del suelo. Primero, los mercados de materias primas están requiriendo mayores estándares sociales y ambientales de los agricultores y ganaderos, quienes a su vez, están respondiendo a través de campañas para incrementar la legalidad y el desempeño socio-ambiental de sus haciendas y fincas. El cumplimiento de la ley controlado entre los mismos propietarios y una meta común de mayor acceso a los mercados lucrativos de materias primas está aumentando las inversiones en prevención del fuego, en la restauración del bosque riparios y en el cumplimiento de los requisitos para las reservas de bosques en tierras privadas. En segundo lugar, conforme los grupos de propietarios de tierras logren establecer cultivos de especies susceptibles al fuego, sistemas de manejo forestal para madera y mejores forrajes en sus tierras, utilizarán menos el fuego como una herramienta de manejo e invertirán más en su prevención. Además, estos propietarios de tierras alentarán a sus vecinos a prevenir los incendios accidentales quizá hasta que se alcance un punto de retorno más allá del cual los productores que usan el fuego se vuelvan una minoría decreciente a lo largo de paisajes enteros.

5) *El manejo sostenible forestal para madera que involucra técnicas de extracción de “impacto reducido” representa una alternativa económica importante para la agricultura y ganadería que depende de la deforestación.* Las técnicas de impacto reducido permiten que las compañías madereras extraigan la madera selectivamente con apenas un mínimo aumento de la susceptibilidad del bosque al fuego, incrementando la factibilidad de sucesivas cosechas en el futuro.

6) *Simplemente implementando las políticas y programas actuales de uso del suelo dentro de la amazonia brasileña y extendiendo estas políticas y programas a otros países amazónicos podría reducirse la deforestación a la mitad.* Por ejemplo, el programa

de Áreas Protegidas de la Región Amazónica (ARPA) y los procesos de planificación regional participativos en preparación para las inversiones en infraestructura han contribuido a la creación de 23 millones de hectáreas de áreas protegidas únicamente en 2004 y 2005 lo que ha reducido la disponibilidad de tierra en la frontera de la amazonia brasileña, disminuyendo las tasas de deforestación.

7) *Todavía hay tiempo de reducir el riesgo de una degradación forestal generalizada del bosque Amazónico y la aceleración del calentamiento global que esto estimularía.* Se deben aprovechar todas las oportunidades para gobernar la expansión de la frontera amazónica. Uno de los conceptos más prometedores para la preservación de los bosques amazónicos a gran escala, dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), es reducir las emisiones provenientes de la deforestación en bosques tropicales. Este concepto ofrece los signatarios de la CMNUCC un nuevo y poderoso incentivo para invertir en la preservación de los bosques.

## Introducción

El bosque de la Amazonía influye sobre la vida en la Tierra a través de varios procesos, muchos de los cuales aún estamos tratando de comprender plenamente. Este bosque es uno de los acondicionadores de aire más grandes del mundo, transformando la mitad de toda la energía solar que le llega por medio de la evaporación de grandes cantidades de agua del follaje y otras superficies – aproximadamente 8 millones de millones de toneladas por año (Salati y Vose 1984). La liberación de este vapor de agua a la atmósfera es crucial para la formación de nubes; cúmulos que, a su vez, sostienen al bosque con su precipitación. Pero la energía absorbida por el bosque amazónico tiene efectos que se extienden alrededor del mundo a través de enlaces llamados “teleconexiones” climáticas. Según un modelo experimental, los agricultores del cinturón de producción de granos del medio oeste de los Estados Unidos de América y el granero mundial brasileño ubicado en las planicies centrales de Suramérica podrían descubrir que la precipitación durante la temporada de crecimiento se reduce al convertirse los bosques amazónicos en pastizales ganaderos, a la vez se podrían sentir otros cambios en la precipitación en lugares tan remotos como India, el Pacífico Occidental y Centro América (Werth y Avissar 2002, Avissar *et al.* 2005). Los 7 u 8 millones de millones de toneladas de agua que fluyen a través de la desembocadura del Río Amazonas al Océano Atlántico cada año representan 15-20 por ciento de la descarga total mundial de agua dulce de río a los océanos. ¿Podrían los cambios en esta enorme descarga de agua dulce influir sobre las gigantescas corrientes oceánicas que mueven energía alrededor del planeta y ayudan a crear el clima que conocemos hoy día? Algunos científicos creen que esto es posible, pero simplemente no tenemos la respuesta.

Nuestras vidas están también conectadas al bienestar del bosque amazónico a través de su papel como sumidero de carbono- el elemento que está impulsando el calentamiento global por medio de su liberación a la atmósfera en la forma de dióxido de carbono, cuando se combina con el oxígeno a través de la quema o la respiración, o en la forma de metano, cuando se combina con el hidrógeno. Los árboles de la Amazonía contienen 90-140 mil millones de toneladas de carbono (Soares *et al.* 2006, Saatchi *et al.* 2007), equivalentes a 9-14 años de emisiones anuales globales actuales, inducidas por el hombre - calculadas para el 2007 en aproximadamente 10 mil millones de toneladas al año (Canadell *et al.* 2007). El prospecto de reducir el aceleramiento del calentamiento global y prevenir que las

temperaturas globales promedio aumenten más de 2°C será muy difícil si las emisiones de carbono de los bosques tropicales del mundo, y de la Amazonía en particular, no se reducen drásticamente en los próximos años (Gullison *et al.* 2007). Este carbono está liberándose en la Amazonía a una tasa de cerca de 0.2 a 0.3 mil millones de toneladas de carbono al año - como resultado de la conversión del bosque a pastizales ganaderos y otro tipo de agricultura solo en la porción brasileña de la Amazonía (Houghton *et al.* 2000, Fearnside 1997), y esta cantidad se puede duplicar cuando las sequías severas aumentan el riesgo de los incendios forestales (Nepstad *et al.* 1999a, Alencar *et al.* 2006). Al combinar todos los países amazónicos, las emisiones de carbono de la región podrían alcanzar 0.4 a 0.5 mil millones de toneladas al año incluso sin considerar las emisiones de los incendios forestales<sup>2</sup>.

Más allá de su papel como un gigantesco reservorio, con algunas fugas, de emisiones potenciales de gases de invernadero, el bosque amazónico aloja a uno de cada cuatro o cinco especies de mamíferos, peces, aves y árboles del mundo (Dirzo y Raven 2003). Más de 300 lenguas y dialectos se hablan entre las poblaciones humanas indígenas de la región, incluyendo varias que nunca han sido contactadas con personas del exterior.

Los ecosistemas y biodiversidad de la Amazonía podrían estar amenazados por el calentamiento global que se ha venido dando desde finales del siglo pasado a través de la substitución del bosque por vegetación tipo sabana y semi-árida inducida por el clima y conocida como “muerte regresiva” de la selva Amazónica (Cox *et al.* 2000, 2004, Nobre *et al.* 1991, Oyama y Nobre 2003). Sin embargo, estas simulaciones de clima y vegetación no incluyen cambios en el uso del suelo o los efectos sinérgicos del cambio del uso del suelo y del cambio climático regional a corto plazo sobre el régimen de fuego de la Amazonía. ¿Podrían la creciente substitución del bosque y las actividades económicas dañinas al bosque interactuar con el cambio climático regional para reemplazar o degradar una gran porción del sistema forestal amazónico en las próximas dos décadas? ¿Cuál sería el impacto regional y global del reemplazo forestal a gran escala por agricultura y ganadería combinado con la degradación del bosque a manos de la tala, fuego y sequía? ¿Cuáles tendencias podrían contrarrestar y prevenir la muerte regresiva del bosque que se avecina en el horizonte? Estas preguntas son el enfoque de este informe. El mismo analiza las

<sup>2</sup> Estimados no publicados descritos en un informe separado de WWF sobre ganadería y agricultura en la Amazonía.

evidencias actuales de los “puntos críticos” en los sistemas ecológicos y climáticos amazónicos y describe algunos de los procesos que podrían ayudar al mundo a evitarlos.

## Sequía, fuego y el punto crítico ecológico

La mayor parte de los bosques de la Amazonía son altamente resistentes a la quema. Derrame algo de kerosén en las hojas y ramas secas del sustrato forestal durante el pico de la temporada seca, enciéndale fuego y observe el fuego apagarse. Esta alta resistencia al fuego la entienden bien los propietarios de tierras de la Amazonía, quienes queman sus campos y pastizales con impunidad ya que saben que el bosque que les rodea actuará como un rompe-fuegos gigante, sofocando el fuego si se escapa (Nepstad *et al.* 1999b). En 1985, aprendimos que el bosque amazónico ha sucumbido al fuego en el pasado. Robert “Buck” Sanford y sus colaboradores presentaron las edades de fragmentos de carbón encontrados en los suelos de varios bosques amazónicos fechados de hasta 6,000 años atrás (Sanford *et al.* 1985). La antropóloga Betty Meggers amplió este importante hallazgo con más datos sobre el carbón y otras líneas de evidencia indicando que grandes áreas de la selva amazónica se han quemado a intervalos de 400 a 700 años en los dos últimos milenios, y que estos fuegos aparentemente han estado asociados con episodios de sequía severos (Meggers 1992). Hoy día, la Amazonía enfrenta mucho mayores impulsores climáticos de episodios de sequía severa superpuestos con las transformaciones humanas de la vegetación amazónica.

Durante la última mitad del siglo, una de las principales transformaciones ecológicas de la región amazónica ha sido el acortamiento del período entre incendios forestales con la transformación del paisaje forestal a

---

<sup>3</sup> El “punto crítico” se refiere al momento en el cual una tendencia o comportamiento social cruza un umbral y de repente comienza a dispersarse rápidamente (Grodzins 1958, Schelling 1971, Granovetter 1978). Este concepto ha sido comúnmente usado en epidemiología para describir la diseminación de una enfermedad, en base al concepto que los cambios pequeños tendrán un efecto mínimo o nulo en el sistema hasta que se alcance una masa crítica, en ese momento un pequeño cambio “inclina” el sistema y se observa un efecto mayor. Un concepto similar de resistencia ha sido desarrollado para describir la capacidad del sistema para tolerar los disturbios sin colapsar a un estado cualitativamente distinto controlado por un conjunto diferente de procesos (Holling 1973, Gunderson y Holling 2002, Gunderson *et al.* 2002).

manos del hombre. En lugar de siglos entre cada evento, algunos bosques están quemándose cada 5 a 15 años (Cochrane *et al.* 1999, Alencar *et al.* 2006). Y con cada nueva quema, el bosque se vuelve más susceptible a quemas subsecuentes. *El punto crítico ecológico del bosque amazónico se alcanza cuando este se vuelve tan inflamable que la quema periódica frecuente es virtualmente inevitable.* Para comprender este punto crítico ecológico, debemos comprender el secreto de la extraordinaria resistencia al fuego del bosque amazónico y cómo las perturbaciones pueden disminuir esta resistencia. Para quemarse, la capa de combustible del bosque amazónico – las hojas muertas y ramas sobre el sustrato – debe estar suficientemente seca para tomar fuego. Este nivel de sequedad es muy raro en bosques tropicales altos y maduros debido al alto nivel de humedad del aire. Durante la mayoría de las noches del año, aun después de varias semanas consecutivas sin precipitación, la humedad es tan alta que el aire se satura de humedad al enfriarse y la fina capa de combustible absorbe parte de esta humedad. Siempre y cuando la capa de combustible esté bajo la sombra del denso follaje a 30-45 metros arriba del suelo, rara vez se seca lo suficiente para tomar fuego (Uhl y Kaufman 1990).

Y aquí yace el problema. En grandes porciones de la Cuenca Amazónica, la tala selectiva descuidada, la sequía y el fuego en sí están raleando el dosel forestal, permitiendo que más y más luz solar penetre a la fina capa de combustible del sustrato forestal. Los árboles que mueren o son removidos por los madereros (Nepstad *et al.* 1999a, Asner *et al.* 2005), los árboles que mueren por la sequía y los árboles que mueren por el fuego abren el dosel forestal a los poderosos rayos del sol ecuatorial, secando la fina capa de combustible sobre el suelo. Y a mayor luz solar en el interior del bosque, las plantas que demandan luz y que aumentan más el carácter inflamable del bosque pueden establecerse. Aunque todavía son raros en la Amazonía, los pastos, helechos y bambúes altamente inflamables pueden establecerse en el sotobosque, aumentando considerablemente la susceptibilidad al fuego. Cuando estos bosques dañados toman fuego, mueren más árboles y la invasión de pastos, helechos y bambúes continúa en un ciclo vicioso de retroalimentación (Figura 1).

La muerte de árboles a gran escala por sequía es un evento sorprendentemente raro, pero es crítico comprender cómo los cambios pequeños en la precipitación pueden empujar grandes extensiones del bosque amazónico más allá de sus puntos críticos ecológicos. Uno de los grandes misterios ecológicos del bosque



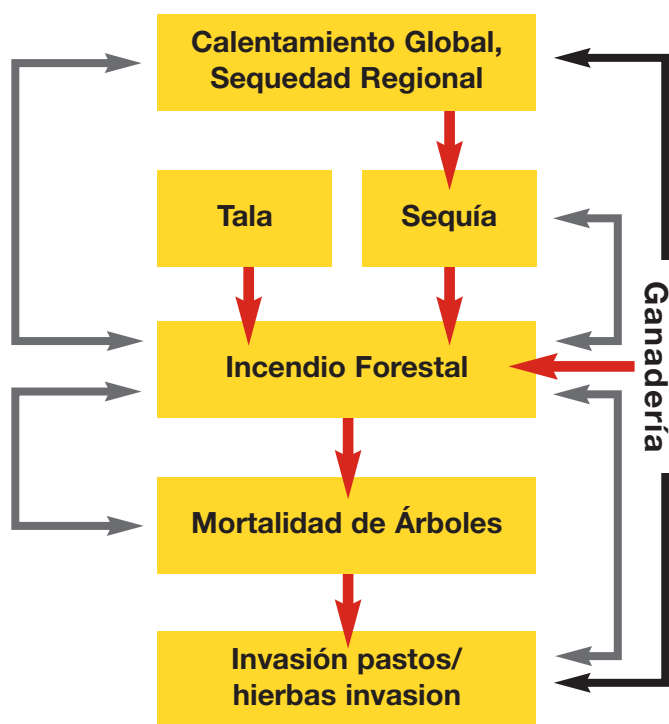


Figura 1: Diagrama de los procesos e interacciones que empujan al bosque amazónico más allá de sus “puntos críticos” ecológicos. Este punto crítico se alcanza cuando los organismos dominantes del bosque – sus gigantes árboles de dosel mueren por el fuego, sequía o tala, dando lugar a una densa e inflamable vegetación en el sotobosque. Aunque aún ocurre solo raramente en la Amazonía, este proceso de degradación forestal causado por el hombre puede ser exacerbado a través de la invasión de pastos, helechos y bambúes altamente inflamables y de alto contenido de combustible.

amazónico es su habilidad de soportar sequías severas estacionales sin signos visibles de estrés por sequía. De hecho, algunos investigadores han reportado evidencia satelital de un “reverdecimiento” temprano en la época seca del dosel forestal de la Amazonía [Saleska *et al.* 2007, Myneni *et al.* 2006], a pesar que las mediciones de campo para este fenómeno son débiles. Casi la mitad de los bosques de la Amazonía están expuestos a una sequía estacional de 3 a 5 meses de duración cuando la precipitación mensual total es de 0 a 3 centímetros (Nepstad *et al.* 1994, 2004)<sup>4</sup>. Lentamente, estamos aprendiendo que estos ecosistemas extraordinarios han evolucionado mecanismos para mantener doseles de follaje verde y exuberante a través de períodos con poca precipitación. La adaptación más importante parece ser el sistema radicular profundo (>10 m) de muchos de los árboles de la selva amazónica lo cual les permite absorber el agua almacenada en el suelo profundo al agotarse gradualmente la humedad del

<sup>4</sup> La selva amazónica pierde por evapotranspiración (evaporación más transpiración) cerca de 12 cm de agua al mes durante la época seca.

suelo superficial durante los períodos de poca precipitación (Nepstad *et al.* 1994; 2004; 2007, Bruno *et al.* 2006; Hodnett *et al.* 1995). Durante la época seca, 75 por ciento del agua liberada a la atmósfera a través de la “transpiración” de las hojas es absorbida a más de 2m de profundidad del suelo (Nepstad *et al.* 1994). Más recientemente se ha descubierto que los árboles de la Amazonía absorben sustanciales cantidades de humedad del rocío que se condensa en sus hojas durante la época seca (Cardinot 2007).

Sin embargo, la tolerancia a la sequía del bosque amazónico tiene sus límites, y es al comprender estos límites que comenzamos a darnos cuenta de cuán cerca están estos ecosistemas del punto crítico. Un experimento de siete años se llevó a cabo recientemente para identificar el nivel de estrés de sequía más allá del cual el bosque amazónico comienza a “desarticularse” por la mortalidad de los árboles. La precipitación se redujo en un tercio durante cinco años consecutivos en una parcela de una hectárea de bosque utilizando 5,600 paneles plásticos colocados sobre el suelo (Nepstad *et al.* 2002). Durante el tercer año del experimento, se alcanzó un umbral de sequía. Los gigantes árboles del dosel comenzaron a morir al irse quedando sin agua en los 11 metros superiores de suelo (Nepstad *et al.* 2007). Los árboles que representaban el 10 por ciento del peso total de todos los árboles del bosque murieron en el curso de un solo año. Parece que incluso estos extraordinarios árboles gigantes de profundas raíces sucumben a las sequías y mueren si no pueden absorber suficiente agua del suelo para suplir sus hojas con nueva agua que reemplace la que pierden por transpiración. El evento El Niño de 1997-1998 puede haber empujado a casi un tercio del bosque amazónico cerca de este umbral de sequía que induce a la muerte<sup>5</sup> (Nepstad *et al.* 2004, Figura 2), a pesar que se tienen disponibles pocas mediciones de campo para saber exactamente cuán extenso fue el daño. En la zona central de la Amazonía, la mortalidad de árboles incrementó en un 50 por ciento después de esta sequía (Williamson *et al.* 2000). Durante este mismo evento El Niño, los bosques tropicales lluviosos alrededor del mundo sufrieron altos niveles de mortalidad de árboles (Nakagawa *et al.* 2000, van Nieuwstadt y Shiel 2005).

La muerte inducida por la sequía de los organismos dominantes del bosque amazónico -sus árboles del

<sup>5</sup> Los eventos El Niño están asociados con sequías severas en Amazonia, Kalimantan, y varios otros lugares alrededor de las zonas tropicales, pero se asocian con una precipitación más alta en algunas otras regiones.

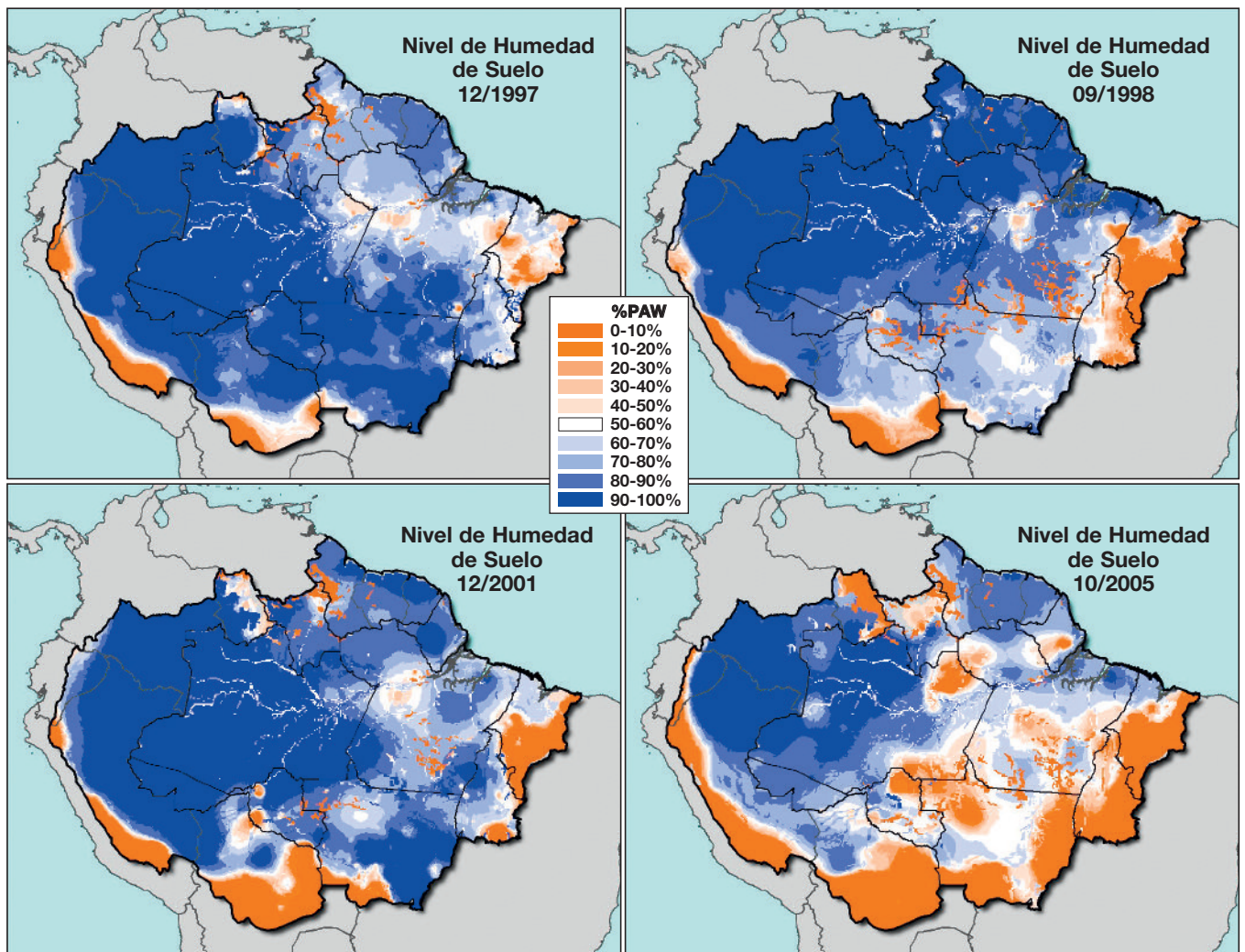


Figura 2. Mapa de niveles de humedad del suelo en la Amazonía durante cuatro periodos de sequía severa. Este mapa es un estimado del porcentaje máximo, de agua disponible para las plantas (PAW) a 10 m de profundidad en base a la precipitación mensual acumulativa y evapotranspiración, actualizado de Nepstad *et al.* 2004. Los estudios de campo indican que la mortalidad de árboles inducida por la sequía comienza cuando el PAW se reduce a 30 por ciento de su valor máximo (Nepstad *et al.* 2007), mostrado aquí en color crema a café. La pérdida de la humedad del suelo está sobreestimada en los Andes debido a falta de datos y errores de interpolación.

dosel- puede incrementar la susceptibilidad al fuego durante muchos años después (Ray *et al.* 2005, Brando *et al.* en imprenta). Lo anterior es cierto ya que las copas de los árboles siempre verdes del dosel de la Amazonía, que protegen al bosque del intenso sol ecuatorial como una gigantesca sombrilla de playa, toman muchos años para reemplazarse. El dosel de la selva amazónica madura, que se eleva a una altura de 45 metros o más sobre el suelo, separa el intenso calor del dosel, en donde se intercepta la mayor parte de la energía solar que llega hasta el bosque, del sustrato forestal oscuro y húmedo mucho más abajo. Cada árbol del dosel que muere crea un “vacío” en el dosel a través del cual la luz solar penetra al bosque calentando el interior del bosque. El calentamiento y secado del sustrato forestal es el principal factor determinante del carácter inflamable del bosque, y es mucho mayor cuando el dosel es ralo o está muy cerca del suelo (Ray *et al.* 2005).

Aunque la ignición provocada por los rayos es rara en los bosques centrales de la Amazonía, las fuentes humanas de ignición son crecientemente abundantes. Las quemadas para limpiar bosques talados y prepararlos para la agricultura o pastos o para mejorar el forraje, frecuentemente se escapan más allá de los límites planeados y se dispersan a los bosques cercanos. Durante la sequía severa de 1998 aproximadamente 39,000 km<sup>2</sup> de bosque en pie se quemaron en la Amazonía brasileña (Alencar *et al.* 2006), lo cual constituye el doble del área de bosque que fue talada ese año. Durante la sequía severa del 2005 (Aragão *et al.* 2007), se quemaron por lo menos 3,000 km<sup>2</sup> de bosque en pie en las regiones de Madre de Dios, Pando y Acre de la Amazonía suroeste (Brown *et al.* 2006). Estos incendios bajos y de lento movimiento pueden ser engañosamente destructivos, matando entre 7 y 50 por ciento de los árboles adultos (>10 cm diámetro) (Alencar *et al.*

2006, Balch *et al.* sometido a publicación, Barlow y Peres 2004, Cochrane y Schulze 1999). Los incendios forestales por lo tanto aumentan la susceptibilidad a mayores quemas en un círculo vicioso de retroalimentación que mata los árboles, abriendo el dosel y aumentando la penetración de la luz solar al sotobosque (Nepstad *et al.* 1995, 1999, 2001, Cochrane *et al.* 1999). La tala selectiva, que puede dañar hasta el 50 por ciento del dosel (Uhl y Vieira 1989) es el tercer tipo de perturbación principal que aumenta la susceptibilidad al fuego (Uhl y Kauffman 1990, Holdsworth y Uhl 1997, Ray *et al.* 2005).

Los bosques empujados más allá del punto crítico por la mortalidad de los árboles inducida por la sequía, fuego y/o tala selectiva son vulnerables a transformarse en “matorrales” o “arbustos” inflamables (Figura 1). Las observaciones de campo al noreste del Mato Grosso, los estados del sureste y este de Pará y cerca de Santarém han encontrado que esta vegetación vulnerable al fuego dominada por especies invasoras de árboles de rápido crecimiento (tales como *Solanum crinitum* y *Vismia guianensis*), y a veces, pastos (incluyendo *Imperata brasiliensis*, *Paspalum* spp.), bambú (*Guandu* spp.) y helechos (como *Pteridium aquilinum*) (Nepstad D, datos no publicados). Aunque todavía ocurren raramente, los bosques invadidos por pastos pueden ser los más susceptibles a la degradación debido a las grandes cantidades de combustible producido por muchos pastos y por su efecto inhibitorio sobre la regeneración de los árboles (Nepstad *et al.* 1996). En el sureste de Asia, una sola especie de pasto (*Imperata cylindrica*) domina ahora cerca de 300,000 km<sup>2</sup> de tierras que antes sostenían bosque de dosel cerrado (McDonald 2004).

Existen importantes vacíos en nuestra comprensión del proceso de degradación de la Amazonía. Los bosques que crecen en suelos con pocos nutrientes, tales como los que crecen en arenas blancas, a menudo desarrollan densas capas de raíces sobre el suelo mineral (Kauffman *et al.* 1988), y pueden ser particularmente vulnerables a la mortalidad de árboles inducida por el fuego ya que éste puede matar una porción sustancial del sistema radicular.

El punto crítico ecológico del bosque amazónico varía de lugar en lugar, pero algunos patrones generales comienzan a aparecer. Los bosques son más susceptibles de degradarse cuando (a) se inducen altos niveles de mortalidad de árboles por sequía, fuego o tala; (b) semillas o esporas de pastos, helechos o bambúes de alto contenido de combustible se vuelven abundantes

después de la muerte de los árboles; (c) las fuentes de ignición están presentes, y (d) el bosque es sujeto a sequía severa estacional o episódica. La porción de la Amazonía que se expone a episodios severos de sequía es grande (Figura 2) y podría expandirse en el futuro debido a los cambios climáticos inducidos por el ser humano y la deforestación sin control y el cambio en el uso del suelo.

## Deforestación, humo, calentamiento global y el punto crítico climático

Por más de dos décadas, varios equipos de científicos han estado usando modelos de computación para predecir la futura relación entre la Amazonía y el clima. ¿Cómo cambiará el clima de la Amazonía al acumularse los gases de invernadero en la atmósfera, al reemplazarse los bosques con pastizales o al hacerse más frecuentes los eventos El Niño?. Ninguno de estos esfuerzos de modelamiento es perfecto, pero proveen algunos mensajes consistentes. Parece ser que la Amazonía se dirige hacia un futuro más seco y más calido, con las mayores reducciones en precipitación predichas para la época seca y durante los eventos El Niño, cuando la vegetación es más sensible a las reducciones en precipitación. La deforestación también inhibe la precipitación y aumenta la temperatura, mientras que el humo denso puede extender la época seca por varias semanas. En otras palabras, las tendencias futuras en el clima de la Amazonía podrían muy bien exacerbar la degradación del bosque que ya está ocurriendo.

La creciente concentración de dióxido de carbono, metano y otros gases que atrapan calor en la atmósfera ha sido el centro de varios “experimentos” de modelos de computación realizados utilizando modelos de circulación global (GCMs). Estos modelos pueden simular el clima futuro alrededor del mundo y su respuesta al creciente forzamiento radiactivo de la atmósfera que se asocia con la acumulación de gases que atrapan calor. Más del 60 por ciento de los 23 modelos de circulación global que se corrieron bajo escenarios de acumulación de gases que atrapan calor predijeron una reducción sustancial (>20 por ciento) de la precipitación en la Amazonía oriental para finales del siglo (IPCC 2007, Malhi *et al.* en imprenta, Figura 3). Estos modelos predicen un aumento en la precipitación en la Amazonía occidental, en donde las lluvias asociadas con la elevación forzada por los Andes podrían incrementar debido a la mayor humedad del aire que se asocia con el calentamiento. El calentamiento global por sí mismo probablemente reduzca la precipitación en la Amazonía oriental.

En reconocimiento al importante papel que la vegetación tiene sobre el clima, algunos equipos de modelación han acoplado “modelos dinámicos de vegetación” a sus GCMs en un esfuerzo por simular cómo el cambio climático afectará la localización de los diferentes tipos de vegetación y cómo estos cambios en vegetación, a su vez, afectarán el clima. Uno de los resultados más dramáticos se obtuvo del Centro Hadley del Reino Unido, el cual predijo una sustitución estable a gran escala del bosque de lluvia amazónico por vegetación semi-árida y tipo sabana para el final del siglo y un aumento de 8°C en la temperatura promedio (Cox *et al.* 2000, 2004). Otros grupos de modelación han encontrado evidencia similar de un nuevo estado estable de vegetación y clima en la Amazonía donde la mayor parte de la porción oriental del bosque es reemplazada por vegetación resistente a la sequía (Salazar *et al.* 2007, Oyama y Nobre 2003, Botta y Foley 2002). Varios modelos acoplados de clima y vegetación, sin embargo, no predicen esta muerte regresiva a gran escala de la selva amazónica (Friedlingstein *et al.* 2003, Gullison *et al.* 2007). El calentamiento global podría conducir al desplazamiento de

grandes áreas del bosque del oriente y centro de la Amazonía, reforzando una tendencia a la desecación.

Varios experimentos de modelos climáticos experimentales que involucran el completo reemplazo de la selva amazónica con pastizales ganaderos indican grandes reducciones en la precipitación y mayores temperaturas (Nobre *et al.* 1991, Shukla y Nobre 1990, Lean y Warrilow 1993). Dos equipos de modelación climática (Sampaio *et al.* 2007 y da Silva *et al.* 2007), utilizando sistemas de modelación de alta resolución han simulado el clima amazónico futuro utilizando simulaciones modeladas de deforestación futura (Soares *et al.* 2006). Da Silva *et al.* (2007), utilizando un sistema de modelación de alta resolución, encontró que el desbosque puede exacerbar la tendencia a la desecación de la Amazonía que es un resultado probable del calentamiento global, especialmente durante los eventos El Niño, aunque la reducción absoluta de la precipitación es algo menor que la predicha por los GCMs. Sampaio *et al.* (2007) también encontró evidencia de mayor inhibición de la precipitación por la creciente frontera de la deforestación. Si los frijoles de soya son los impulsores de la deforestación en lugar de los pastizales ganaderos, las reducciones en la precipitación

podrían ser mucho más altas (Sampaio *et al.* 2007, Costa *et al.* 2007). La deforestación por sí sola inhibe la precipitación, particularmente cuando afecta el 30 por ciento o más de la cobertura forestal.

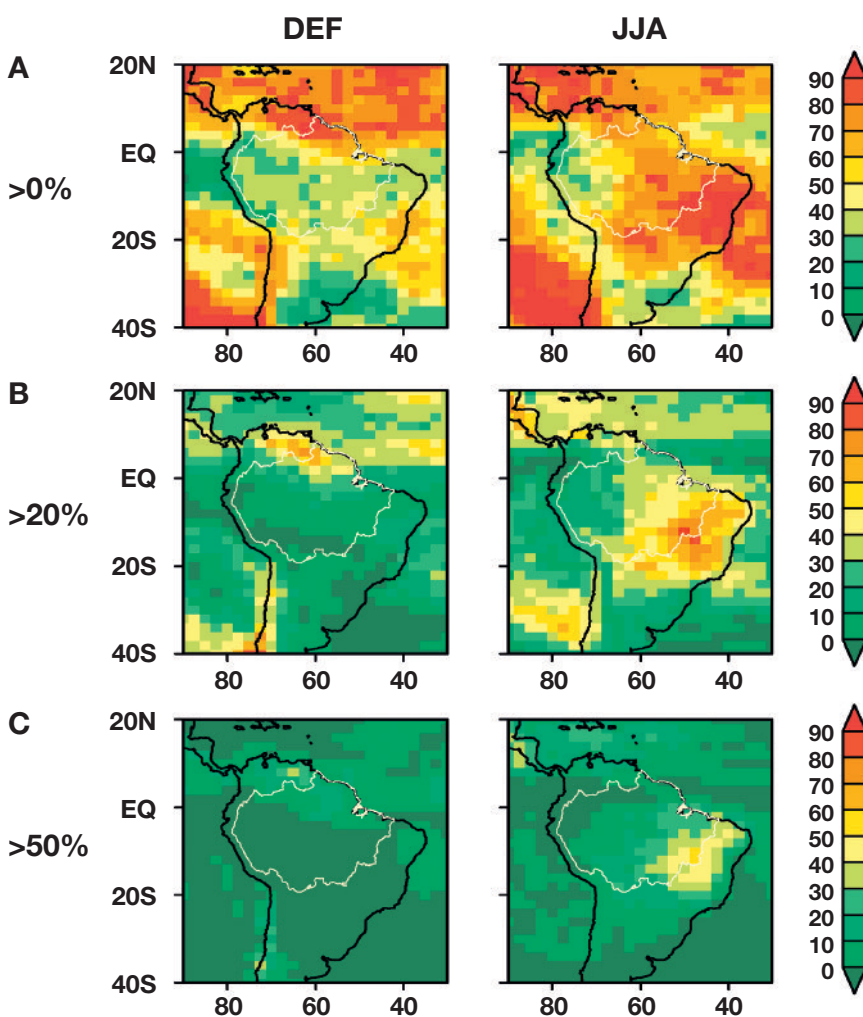


Figura 3. La mayoría de los modelos climáticos predicen una desecación sustancial (>20 por ciento) de la Amazonía oriental para el fin del siglo. Estos mapas resumen los resultados de 23 modelos globales de circulación corrientes para el escenario moderado del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de acumulación de gases de efecto invernadero para el fin del siglo. La barra a la derecha provee el esquema de color para el porcentaje de estos modelos que predicen aumento de sequía en la Amazonía para el fin del siglo, incluyendo cualquier aumento en sequía (A), al menos un 20 por ciento de aumento en sequía (B) y al menos un 50 por ciento de aumento en sequía (C). Las predicciones son para la época seca en el norte de la Amazonía (diciembre, enero y febrero, a la izquierda) y en el sur de la Amazonía (junio, julio, agosto, a la derecha) (Malhi et al. en imprenta).

Los modelos GCM también predicen que el calentamiento global traerá mayores temperaturas del aire a la región amazónica, la mayoría de las predicciones andan alrededor de un aumento de 2°C en la temperatura promedio del aire, pero hay algunas predicciones tan altas como 8°C (IPCC 2007). Las temperaturas más altas evaporarán el agua más rápidamente, exacerbando la tendencia de desecación asociada con menor precipitación.

La distribución de la precipitación a través del tiempo probablemente cambie en la Amazonía al intensificarse el calentamiento global. La mayor reducción en la precipitación probablemente será en la época seca (Figura 3), cuando la mayor parte de la lluvia se debe al aire húmedo que se eleva de la tierra. La vegetación es más sensible al déficit de agua durante la época seca. Con mayor energía y humedad en la atmósfera, los eventos climáticos extremos probablemente se volverán más comunes, con mayor frecuencia de eventos de lluvia torrencial y fuertes vientos (IPCC 2007), conduciendo a mayores disturbios en la Amazonía.

Los modelos acoplados de clima y vegetación son instrumentos limitados en la búsqueda de la comprensión del futuro de la Amazonía en un mundo rápidamente cambiante que proveen un importante vistazo dentro del clima de final del siglo. Es importante examinar los cambios en el clima de la Amazonía que ya están ocurriendo y que podrían determinar el tipo de bosques que existirán en la región en los próximos 10-30 años. Las sequías episódicas que están ocurriendo en la Amazonía podrían bastar para promover la conversión a arbustos a gran escala de los bosques de la región.

Las oscilaciones actuales en el clima amazónico generalmente están asociadas a cambios en la temperatura superficial del mar. La temperatura de la superficie del océano determina dónde en el planeta se elevará el aire húmedo y tibio, produciendo precipitación, y dónde el aire más fresco descenderá, inhibiendo la precipitación. La precipitación tiende a declinar en la Amazonía oriental cuando las temperaturas de la superficie del mar se elevan a lo largo de la costa Pacífica del norte de Sur América durante los eventos El Niño (Marengo *et al.* en imprenta). El calentamiento de la superficie del mar entre África occidental y el Golfo de México – denominada Anomalía del Atlántico Norte Tropical - NTAA) – está también asociado con sequía en la Cuenca del Amazonas, pero con el mayor efecto en la Amazonía occidental (Marengo *et al.* en imprenta). Algunos climatólogos creen que estas anomalías en la temperatura del mar se harán más frecuentes al aumentar la acumulación de los gases de efecto invernadero en la

atmósfera (Timmerman *et al.* 1999, Hansen *et al.* 2006, Trenbarth y Hoar 1997).

Los análisis climáticos regionales y los modelos han encontrado evidencia de más cambios localizados en la precipitación asociados con la tala del bosque, incluyendo evidencia que se da un incremento inicial en precipitación cuando la tala del bosque afecta solo a una pequeña porción del paisaje forestal que es seguida luego de una reducción en la precipitación al ir aumentando el área afectada por la tala (Dias *et al.* 2002, da Silva y Avissar 2007).

Uno de los descubrimientos más importantes en ayudarnos a comprender la posibilidad de alcanzar un punto crítico climático es la inhibición de la precipitación a causa de las nubes (Andreae *et al.* 2002). Cuando las partículas en aerosol provenientes de la quema de biomasa se vuelven muy densas en la atmósfera, se da un exceso de núcleos de condensación y las gotas de agua individuales no logran llegar a ser lo suficientemente pesadas para caer al suelo como lluvia. La comunidad científica aun no sabe cuan importante es este fenómeno para influenciar la cantidad total de precipitación, pero existe evidencia anecdótica que esta inhibición de precipitación está ya afectando a los agricultores y ganaderos. Los pilotos y agricultores en las cabeceras del Xingu en la región del Mato Grosso manifiestan que la estación lluviosa comienza más tarde en el año cuando la densidad del humo es alta (J. Carter, comunicación personal). El humo denso puede inhibir el inicio de la época de lluvia durante varias semanas.

## **Nuevas presiones para deforestar podrían acelerar la muerte regresiva**

Varias tendencias en la agricultura, ganadería y mercados de materia prima podrían acelerar la tasa de deforestación en la Amazonía y con ello la posibilidad de una muerte regresiva del bosque al corto plazo. En primer lugar, grandes extensiones al sur y este de la Amazonía han logrado erradicar la fiebre aftosa, abriendo la industria ganadera de la región a la exportación de carne de la Amazonía, a menudo a precios más altos (Kaimowitz *et al.* 2004, Nepstad *et al.* 2006a, Arima *et al.* 2006). Latinoamérica está tratando de erradicar completamente la fiebre aftosa de la región (PAHO 2004), lo cual fortalecería aun más la ganadería. En segundo lugar, la creciente demanda internacional de materias primas agroindustriales como el frijol de soya, colisiona con la escasez de tierra apropiada para la expansión agroindustrial en los Estados Unidos de América,

Europa Occidental, China y muchos otros países agrícolas (Nepstad y Stickler en imprenta). Como resultado, la mayor parte del reciente incremento global en la expansión de tierra agrícola está ocurriendo en las regiones brasileñas del Cerrado y la Amazonía, en donde más de 1,000,000 km<sup>2</sup> de tierra apropiada para la expansión agroindustrial está aun disponible para la expansión de la producción mecanizada (Shean 2004,

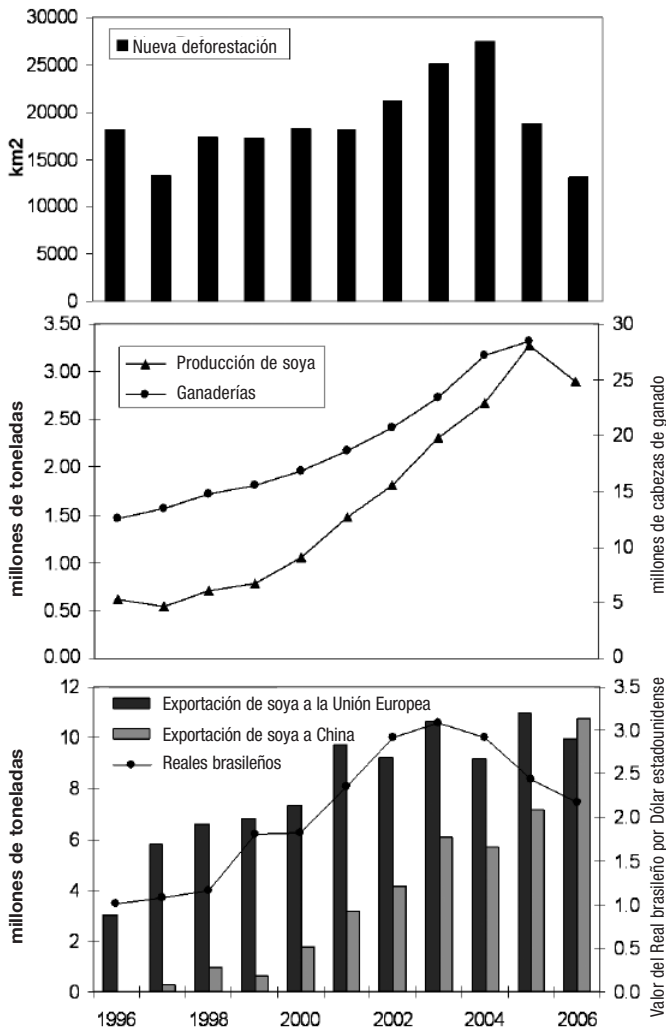


Figura 4. Tendencias recientes de deforestación en la Amazonía brasileña, la expansión de la ganadería en la Amazonía, la producción de soja en la Amazonía, el valor de la moneda brasileña (Real) contra el dólar estadounidense, y las exportaciones brasileñas de soja a la Unión Europea y China. La creciente demanda internacional de frijol de soja y otras materias primas agrícolas está empujando nuevas parcelas agrícolas hacia la Amazonía, desplazando la ganadería hacia el núcleo de la región. Nuevas demandas de biocombustibles podrían exacerbar esta tendencia. La reciente reducción en la deforestación se ha asociado con la caída del precio del frijol de soja, ganado y el fortalecimiento del Real Brasileño, pero podría también haber resultado de las nuevas áreas protegidas creadas a través del programa ARPA y de la mayor inversión gubernamental en el cumplimiento de la legislación de la tierra (actualizado de Nepstad *et al.* 2006). Los estimados iniciales de la deforestación del 2007 indican mayor deforestación, quizás como un reflejo de los precios más altos de la soja y la carne.

Nepstad *et al.* 2006a, Figura 4). En tercer lugar, el aumento en el precio del petróleo ha impulsado nuevas iniciativas de políticas nacionales en los Estados Unidos de América, la Unión Europea y Brasil que presentan la expansión del biocombustible como sustituto para la gasolina y el diesel (Yacobucci y Schnepf 2007). El etanol proveniente de la caña de azúcar brasileña suplirá la mayor parte de la creciente demanda global de etanol dado que es una de las formas de etanol más eficientes y baratas del mundo (Pimentel y Patzek 2005, World Watch 2006, Xavier 2007), y tiene el mayor potencial para expandir la producción. Aunque la mayor parte de la expansión de la producción de caña de azúcar será en la parte sur y centro del Brasil, afectará la Amazonía indirectamente al desplazar la producción de frijol de soja y la ganadería. Finalmente, los programas de cruce de cultivos principalmente en Brasil (Cattaneo, en imprenta) han dado como resultado variedades de soja y otros cultivos tolerantes a las altas temperaturas y humedad de la región amazónica. La combinación de estos y otros factores da como resultado mayores presiones económicas para convertir la selva amazónica en tierra agrícola y de pastoreo, mayores fuentes de ignición y plantas invasoras para bosques inflamables a lo largo de la región. Significa también que la inhibición de la precipitación impulsada por la deforestación a través del humo y a través de cambios en la cobertura del suelo podría ocurrir más rápidamente que las tendencias actuales.

Otro cambio importante que está ocurriendo en la Amazonía y que favorecerá la aceleración de la tala del bosque, incluyendo la penetración hasta el núcleo de la región, es la pavimentación y construcción de carreteras transitables en toda estación del año hasta regiones que previamente se consideraban “pasivamente” protegidas por su carácter remoto (Nepstad *et al.* 2000, 2001, 2002, Alves *et al.* 2003, Figura 5). Las inversiones en carreteras disminuyen el costo de transportar los insumos hasta la frontera agrícola, y los productos hasta los mercados, y por lo tanto aumenta la rentabilidad de la producción agrícola y ganadera orientada hacia el mercado. Las “hidrovías” están siendo discutidas, particularmente a lo largo del Río Madeira en donde se utilizarían dos nuevos reservorios hidroeléctricos para facilitar el transporte de barcas hasta Bolivia así como para generar energía. Con la pavimentación de la carretera interoceánica desde Assis en Brasil hasta Cuzco, y la inminente pavimentación de la carretera BR319 de Manaus a Porto Velho, y la carretera BR163 de Santarém a Cuiabá, el costo del transporte se reducirá drásticamente a lo largo de grandes extensiones en la Amazonía aumentando la posibilidad de un punto crítico económico.

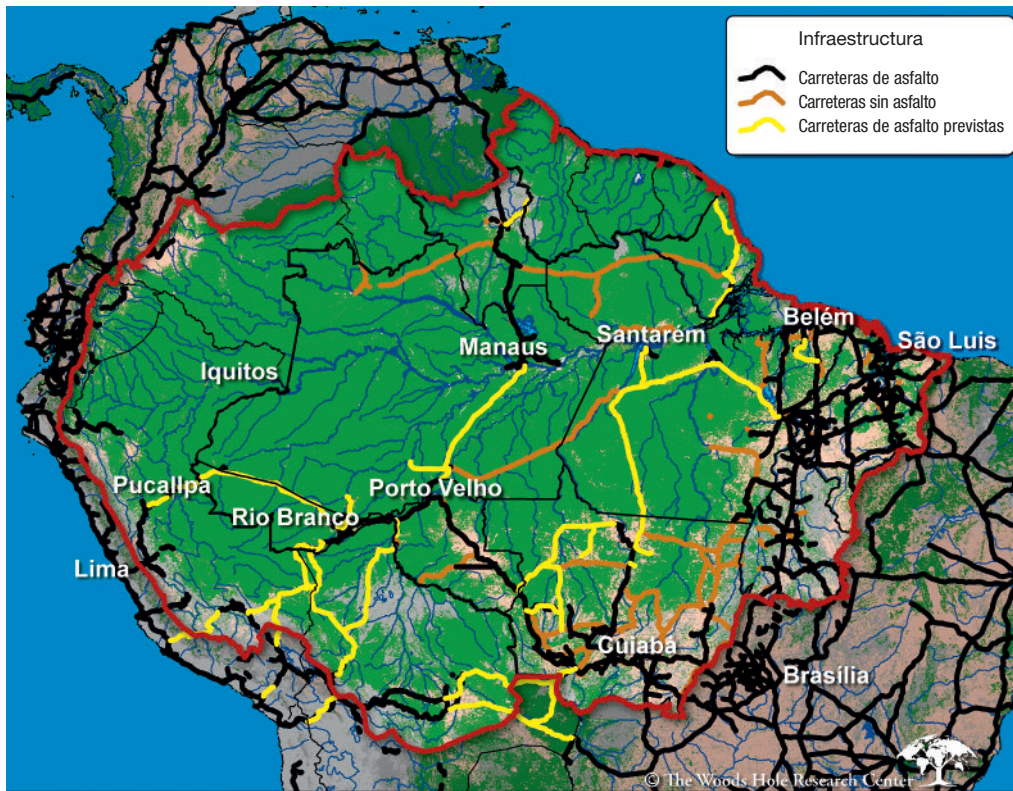


Figura 5. Carreteras amazónicas. El núcleo de la región amazónica pronto será accesible a través de carreteras utilizables durante todas las estaciones del año (amarillo) conforme se desarrollen los programas de pavimentación. Estas inversiones en transporte disminuirán los costos de la ganadería y la agricultura, potencialmente estimulando la deforestación

## ¿Avanzando hacia una muerte regresiva?

Diversas fuerzas están empujando la selva amazónica hacia una muerte regresiva al corto plazo. Las cuadrillas madereras están extendiendo su red de caminos cada vez más profundamente hacia el interior del núcleo de la selva amazónica, extrayendo solo una porción de la madera del bosque, pero raleando el dosel considerablemente por el daño colateral a los árboles que quedan en el bosque. Tras los madereros llegan los ganaderos quienes envían sus cuadrillas de motosierras a talar el bosque en preparación para las parcelas de pastoreo, capitalizando a través de la venta de su tierra a los cultivadores de soya. Con la semilla de sus pastos africanos llegan las especies invasoras de hierbas perniciosas que se regaron en el paisaje, invadiendo a veces los bosques dañados por la tala y el fuego. Las sequías severas periódicas asociadas con los eventos El Niño y la Anomalía del Atlántico Norte Tropical (NTAA) desecan grandes fracciones de los bosques de la región aumentando la susceptibilidad al fuego que se escapa de las parcelas agrícolas y los pastizales ganaderos, dañando aun más el bosque por medio de la mortalidad de los árboles. Densas capas de humo pueden extender la época seca por varias semanas, aumentando el área del bosque que se quema por los fuegos que se escapan de control, como se explicó anteriormente.

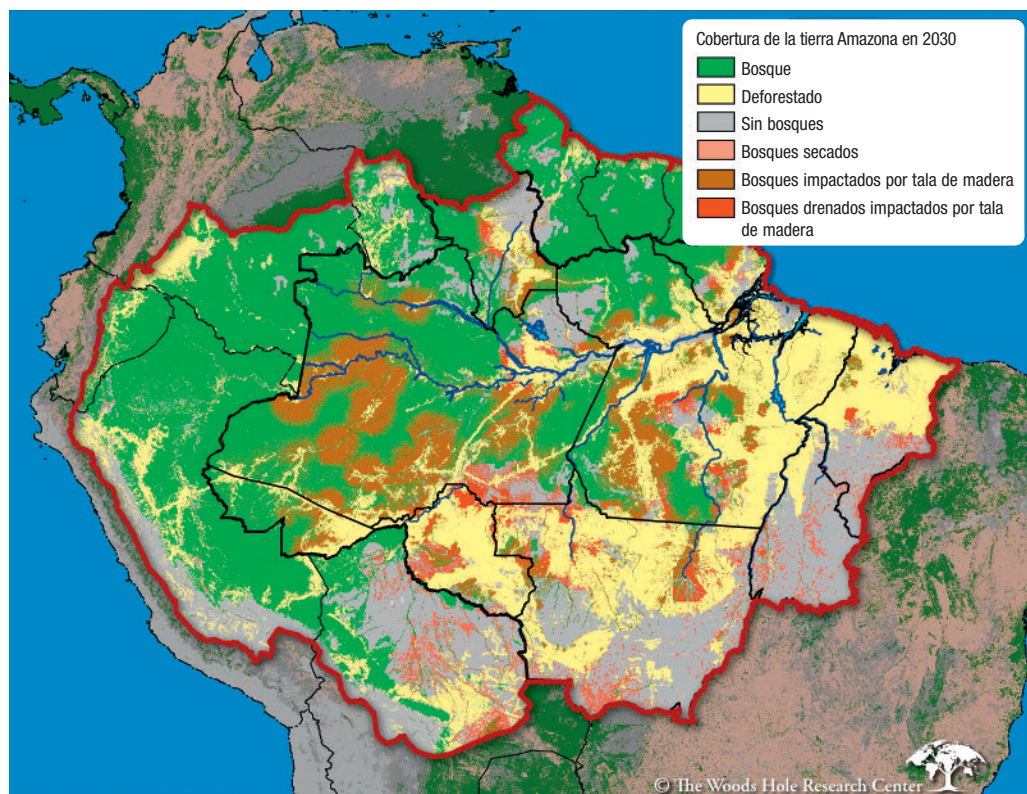
¿Cuánto tiempo queda para prevenir una muerte regresiva

a gran escala de la selva amazónica? ¿Cuánto tomará para que los procesos sinérgicos de degradación del bosque, inhibición de la precipitación y deforestación reclamen la mitad del bosque?

Este informe presenta una evaluación preliminar del potencial de una muerte regresiva del bosque a corto plazo y sus consecuencias ecológicas (Figura 6)<sup>6</sup>. Este estimado es conservador ya que asume que las tasas de deforestación serán similares a las observadas durante el período 1998-2003 (Soares *et al.* 2006), asume que el clima de los últimos 10 años se repite a sí mismo en el futuro, no incluye la inhibición de la precipitación a causa del humo, ni tampoco considera la inhibición de la precipitación inducida por la deforestación. No incluimos al fuego en este estimado, a pesar que es muy posible que una porción substancial del bosque

<sup>6</sup> Asumimos que los patrones de deforestación seguirán los patrones "acostumbrados (business-as-usual)" tales como los estimados por Soares *et al.* (2006), las condiciones climáticas de la Amazonía de la década de enero 1996 a diciembre del 2005 (actualizado de Nepstad *et al.* 2004) se repiten en el futuro, que el umbral de mortalidad de árboles se excede cuando la humedad del suelo disponible para las plantas (PAW) cae bajo el 30 por ciento de su valor máximo a una profundidad de 10 m (usando el mapa de PAW máximo presentado por Nepstad *et al.* 2004, y el umbral de mortalidad de árboles de Nepstad *et al.* 2007) y que la tala se extenderá a lo largo de la Amazonía tal como lo describió el modelo económico basado en la renta de Merry *et al.* (en revisión).

Figura 6. ¿Un bosque encaminado hacia un punto crítico ecológico y climático? Mapa de la Amazonia 2030, mostrando los bosques dañados por la sequía, tala y desbosque. Este mapa asume que la tasa de deforestación de 1997-2003 continuará en el futuro y que las condiciones climáticas de los últimos 10 años se repetirán en el futuro. Ver el texto para más detalle.



dañado por la sequía y/o la tala, y que bosques adicionales no dañados, sufrirán incendios del sotobosque. Bajo estos supuestos, 31 por ciento del bosque amazónico de dosel cerrado será deforestado (arriba del 17 por ciento actual) y 24 por ciento<sup>7</sup> será dañado por las sequías o tala para el año 2030. Si asumimos que la precipitación se reduce en 10 por ciento en el futuro, entonces un 4 por ciento adicional del bosque se dañará por la sequía.

Si suponemos que la liberación de carbono por la deforestación es tal como lo describen Soares *et al.* (2006), que la tala selectiva libera 15 por ciento de las reservas forestales de carbono a la atmósfera (Asner *et al.* 2005), que el daño de la sequía causa una reducción del 10 por ciento de la biomasa forestal (Nepstad *et al.* 2007), y que el fuego afecta el 20 por ciento de los bosques dañados por la sequía o la tala liberando un 20 por ciento adicional del carbono forestal a la atmósfera, entonces entre 15 y 26 de las 90 a 140 mil millones de toneladas de carbono contenidas en los árboles de la selva amazónica serán liberadas a la atmósfera a través de las etapas iniciales de una muerte regresiva de la Amazonía. En otras palabras, los cambios que están ocurriendo en la Amazonía hoy día podrían revertir muchos de los avances hacia la reduc-

ción de las emisiones de gases de invernadero que se han negociado dentro del Protocolo de Kyoto, que, si se implementa en su totalidad, alcanzaría una reducción de 2 mil millones de toneladas de emisiones de carbono durante el período 2008-2012.

Esta muerte regresiva a corto plazo del bosque tendrá un alto costo para la sociedad amazónica. Por sí mismo, el fuego provocará la muerte de cientos de habitantes de la Amazonía y ocasionará problemas bronquiales en decenas de miles. Se interrumpirán el transporte y las transmisiones eléctricas y se perderán muchas inversiones rurales en cercados de pastizales ganaderos, huertos y manejo forestal maderable.

El costo de los incendios en la Amazonia brasileña puede ser muy alto. En 1998, los impactos del fuego sobre la salud, agricultura, bosque y carbono podrían haber alcanzado los \$5 mil millones de dólares (Mendonça *et al.* 2003). Sequías más frecuentes e intensas conducirán a la muerte de peces y bajos niveles en los ríos, aislando comunidades ribereñas de los mercados cercanos y de los servicios de educación y salud (Marengo *et al.* en imprenta).

Muchas de las pérdidas asociadas con la muerte regresiva del bosque son más difíciles de cuantificar monetariamente. Para el final del 2050, cuatro ecorregiones se verán reducidas a menos del 15 por ciento de su rango actual, incluyendo *los bosques de babaçu del*

<sup>7</sup> No se cuenta con estimados para toda la cuenca sobre el total del área de bosque dañado por la tala, fuego y sequía.



*Maranhão en Brasil, el bosque seco del Marañón y el bosque seco de Tumbes y Piura en Perú* (Soares *et al.* 2006). Los bosques nublados de Bolivia y Perú podrían desaparecer si el cambio en el clima regional inhibe la lluvia y las nubes de alta elevación que son las condiciones necesarias para que este ecosistema exista, un proceso que ya está conduciendo a la extinción de los sapitos dorados de la cordillera Centro Americana (Lawton *et al.* 2001). El calentamiento global por sí mismo podría elevar los cinturones climáticos de la pendiente oriental de los Andes más rápido de lo que las especies de plantas pueden migrar (Bush *et al.* 2004). Y muchas de las especies de animales se verán constreñidas por la destrucción del hábitat. Solo una décima parte del hábitat del Tití Plateado *Mico argentatus* tendrá cobertura forestal y una cuarta parte de todos los mamíferos perderán al menos 40 por ciento de sus territorios a la tala forestal para el año 2050 (Soares *et al.* 2007).

Y, sin embargo, este escenario podría ser conservador. Si se llegan a dar aumentos en la deforestación por causa del aumento en el precio del biocombustible y las materias primas agrícolas o se inhibe sustancialmente la precipitación por la deforestación o el humo, la velocidad de la muerte regresiva podría duplicarse fácilmente. Pequeños aumentos en la sequía o deforestación podrían acelerar la destrucción y degradación del bosque de manera que sobrepase la marca del 50 por ciento en los próximos 15 años.

## **Evitando un punto crítico en la Amazonía: procesos claves**

Varios procesos y relaciones importantes tienen el potencial de contrarrestar las fuerzas que están impulsando a la Amazonía hacia un escenario de muerte regresiva y proveen algunos elementos para una decidida estrategia de conservación amazónica.

### **• En ausencia de fuego, la mayor parte de los bosques se recuperan rápidamente**

La mayor parte de las tierras degradadas de la Amazonía, regresarán a bosque de dosel cerrado si se protegen del fuego, recuperando la transpiración de los bosques primarios en un período de 15 años (Uhl *et al.* 1988, Nepstad *et al.* 1991, Jipp *et al.* 1997). La regeneración del bosque ocurre a una tasa determinada principalmente por la intensidad de uso previo al abandono (Uhl *et al.* 1988, Zarin *et al.* 2001, Davidson *et al.* 2007). Los pastizales ganaderos abandonados establecidos en suelos que nunca fueron arados por lo general son recubiertos rápidamente por árboles y lianas que

rebrotan y se desarrollan en un bosque secundario de dosel cerrado al cabo de 5 a 10 años. Con cada año de recuperación libre de fuego que pasa, la altura promedio de la regeneración del dosel forestal es mayor, su carácter inflamable se reduce (Ray *et al.* 2005; Holdsworth y Uhl 1997) y la cantidad de vapor formante de nubes de lluvia que se emite a la atmósfera aumenta (Jipp *et al.* 1997).

### **• Al ir aumentando el número de propietarios de tierras adversos al fuego, los propietarios de tierras dependientes del fuego podrían seguir el ejemplo.**

Los propietarios de tierras evitan el uso del fuego como una herramienta de manejo del suelo e invierten más en la prevención de quemaduras accidentales al ir acumulando inversiones sensibles al fuego tales como huertos, cultivos de árboles, sistemas de manejo forestal maderable y forrajes mejorados en sus propiedades (Nepstad *et al.* 2001, Bowman *et al.* sometido a publicación). Al aumentar el número de propietarios de tierras adversos al fuego en el área, se podría alcanzar un punto de retorno más allá del cual estos propietarios predominarían sobre los vecinos que favorecen el fuego para reducir el riesgo de incendios. Tal cambio en el comportamiento de los propietarios de tierra – en caso que en realidad suceda – podría cumplir un papel importante en prevenir que ocurra la degradación del bosque inducida por el fuego.

### **• La creciente demanda para un mayor desempeño ambiental que es evidente entre los compradores y financistas de la materia prima agrícola podría impulsar los sectores agroindustriales y ganaderos de la Amazonía hacia un mayor cumplimiento de la ley y la adopción de mejores prácticas agrícolas.**

Un segundo cambio en el comportamiento de los propietarios de tierras podría ocurrir cuando el buen manejo de la tierra, incluyendo el uso sabio del fuego y el cumplimiento de la legislación ambiental son vistos por un número creciente de productores como las condiciones necesarias para participar en los mercados de materias primas y para obtener el acceso al crédito y al financiamiento. Los productores de soya de Mato Grosso están actualmente en el centro de dicho cambio al entrar a su segundo año de la moratoria impuesta por la Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (la Asociación Brasileña de Aceites Vegetales –ABIOVE). Esta moratoria de dos años para la compra de soya sembrada en suelos donde el bosque amazónico ha sido recientemente clareado fue estimulada por una campaña contra la soya amazónica iniciada por la organización ambientalista Greenpeace (Greenpeace 2006). Los productores de soya y sus organizaciones

están actualmente buscando sistemas de criterios que certificarían sus fincas como ambientalmente correctas, dichos sistemas están en proceso de desarrollo. Por ejemplo, la “Mesa Redonda para la Soya Responsable (RTRS), iniciada por el WWF en el 2004, está actualmente involucrada en un proceso internacional y de múltiples socios para definir los criterios por los cuales se identificarían y certificarían a los productores de soya responsables. La RTRS incluye en su membresía a los compradores del 20 por ciento de la producción anual mundial de soya, todos ellos están comprometidos a comprar soya certificada por RTRS. En menor escala, el Catastro de Compromiso Socioambiental (Cadastro de Compromisso Socioambiental—CCS), lanzado por dos organizaciones no gubernamentales (Aliança da Terra—AT y el Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazonia—IPAM) ha atraído a 75 ganaderos y agricultores cuyas propiedades tienen un área combinada de 1.5 millones de hectáreas (Arini 2007). La entrada al Registro compromete al propietario de tierra a implementar un correcto manejo ambiental del suelo y de las relaciones laborales en sus propiedades lo cual se hace transparente a los compradores potenciales a través de un sitio web. En el 2006 y 2007, dos cadenas de supermercados y el productor más grande de pollos del Brasil se acercaron a AT e IPAM para comprar soya y carne de propiedades CCS. Es en el contexto de sistemas de certificación como estos, que los propietarios de tierra acuerdan adoptar técnicas de prevención de fuego tales como las líneas rompe-fuego a lo largo del borde del bosque, para cumplir con los requisitos de la legislación federal para las reservas forestales privadas y para conservar los bosques ribereños.

• ***La recuperación del bosque y el establecimiento de cultivos de árboles en tierras degradadas puede restablecer la transpiración y amortiguar el clima regional contra eventos climáticos extremos.***

El vapor de agua producido por los bosques en la Amazonía oriental es crucial para el mantenimiento de los sistemas de precipitación vientos abajo, en la Amazonia central y occidental (Marengo *et al.* en imprenta, da Silva *et al.* en imprenta). Una manera de amortiguar la Amazonía contra los eventos climáticos extremos es restableciendo la transpiración del bosque en áreas extensas que han sido desboscadas a lo largo de la carretera Belém-Brasília al oriente de Pará y Maranhão, y a lo largo de la carretera PA150 en Pará central. La recuperación de la transpiración sobre áreas extensas a través de la regeneración del bosque y a través del establecimiento de cultivos de árboles junto con la disminución del fuego podría reducir la inhibición de la precipitación provocada por el reemplazo del bosque

nativo con pastizales ganaderos y campos de soya. Al incrementar la precipitación con la recuperación del bosque, se podría establecer un círculo virtuoso de retroalimentación y recuperación más rápida del bosque.

• ***Manejo sostenible forestal maderable***

Es posible manejar rentablemente los bosques amazónicos para la producción sostenida de madera a la vez que se reducen grandemente los impactos negativos de la tala del bosque (Holmes *et al.* 2000, Barreto *et al.* 1998). Las técnicas de corte de “impacto reducido”, incluyendo el corte de lianas previo a la cosecha, trazo cuidadoso de los senderos de arrastre, corte direccional de los árboles y otras prácticas, proveen iguales ganancias a las compañías madereras (Holmes *et al.* 2000, Barreto *et al.* 1998) a la vez que reducen los daños al dosel forestal que aumentan la susceptibilidad a la quema del bosque (Holdsworth and Uhl 1997). La conservación de la Amazonía dependerá de aprovechar el valor económico de la madera de la región para fomentar la transición a una economía basada en el bosque y adversa al fuego (Nepstad *et al.* 2006d).

• ***Planificación regional para reducir los impactos negativos de los proyectos de infraestructura de transporte***

De enero del 2004 hasta el 2006, 23 millones de hectáreas de tierra en la Amazonía brasileña fueron declaradas como reservas del bosque (Campos y Nepstad 2006). Este histórico logro en conservación del bosque tropical evitará que aproximadamente 1 mil millones de toneladas de carbono se liberen a la atmósfera para el año 2015 aumentando la escasez de bosque disponible a los intereses de la ganadería y la soya (Nepstad *et al.* 2006c, Soares *et al.* 2006). Este logro fue posible en parte debido al programa brasileño de Áreas Protegidas de la Región Amazónica (ARPA, el cual en cooperación con el Banco Mundial, el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (Global Environment Facility - GEF) y WWF, establecieron la meta de expandir la red de áreas protegidas al 12 por ciento del territorio de la Amazonia brasileña. Pero fue posible también debido al extenso proceso de planificación regional involucrando cientos de organizaciones de agricultores, compañías madereras, grupos ambientalistas y del gobierno. Este proceso de planificación regional se inició en anticipación de la pavimentación de la carretera BR-163 Santarém-Cuiabá, como parte del programa de desarrollo regional del movimiento social de la Carretera Transamazónica. Esto creó una amplia base de apoyo político para la creación de nuevas áreas protegidas en una frontera agrícola activa (Campos y Nepstad 2006).

• **REDD: ¿un nuevo y poderoso mecanismo para compensar a los países tropicales que protegen sus bosques?**

¿Está el mundo listo para pagar a los países tropicales que reduzcan sus emisiones de gases - que atrapan calor - provocadas por la deforestación y degradación forestal? Existen razones para creer que un nuevo régimen de política climática internacional es inminente en los próximos años. Dentro del UNFCCC, las negociaciones para crear mecanismos para la compensación a nivel de todos los países tropicales que logren reducir sus emisiones provenientes de la deforestación y la degradación forestal (REDD) están avanzando rápidamente. Dentro de Brasil, un pacto para la reducción gradual de la deforestación a cero ha obtenido amplio apoyo dentro del congreso nacional, los gobiernos estatales y la comunidad ambientalista. La Aliança de Povos da Floresta (Alianza de Pueblos del Bosque) ha presentado su apoyo a REDD con una serie de condiciones involucrando la compensación de los pueblos del bosque por su papel como guardianes del bosque - los bosque localizados en reservas indígenas son protegidos tanto como los bosques localizados en parques y reservas biológicas, en base al análisis satelital de la deforestación (Nepstad *et al.* 2006a). Un mecanismo robusto de incentivos económicos para la conservación de los bosques tropicales podría contribuir mucho a prevenir que la Amazonía alcance sus puntos climáticos y ecológicos críticos.

## Conclusión

Las tendencias sinérgicas en la economía, vegetación y clima de la Amazonía podrían conducir al reemplazo o daño de más de la mitad del bosque de dosel cerrado de la Cuenca del Amazonas en los próximos 15 a 25 años, destruyendo muchos de los logros actualmente en progreso para reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Contrarrestando estas tendencias se encuentran los cambios emergentes en el comportamiento de los propietarios de terreno, los éxitos recientes para establecer grandes bloques de áreas protegidas en las fronteras agrícolas activas, importantes tendencias de mercado favoreciendo el buen manejo forestal, y un posible nuevo mecanismo internacional para compensar a las naciones tropicales por su progreso en la conservación del bosque, que podrían reducir la posibilidad de una muerte regresiva a gran escala del complejo forestal de la Amazonía. A largo plazo, sin embargo, el evitar este escenario podría depender de que las reducciones mundiales de emisiones de gases de efecto invernadero sean lo suficientemente significativas como para prevenir que las temperaturas globales aumenten más de uno o dos grados.

## Literatura Citada

- Alencar, A., D. C. Nepstad y M. del C. Vera Diaz.** 2006. Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO and non-ENSO years: area burned and committed carbon emissions. *Earth Interactions* 10, Paper No. 6, 1-17.
- Andreae, M.O., D. Rosenfeld, P. Artaxo, A. A. Costa, G. P. Frank, K. M. Longo, and M. A. F. Silva-Dias** (2004). Smoking rain clouds over the Amazon. *Science* 303, 1337-1342.
- Aragão, L. E., Y. Malhi, R. M. Roman-Cuesta, S. Saatchi, L. O. Anderson, and E. Shimabukuro.** 2007. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophysical Research Letters* 34, L07701, doi:10.1029/2006GL028946,
- Arima, E., Barreto, P., and Brito, M.** 2005. Pecuaría na Amazônia: Tendências e implicações para a conservação ambiental. Belém, Pará (Brazil): Instituto do Homem e Meio-Ambiente da Amazônia.
- Arini, J.** 2007. O novo capitalismo ambiental pode salvar a Amazonia? *Revista Epoca*, 23 de Julho, 2007. 74-79.
- Asner, G.P., Broadbent, E.N., Oliveira, P.J.C., Keller, M., Knapp, D.E., and Silva, J.N.M.** 2006. Condition and fate of logged forests in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103(34): 12947-12950.
- Avisar, R. and D. Werth** (2005), Global hydroclimatological teleconnections resulting from tropical deforestation, *Journal of Hydrometeorology*, 6, 134-145.
- Barlow, J., y C. A. Peres.** "Ecological Responses to El Nino-Induced Surface Fires in Central Brazilian Amazonia: Management Implications for Flammable Tropical Forests." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biological Sciences* 359, no. 1443 (2004).
- Barreto, P., P. Amaral, E. Vidal, y C. Uhl.** 1998. Costs and benefits of forest management for timber production in eastern Amazonia, *Forest Ecology and Management* 108:9-26.
- Botta, A. & Foley, J. A.** 2002 Effects of climate variability and disturbances on the Amazonian terrestrial ecosystems dynamics. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 11.
- Bowman, M., G. Amacher, F. Merry.** Sometido a publicación. Fire use and management by traditional households of the Brazilian Amazon. *Ecological Economics*.
- Brando, P., D. Nepstad, E. Davidson, S. Trumbore, D. Ray, P. Camargo.** En Prenta. Drought effects on litterfall, wood production, and below-ground carbon cycling in an Amazon forests: results of a throughfall reduction experiment. *Phil. Trans. Roy. Soc. B*
- Brown, I. F., W. Schroeder, A. Setzer, M. d. L. R. Maldonado, N. Pantoja, A. Duarte, y J. A. Marengo.** 2006. Monitoring fires in Southwestern Amazonia rain forests. *Eos* 87:253-264.
- Bruno, R.D., da Rocha, H.R., de Freitas, H.C., Goulden y M.L. y Miller, S.D.** 2006. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrological Processes* 20(12): 2477-2489.
- Bush, M.B., M. R. Silman y D. Urrego.** 2004. 48,000 years of climate and forest change in a biodiversity hotspot, *Science*, 303, 827-829.
- Canadell, J. G., C. Le Querec, M. R. Raupacha, C. B. Fielde, E. T. Buitenhuis, P. Ciais, T. J. Conway, N. P. Gillet, R. A. Houghton, and G. C. Marland** (2007), Contributions to accelerating atmospheric CO<sub>2</sub> growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks, *Proc. Nat. Acad. Sci.* cgl/doi/10.1073/pnas.0702737104.
- Cardinot, G.** 2007. Tolerância a seca de uma floresta amazônica: resultados de um experimento de exclusão de chuva em larga escala. PhD dissertation. Universidade Federal Rio de Janeiro, 197 p.
- Cattaneo, A.** En Prenta. Regional Comparative Advantage, Location of Agriculture, and Deforestation in Brazil, *Journal of Sustainable Forestry*.
- Cochrane, M. A., A. Alencar, M. D. Schulze, C. M. Souza Jr, D. C. Nepstad, P. A. Lefebvre, and E. A. Davidson.** 1999. Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests, *Science*, 284,1832-1835.
- Cochrane, M. A., and M. D. Schulze.** 1999. Fire as a recurrent event in tropical forests of the eastern Amazon: Effects on forest structure, biomass, and species composition. *Biotropica* 31, 2-16.
- Costa, M. H., S. N. M. Yanagi, P. Souza, A. Ribeiro, and E. J. P. Rocha** (2007), Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion, *Geophysical Research Letters*, 34(7).
- Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A. y Totterdell, I. J.** 2000 Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408, 184.
- Cox, P. M., Betts, R. A., Collins, M., Harris, P. P., Huntingford, C. y Jones, C. D.** 2004 Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology* 78, 137-156.
- Da Silva, R. R. y R. Avisar.** 2006. The Hydrometeorology of a Deforested Region of the Amazon Basin. *Journal of Hydrometeorology* 7, 1028-1042.
- Davidson, E. A. C. J. R. de Carvalho, A. M. Figueira, F. Y. Ishida, J. Ometto, G. B. Nardoto, R. T. Saba, S. N. Hayashi, E. C. Leal, I. C. G. Viera, and L. A. Martinelli** (2007), Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment, *Nature* 447(7147), 995-U996.
- Fearnside, P. M.** (1997), Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions, *Climatic Change*, 35, 321-360.
- Friedlingstein, P., Dufresne, J.L., Cox, P.M. y Rayner, P.** 2003. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? *Tellus B* 55(2): 692-700.
- Greenpeace International.** 2006 (April). Eating Up the Amazon. Disponible en <http://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/eating-up-the-amazon.pdf> (visitado la última vez en Mayo 28, 2006).
- Grodzins, M.** 1958. The metropolitan area as a racial problem. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Gullison, R. E., P. C. Frumhoff, J. G. Canadell, C. B. Fields, D. C. Nepstad, K. Hayhoe, R. Avisar, L. M. Curran, P. Friedlingstein, C. D. Jones y C. A. Nobre.** 2007. Tropical forests and climate policy. *Science*, 316(5827), 985-986
- Gunderson, L.H., Holling, C.S., Pritchard, L. y Peterson, G.D.** 2002. Resilience of large-scale resource systems. In L.H. Gunderson, L. Pritchard (Eds.), *Resilience and the Behavior of Large-Scale Systems*. Washington, D.C.: Island Press. Pp. 3-20.
- Gunderson, L.H., Holling, C.S.** 2002. *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Washington, D.C.: Island Press.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D. W. y Medina-Elizade, M.** 2006 Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103, 14288-14293
- Holdsworth, A. R. y C. Uhl.** 1997. Fire in Amazonian selectively logged rain forest and the potential for fire reduction. *Ecological Applications* 7(2):713-725.

- Holmes, T. P., G. M. Blate, J. C. Zweede, R. Pereira Jr, P. Barreto, F. Boltz y R. Bauch.** 2002. Financial and ecological indicators of reduced impact logging performance in the eastern Amazon. *Forest Ecology and Management*, 163, 93-110.
- Holling, C. S.** (1973), Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1-23.
- Houghton, R. A., D. L. Skole, C. A. Nobre, J. L. Hackler, K. T. Lawrence y W. H. Chomentowski.** 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 403, 301-304.
- Instituto Pesquisa Espacial – INPE** (2007), Estimativas Anuais de Desmatamento. PROJETO PRODES MONITORAMENTO DA FLORESTA AMAZÔNICA BRASILEIRA POR SATÉLITE. Available at <http://www.obt.inpe.br/prodes/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Jipp, P. H., Nepstad, D. C., Cassel, D. K. y De Carvalho, C. R.** 1998. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally-dry Amazonia. *Climatic Change* 39, 395-412.
- Kaimowitz, D., B. Mertens, S. Wunder y P. Pacheco.** 2004. Hamburger connection fuels Amazon destruction. Center for International Forest Research, Bangor, Indonesia.
- Kauffman, J.B., Uhl, C. y Cummings, D.L.** 1988. Fire in the Venezuelan Amazon I: Fuel Biomass and Fire. *Oikos*, 53, 167-175.
- Lawton, R. O., U.S. Nair, R. A. Pielke Sr., and R. M. Welch** (2001), Climatic Impact of Tropical Lowland Deforestation on Nearby Montane Cloud Forests, *Science*, 294(5542), 584-587.
- Lean, J., and D. A. Warrilw** (1989), Simulation of the regional climatic impact of Amazon deforestation, *Nature*, 342, 411-413.
- Macdonald, G. E.** (2004), Cogongrass (*Imperata cylindrica*) – biology, ecology, and management, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(5), 367-380.
- Malhi, Y., J. Timmons Roberts, R.A. Betts, T.J. Killeen, W. Li, and C.A. Nobre.** En imprenta. *Climate Change, Deforestation and the Fate of the Amazon.* Science.
- Marengo, J. A., C. A. Nobre, J. Tomasella, M. D. Oyama, G. S. Oliveira, R. Oliveira, H. Camargo, L. M. Alves y I. F. Brown.** En Prenta. The Drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*.
- Megggers, B. J.** (1994), Archeological evidence for the impact of Mega-Niño events of Amazonia during the past two millennia, *Climatic Change*, 28, 321-338.
- Mendonça, M. J. C., M. C. Vera-Diaz, D. Nepstad, R. Seroa da Motta, A. Alencar, J. C. Gomes y R. A. Ortiz,** 2004: The economic cost of the use of fire in the Amazon. *Ecol. Econ.*, 49: 89-105.
- Merry, F. D., B. S. Soares-Filho, D. C. Nepstad, G. Amacher, and H. Rodrigues** (submitted), A sustainable future for the Amazon timber industry, *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Mynent, R. B., W. Z. Yang, R. R. Nemani, A. R. Huete, R. E. Dickinson, Y. Knyazikhin, K. Didan, R. Fu, R. I. N. Juarez, S. S. Saatchi, H. Hashimoto, K. Ichii, N. V. Shabanov, B. Tan, P. Ratana, J. L. Privette, J. T. Morisette, E. F. Vermote, D. P. Roy, R. E. Wlfe, M. A. Friedl, S. W. Running, P. Votava, N. El-Saleous, S. Devadiga, Y. Su, and V. V. Salomonson** (2007), Large seasonal swings in leaf area of Amazon rainforests, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 4820-4823.
- Nakagawa, M., K. Tanaka, N. Tohru, T. Ohkubo, T. Kato, T. Maeda, K. Satos, H. Miguchi, H. Nagamasu, K. Ogino, S. Teo, A. A. Hamid, and L. H. Seng** (2000), Impact of severe drought associated with the 1997-1998 El Niño in a tropical forest in Sarawak. *J. Tropical Ecology* 16, 355-367.
- Nepstad, D. C., C. J. R. de Carvalho, E. A. Davidson, P. Jipp, P. A. Lefebvre, G. H. de Negreiros, E. D. da Silva, T. A. Stone, S. E. Trumbo-re, and S. Viera** (1994), The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures, *Nature* 372, 666-669.
- Nepstad, D.C., P. Jipp, P. R. d. S. Moutinho, G. H. de Negreiros, and S. Viera** (1995), Forest recovery following pasture abandonment in Amazonia: Canopy seasonality, fire resistance and ants, in *Evaluating and Monitoring the Health of Large-Scale Ecosystems*, edited by D. Rapport, 333-349, Springer-Verlag, New York.
- Nepstad, D. C., C. Uhl, C. A. Pereira, and J. M. C. da Silva** (1996), A comparative study of tree establishment in abandoned pasture and mature forest of eastern Amazonia, *Oikos*, 76, 25-39.
- Nepstad, D. C., A. Verissimo, A. Alencar, C. A. Nobre, E. Lima, P. A. Lefebvre, P. Schlesinger, C. Potter, P. R. d. S. Moutinho, E. Mendoza, M. A. Cochrane, and V. Brooks** (1999a), Large-scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire, *Nature*, 398, 505-508.
- Nepstad, D. C., A. G. Moreira, and A. Alentar** (1999b), Flames in the rain forest: origins, impacts and alternatives to Amazonian fire: Chapter 5, in *Origins, Impacts and Alternatives to Amazonian FIRE*, edited by World Bank and University of Brasilia Press, Brasilia, Brazil.
- Nepstad, D. C., J. P. Capobianco, A. C. Barros, G. O. Carvalho, P. R. d. S. Moutinho, U. L. Silva Jr., and P. A. Lefebvre** (2000), *Avança Brasil: Os Custos Ambientais para a Amazônia*, edited Gráfica e Editora Alves, Belém, Brazil.
- Nepstad, D. C., G. O. Carvalho, A. C. Barros, A. Alencar, J. P. Capobianco, J. Bishop, P. Moutinho, P. A. Lefebvre, U. L. Silva, and E. Prins** (2001), Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests, *Forest Ecology and Management*, 154, 395-407.
- Nepstad, D. C., P. R. d. S. Moutinho, M. B. Dias-Filho, E. A. Davidson, G. Cardinot, D. Markewitz, R. Figueiredo, N. Viana, P. A. Lefebvre, D. G. Ray, J. Q. Chambers, L. Barros, F. Y. Ishida, E. Belk, and K. Schwalbe** (2002), The effects of rainfall exclusion on canopy processes and biogeochemistry of an Amazon forest, *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), 53, 51-18.
- Nepstad, D. C., P. Moutinho, B. Soares** (2006c), The Amazon in a Changing Climate: Large-Scale Reductions of Carbon Emissions from Deforestation and Forest Impoverishment, IPAM, WHRC, and UFMG Belém, Para, Brazil.
- Nepstad, D. C., P. A. Lefebvre, U. L. Silva Jr, J. Tomasella, P. Schlesinger, L. Solorzano, P. R. d. S. Moutinho, and D. G. Ray** (2004), Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis, *Global Change Biology*, 10, 704-717.
- Nepstad, D. C., S. Schwartzman, B. Bamberger, M. Santilli, D. G. Ray, P. Schlesinger, P. A. Lefebvre, A. Alencar, E. Prins, G. Fiske, and A. Rolla** (2006b), Inhibition of Amazon deforestation and fire by parks and indigenous lands, *Conservation Biology*, 20(1), 65-73.
- Nepstad, D. C., C. M. Stickler, and O. T. Almeida** (2006a), Globalization of the Amazon soy and beef industries: opportunities for conservation, *Conservation Biology*, 20(6), 1595-1603.
- Nepstad, D. C., I. Tohver, D. Ray, P. Moutinho, and G. Cardinot** (2007), Long-term experimental drought effects on stem mortality, forest structure, and dead biomass pools in an Eastern-Central Amazonian forest, *Ecology* 88(9), 2259-2269.
- Nepstad, D. C., and C. M. Stickler,** En Prenta, Managing the tropical agriculture revolution, *Journal of Sustainable Forestry*.

- Nobre, C. A., Sellers, P. J. y Shukla, J.** 1991 Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. *Journal of Climate* 4, 957-988.
- Oyama, M. D. y Nobre, C. A.** 2003 A new climate-vegetation equilibrium state for tropical South America. *Geophysical Research Letters* 30(23), no. 2199. .
- Pan-American Health Organization (PAHO).** 2004. The Houston Declaration. Hemispheric Conference on the Eradication of Foot-and-Mouth Disease. Houston, Texas, 3-4 March, 2004. Disponible en <http://www.paho.org/English/AD/DPC/VP/houston-declaration.htm>
- Pimentel, D., Patzek y T.W.** 2005. Ethanol Production Using Corn, Switchgrass, and Wood; Biodiesel Production Using Soybean and Sunflower. *Natural Resources Research* 14(1): 65-76.
- Ray, D., D. Nepstad y P. Moutinho,** 2005: Micrometeorological and canopy controls of fire susceptibility in forested Amazon landscape. *Ecological Applications* 15, 1664-1678.
- Saleska, S. R., K. Didan, A. R. Huete, and H. R. da Rocha** (2007), Amazon Forests Green-Up During 2005 Drought, *Science*, 318
- Salatl, E. and R. Vose** (1984), Amazon basin: A system in equilibrium, *Science*, 225, 129-138.
- Salazar, L. F., C. A. Nobre, and M. D. Oyama** (2007), Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America, *Geophysical Research Letters*, 34
- Sampalo, G., C. Nobre, M. C. Costa, P. Satyamurty, B. S. Soares-Filho, and M. Cardoso** (2007), Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion, *Geophysical Research Letters*, 34, L17709, doi:17710.11029/12007GL030612.
- Sanford, R. L., J. Saldarriaga, K. Clark, C. Uhl, and R. Herrera** (1985), Amazon rain-forest fires, *Science*, 227, 53-55.
- Schelling, T.** 1971. Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology* 1: 143-186.
- Shean, M.J.** 2004. The Amazon: Brazil's Final Soybean Frontier. US Foreign Agricultural Service/Production Estimates and Crop Assessment Division. [http://www.fas.usda.gov/pecad/highlights/2004/01/Amazon/Amazon\\_soybeans.htm](http://www.fas.usda.gov/pecad/highlights/2004/01/Amazon/Amazon_soybeans.htm)
- Silva Dias, M. A. F., S. Rutledge, P. Kabat, P. L. Silva Dias, C. Nobre, G. Fisch, A. J. Dolman, E. Zipser, M. Garstang, A. O. Manzi, J. D. Fuentes, H. R. Rocha, J. Marengo, A. Plana-Fattori, L. D. A. Sá, R. C. S. Alvalá, M. O. Andreae, P. Artaxo, R. Gielow y L. Gatti.** 2002. Cloud and rain processes in biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon region. *Journal of Geophysical Research* 107, 8072.
- Soares-Filho, B. S., Nepstad, D. C., Curran, L. M., Cerqueira, G. C., Garcia, R. A., Ramos, C. A., Völl, E., McDonald, A., Lefebvre, P. y Schlesinger, P.** 2006 Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* 440, 520-523.
- Timmermann, A., Oberhuber, J., Bacher, A., Esch, M., Latif, M. y Roeckner, E.** 1999 Increased El Nino frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature* 398, 694-697.
- Trenberth, K. E. y T. J. Hoar.** 1997. El Niño and climate change. *Geophysical Research Letters* 24, 3057-3060.
- Uhl, C. y Vieira, I.C.G.** 1989. Ecological impacts of selective logging in the Brazilian Amazon: a case study from the Paragominas region of the state of Pará. *Biotropica* 21: 98-106.
- Uhl, C. and J. B. Kauffman.** 1990. Deforestation, fire susceptibility and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. *Ecology* 71, 437-449.
- Van Nieuwstadt, M. G. L. y D. Sheil.** 2005. Drought, fire, and tree survival in a Borneo rain forest, East Kalimantan, Indonesia. *J Ecology* 93, 191-201.
- Werth, D. and R. Avissar,** (2002), The local and global effects of Amazon deforestation, *Journal of Geophysical Research, Atmospheres*, 107, doi:10.1029/2001JD000717.
- Williamson, G. B., Laurance, W. F., Oliveira, A. A., Delamonica, P., Gascon, C., Lovejoy, T. E. y Pohl, L.** 2000 Amazonian tree mortality during the 1997 El Nino drought. *Conservation Biology* 14, 1538-1542.
- Worldwatch Institute.** 2006. Biofuels for Transportation: Global Potential and Implications for Sustainable Energy in the 21st Century.
- Xavier, M.R.** 2007. The Brazilian Sugarcane Ethanol Experience. Competitive Enterprise Institute.
- Yacobucci, B.D. y Schnepf, R.** 2007 (16 March). Ethanol and biofuels. Washington, D.C.: U.S. Congressional Research Service.
- Zarin, D. J., M. J. Ducey, J. M. Tucker, and W. A. Salas** (2001), Potential biomass accumulation in Amazonian regrowth forests, *Ecosystems*, 4, 658-668.

**Publicado por:** WWF Internacional, Gland/Suiza  
**Autor:** Daniel C. Nepstad  
**Coordinador:** Alois Vedder, WWF Alemania  
**Contacto:** Rebeca Kritsch, WWF Amazon Network Initiative,  
c/o WWF Brasil  
**Diseño:** Wolfram Egert, Atelier fuer Graphic Design  
**Producción:** Rainer Litty, WWF Alemania

Impresión hecha con papel reciclable

© 2007 WWF Internacional

Cualquier reproducción parcial o total de esta publicación, debe mencionar el título y dar crédito a la persona que publica la misma, como dueño de los derechos de autor.



**WWF**, conocida como World Wildlife Fund en los Estados Unidos y Canadá, es una de las organizaciones independientes de conservación más grandes y con mayor experiencia en el mundo. Cerca de 5 millones de personas cooperan con WWF y cuenta con una red mundial que trabaja en más de 100 países.

**WWF trabaja por un Planeta vivo y su misión** es detener la degradación ambiental en la Tierra y construir un futuro en el cual el ser humano viva en armonía con la naturaleza:

- Conservando la diversidad biológica del mundo
- Asegurando que el uso de recursos renovables sea sostenible
- Promoviendo la reducción de la contaminación y del consumo desmedido

**WWF Bolivia**

P.O. Box 1633  
Santa Cruz  
Bolivia  
Tel. +591 3 31150 41  
Fax +591 3 31150 42  
<http://bolivia.panda.org/>

**WWF Brasil**

SHIS EQ QL 6/8  
Conjunto E - 2° andar  
71620-430 Brasilia  
Brasil  
Tel. +55 61 3364 7400  
Fax +55 61 3364 7474  
[www.wwf.org.br](http://www.wwf.org.br)

**WWF Colombia**

Carrera 35 No.4A-25, Cali  
Colombia  
Tel. +57 2 558 2577  
Fax +57 2 558 2588  
[www.wwf.org.co](http://www.wwf.org.co)

**WWF Guianas**

Henck Arronstr 63, Suite D, E  
Paramaribo, Suriname  
Tel. +59 7 422 357  
Fax +59 7 422 349  
[www.wwf.sr](http://www.wwf.sr)

**WWF Peru**

Trinidad Morán 853  
Lince  
Lima- 14, Peru  
Tel. +51 1 440 5550  
Fax +51 1 440 2133  
[www.wwfperu.org.pe](http://www.wwfperu.org.pe)

**WWF America Latina y el Caribe - Secretariado**

1250 24th Street, N.W.  
Washington, D.C. 20037-1193  
Tel. 202 778 9673  
Fax 202 296 5348  
[www.panda.org](http://www.panda.org)

**WWF Alemania**

Rebstoecker Strasse 55  
D-60326 Frankfurt am Main  
Alemania  
Tel: +49 69 7 91 44 - 0  
Fax: +49 69 61 72 21  
[www.wwf.de](http://www.wwf.de)

**WWF Internacional**

Avenue du Mont-Blanc  
CH-1196 Gland  
Suiza  
Tel: +41 22 364 9111  
Fax: +41 22 364 8836  
[www.panda.org](http://www.panda.org)