

ISSUES IN ECOLOGY

Publicado por la *Ecological Society of America* (Sociedad Norteamericana de Ecología)

Síntesis del estado del conocimiento del ciclo de carbono en ecosistemas boscosos de los Estados Unidos

Michael G. Ryan, Mark E. Harmon, Richard A. Birdsey, Christian P. Giardina,
Linda S. Heath, Richard A. Houghton, Robert B. Jackson, Duncan C. McKinley,
James F. Morrison, Brian C. Murray, Diane E. Pataki, and Kenneth E. Skog



Primavera 2010

Informe Número 13

esa

RESUMEN

Los bosques juegan un papel central en el ciclo de carbono de los Estados Unidos y global. El secuestro de carbono de los bosques de los Estados Unidos, a través de su crecimiento y la cosecha de productos madereros, compensa en la actualidad entre un 12 y un 19% de las emisiones de carbono asociadas al uso de combustible fósil de dicho país. El ciclo natural de un bosque (crecimiento, muerte y regeneración) y la remoción de madera dificultan los esfuerzos por comprender y medir los reservorios y flujos de carbono de los bosques. Nuestro informe explica de manera sintética estos procesos y examina los mecanismos que han sido propuestos para aumentar el almacenamiento de carbono de los bosques y utilizar la madera en reemplazo del combustible fósil. También se examinan los compromisos, los costos y los beneficios asociados con cada mecanismo y los métodos para medir el carbono de los bosques.

Los bosques actuales se encuentran en un período de recuperación de los distintos usos de la tierra y los disturbios ocurridos en el pasado, tales como uso agrícola, pastoril y las cosechas. Sin embargo, dado que esta recuperación eventualmente llegará a su fin, el hecho de que los bosques funcionen como depósitos de carbono no durará indefinidamente. Aumentos en la fertilización debido a las deposiciones atmosféricas de nitrógeno y en el dióxido de carbono atmosférico podrían acelerar el actual crecimiento de los bosques. Ya sea la magnitud de este crecimiento, como el futuro de los actuales depósitos de carbono son muy inciertos para los próximos cien años.

Diversas estrategias pueden aumentar el almacenamiento de carbono de los bosques, prevenir las pérdidas y reducir el uso de combustible fósil (ordenadas en orden creciente de incertidumbre o riesgo):

- Evitar la deforestación conserva el carbono acumulado de los bosques. Estrategia que tiene muchos beneficios y pocos riesgos.
- La forestación aumenta el almacenamiento de carbono de la forestación ecosistemas y tiene muchos beneficios. Los en ecosistemas que históricamente no han contenido bosques puede disminuir la escorrentía y la biodiversidad.
- Disminuir la intensidad y la frecuencia de las cosechas puede aumentar la diversidad de especies y diversidad estructural de los bosques, con el riesgo de perder una gran cantidad de carbono si ocurre un disturbio, como también que aumente la cosecha de madera en otros sitios.
- Aumentar la tasa de crecimiento de los bosques existentes a través de una silvicultura intensiva puede aumentar el almacenamiento de carbono y producción de madera de los bosques, pero podría reducir la escorrentía y la biodiversidad.
- El uso de bioenergía (energía contenida en la biomasa de los bosques) puede reducir las emisiones de carbono pero requiere de la expansión del manejo de bosques hacia otros ecosistemas boscosos, lo que podría reducir el almacenamiento de carbono.
- Utilizar madera en la construcción en lugar de materiales como acero u hormigón, ya que la elaboración de estos últimos libera mucho más CO₂ que los productos derivados de la madera. La expansión del uso de la madera depende principalmente del sector de la construcción no residencial y esta expansión podría reducir los reservorios de carbono de los bosques.
- La silvicultura urbana tiene un papel pequeño en el secuestro de carbono, sin embargo podría mejorar la eficiencia energética de ciertas estructuras.
- Controlar la biomasa y los desechos leñosos de los bosques de modo de disminuir los riesgos de fuegos incontrolados. De esta manera, al reducir la cantidad de material inflamable y por ende, parte del carbono actual de los bosques, se podrían evitar mayores pérdidas de carbono en el futuro. Sin embargo, este modo de conservar el carbono es muy incierto.

Cada estrategia tiene sus riesgos, sus incertidumbres y más importante aún, sus compromisos. Por ejemplo, evitar la deforestación o disminuir las cosechas en los Estados Unidos podría incrementar las importaciones de madera y disminuir el carbono en los bosques de otros países. Aumentar el uso de madera y el uso de bioenergía (energía contenida en la biomasa) probablemente reduzca el almacenamiento de carbono de los bosques y requiera de un manejo activo sobre una mayor superficie boscosa. Reconocer estos compromisos será vital para cualquier esfuerzo que promueva el almacenamiento de carbono de los bosques. A la vez, el cambio climático podría aumentar los disturbios y las pérdidas de carbono de los bosques, lo que potencialmente reduciría la eficacia de toda gestión orientada a aumentar los reservorios de carbono de estos ecosistemas. Finalmente, la mayoría de estas estrategias aún no son lo suficientemente robustas como para ser viables a largo plazo. Por otro lado, los bosques ofrecen muchos beneficios además de los vinculados al ciclo del carbono, y estos beneficios deberían ser tenidos en cuenta junto con el potencial almacenamiento de carbono.

Foto de la portada: Bosques maduros en el Valley of the Giants, en Oregón, Fotografía de Mark E. Harmon, Oregon State University.

Recuadro: Troncos cosechados en el Manitou Experimental Forest en Colorado Fotografía de Richard Oakes, USDA Forest Service.

Síntesis del estado del conocimiento del ciclo de carbono en ecosistemas boscosos de los Estados Unidos

Michael G. Ryan, Mark E. Harmon, Richard A. Birdsey, Christian P. Giardina, Linda S. Heath, Richard A. Houghton, Robert B. Jackson, Duncan C. McKinley, James F. Morrison, Brian C. Murray, Diane E. Pataki, and Kenneth E. Skog

Introducción

La circulación de carbono entre la tierra y la atmósfera controla la concentración atmosférica de dióxido de carbono (CO_2). El CO_2 es un gas de efecto invernadero, cuya principal función es mantener la temperatura de la tierra en un delicado equilibrio. Por un lado, el CO_2 deja pasar casi todo el espectro de la radiación solar a través de la atmósfera y por el otro, absorbe la radiación infrarroja saliente de la superficie de la tierra, irradiando una parte nuevamente hacia la tierra. Concentraciones más altas de CO_2 y otros gases de efecto invernadero causan el calentamiento de la tierra. Previo a la Revolución Industrial, la concentración de CO_2 en la atmósfera era menor a 280 partes por millón. La quema de combustible fósil para obtener energía y el desmonte de los bosques, ya sea para extender las áreas cultivables u obtener combustible y materiales de construcción, han generado aumentos de la concentración de CO_2 atmosférico, siendo su valor actual (2010) de 388 partes por millón. Este valor excede por lejos las 180 a 300 partes por millón encontradas durante los últimos 650.000 años.

Desde finales del 1800, y como resultado del

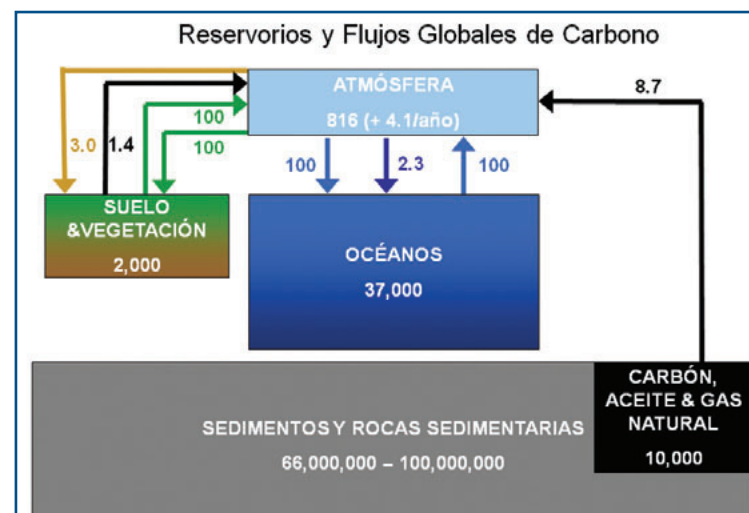
aumento continuo de las concentraciones de CO_2 y de otros gases de efecto invernadero de la atmósfera, la temperatura global de la superficie ha aumentado $0,74^\circ\text{C}$ ($1,3^\circ\text{F}$), con un aumento sustancial en la tasa de calentamiento. Mientras continúe acumulándose CO_2 en la atmósfera, las temperaturas continuarán en aumento y una tierra más cálida tendrá un impacto sobre el clima de la tierra, la variabilidad climática y los ecosistemas. Los patrones de precipitación y nieve cambiarán y los eventos climáticos extremos podrían tornarse frecuentes. Algunas regiones de bosque podrían desaparecer, mientras otras regiones que actualmente no los contienen, podrían tornarse aptas para el crecimiento de nuevos bosques.

Los bosques almacenan grandes cantidades de carbono en la biomasa viva y muerta y en el suelo y juegan un papel muy activo controlando la concentración de CO_2 de la atmósfera (Figura 1). En los Estados Unidos, durante el 2003, el carbono que se capturó de la atmósfera a través del crecimiento de los bosques junto al almacenado en los productos madereros cosechados ese mismo año, compensaron entre un 12 y un 19% de las emisiones de carbono asociadas al uso de combustible fósil de dicho país (el 19% incluye la tasa de almacenamiento

de carbono de los suelos, que es una estimación bastante incierta). Es posible que las tasas actuales de crecimiento de los bosques de los Estados Unidos sean mayores que aquellas previas a la colonización europea, ya que son áreas que se están recuperando de otros usos de la tierra y disturbios ocurridos en el pasado. Sin embargo, también es muy posible que estas tasas de crecimiento no continúen indefinidamente.

Dado el papel que los bosques de los Estados

Figura 1. La vegetación y el suelo juegan un papel central en el ciclo global del carbono, como lo muestran los reservorios (cajas) y flujos (flechas) globales del carbono, expresados en petagramos (1000 teragramos). Los valores en celeste y verde son los flujos históricos entre los océanos y la atmósfera y entre la vegetación y suelo y la atmósfera respectivamente, que ocurrirían sin el impacto humano. El valor en azul indica la absorción adicional de CO_2 del océano como resultado de los aumentos del CO_2 en la atmósfera a partir de la Revolución Industrial. Los valores en negro representan los flujos a la atmósfera debido a la quema de combustible fósil y la deforestación, mientras el marrón representa el flujo desde la atmósfera a la superficie terrestre principalmente debido al crecimiento secundario de los bosques. El incremento atmosférico medido de 4,1 petagramos por año (caja celeste) no coincide con el valor estimado a partir del balance entre los flujos de entrada y salida, principalmente porque estos flujos se miden por separado y tienen incertidumbres asociadas. (Cortesía de Richard A. Houghton, Woods Hole Research Institute, 2009.)



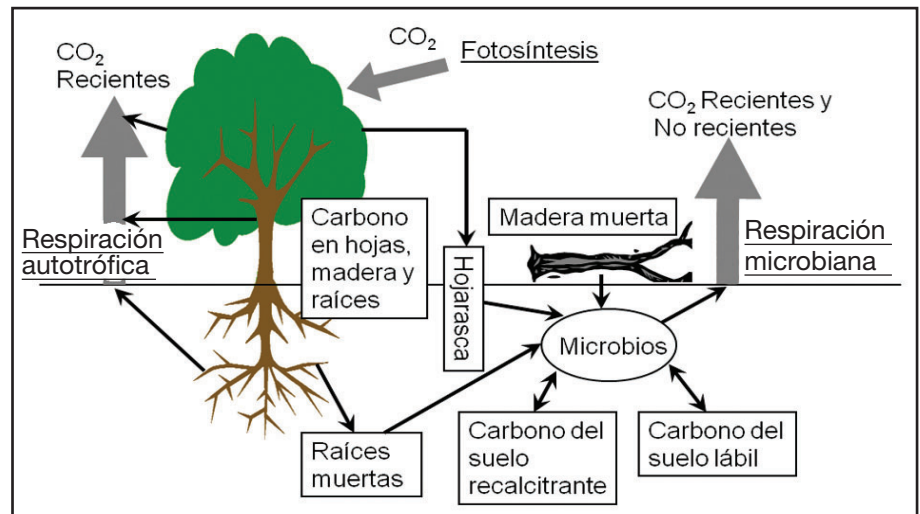
Cortesía de Richard A. Houghton, Woods Hole Research Institute, 2009.

Unidos juegan en compensar las emisiones de CO_2 , en este informe nos preguntamos: 1) ¿Cuáles son las acciones humanas que más influyen sobre los sumideros y tasas de almacenamiento de carbono de los bosques? y ¿es posible a través de prácticas de manejo, como el manejo de bosques y el uso de productos forestales, aumentar el tamaño y vida media de estos sumideros? 2) ¿Cuáles serían los principales riesgos, incertidumbres, compromisos y beneficios de considerar el uso de los bosques y sus productos derivados (productos forestales) como una estrategia posible de mitigación de las emisiones de carbono?

El objetivo de nuestro informe es responder estas preguntas o, en el caso de no contar aún con las respuestas, presentar la información actual más precisa. Presentamos el estado del conocimiento acerca del papel de los bosques en el ciclo de carbono de una manera sencilla, de forma tal que técnicos forestales, políticos, educadores y público interesado puedan comprenderla. Comenzamos con una descripción del ciclo de carbono de los bosques y los efectos biofísicos. Luego detallamos las estrategias que se han propuesto para disminuir la concentración atmosférica de CO_2 a través del uso de los bosques.

Estas estrategias incluyen:

- **Evitar la deforestación** – Mantener los bosques intactos.
- **Forestación** – Restauración de los bosques en tierras que han estado sin cobertura arbórea durante algún tiempo y el establecimiento de bosques en tierras que históricamente no los han contenido.
- **Manejo de bosques: disminuir las pérdidas de carbono** – Aumentar los intervalos de cosecha y/o disminuir la intensidad de las cosechas.
- **Manejo de bosques: aumentar el crecimiento de los bosques** – Implementar prácticas de silvicultura, regeneración rápida y mejoramiento genético.
- **Manejo de bosques: reducir los riesgos de fuego mediante raleos (extracción de fustes completos).**
- **Silvicultura urbana** – Plantar árboles en áreas urbanas con el objetivo de almacenar carbono y también, mediante el sombreo, ahorrar energía.
- **Bioenergía (o Energía de biomasa)** – Utilizar la madera y biomasa como combustible en lugar del carbono fósil.
- **Almacenamiento de carbono en productos forestales y sustitución** – Almacenar carbono en productos forestales de vida larga (como la madera que se utiliza en la construcción) y



utilizar productos forestales en lugar de aquellos productos, como acero y hormigón, cuya elaboración libera mucho más CO_2 que los derivados de la madera.

Luego discutimos las compensaciones y los créditos de carbono, el monitoreo de los aumentos de carbono en los bosques para determinar si se realizan los cambios estimados y el costo de carbono para promover estos cambios. También discutimos algunas de las incertidumbres inherentes al potencial real de los bosques de almacenar carbono, ya que cambios en el clima, la población y uso de la tierra podrían disminuir el almacenamiento de carbono proyectado. En especial, advertimos sobre la pérdida potencial de carbono que podría suceder con el aumento de los disturbios como consecuencia del calentamiento climático. Finalmente proporcionamos algunas conclusiones y recomendaciones.

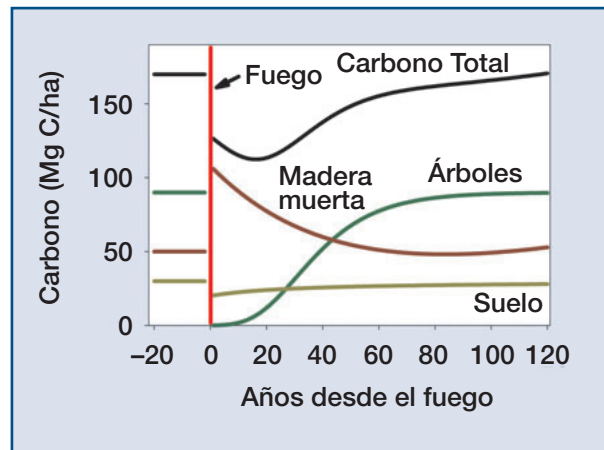
Los bosques y el carbón

Carbono en los bosques

El almacenamiento de carbono de los bosques difiere de muchos otros mecanismos que controlan el CO_2 atmosférico debido principalmente a que durante el ciclo de vida de un bosque, los reservorios, las ganancias y las pérdidas de carbono varían con la edad del bosque. El carbono ingresa a los bosques a través de la fotosíntesis, donde las hojas capturan la energía lumínica y convierten el CO_2 atmosférico y el agua en azúcares. Los árboles respiran aproximadamente la mitad de todo el CO_2 convertido en azúcares (respiración de mantenimiento), y utilizan la otra mitad en la producción de nuevas estructuras como hojas, madera y raíces (Figura 2). A la vez, a medida

Figura 2. Flujos de carbono entre la atmósfera y el bosque (flujos en ambos sentidos). Durante el crecimiento del bosque, el carbono se almacena principalmente en la madera viva y muerta. (Adaptado de Ryan y Law 2005 *Biogeochemistry* 73: 3-27.)

Figura 3. Si un bosque se regenera después de un fuego, y la recuperación es lo suficientemente duradera, el bosque logrará recuperar todo el carbono perdido durante el fuego y por la descomposición de los árboles muertos a causa del fuego. Se ilustra este concepto a través de mostrar el carbono almacenado en los árboles vivos, madera muerta y suelo de los bosques y cómo estos compartimentos cambian con el tiempo luego del fuego (Adaptado de Kashian y otros 2006. *BioScience* 56(7):598-606.)



que crecen, los árboles se desprenden de las ramas, hojas y raíces muertas y algunos mueren. Los microorganismos descomponen este material muerto, lo que genera que una parte del carbono retorne a la atmósfera (como CO_2) y otra parte permanezca en el suelo. En un bosque maduro, los árboles vivos y muertos contienen alrededor del 60% del carbono, mientras que el suelo y los desechos del bosque el restante 40%. El carbono en los árboles vivos y muertos (que representa el 50% de su biomasa) varía principalmente con la edad del bosque.

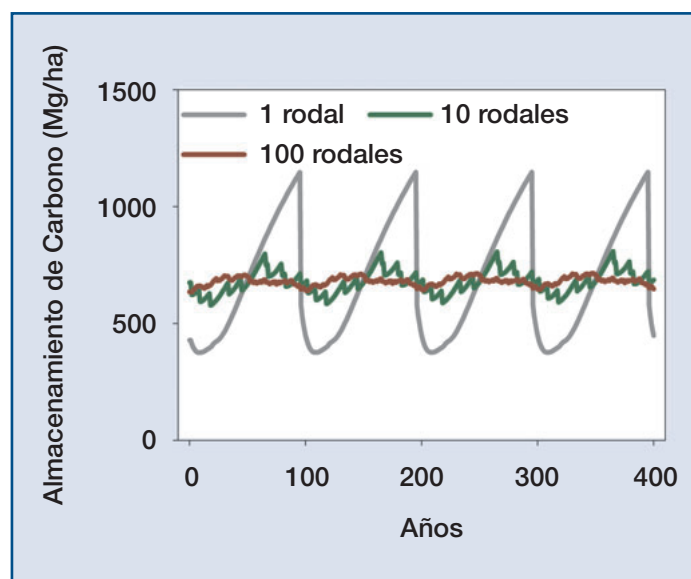
El carbono puede emitirse o perderse de los bosques a través de varios caminos, además del de la respiración de los árboles y los microorganismos. Los incendios forestales emiten carbono a la atmósfera a través de la combustión de las hojas y ramas pequeñas, del colchón de hojarasca y de algunos árboles y troncos, lo que genera pérdidas importantes del carbono almacenado principalmente en los árboles muertos y suelo. Las tormentas y plagas de insectos tam-

bién pueden provocar la muerte de los árboles y aumentar la cantidad de material disponible para la descomposición. Las cosechas remueven carbono de los bosques, aunque una parte permanece en los productos madereros (lo que evita su inmediata emisión a la atmósfera) y otra queda disponible para utilizarlo como bioenergía (desplazando el uso de combustible fósil). Además, el agua puede remover el carbono de los bosques ya sea a través del transporte de suelo y hojarasca a los arroyos (en particular, a través de procesos erosivos que ocurren después del fuego) o de moléculas solubles

de carbono generadas durante la descomposición. Los bosques regenerados después de un fuego, cosecha u otro tipo de disturbio eventualmente recuperarán todo el carbono perdido, y si la recuperación es lo suficientemente perdurable en el tiempo, el ciclo completo del bosque será neutro con respecto al almacenamiento de carbono (Figura 3). Por el contrario, si los disturbios se incrementan como resultado del cambio climático, eventos de fuego, tormentas o plagas de insectos podrían ocurrir antes de que el ecosistema recupere todo el carbono que tenía previo al disturbio. En ese caso, la cantidad de carbono almacenado en el paisaje disminuirá.

Los bosques son sistemas biológicos que continuamente ganan y pierden carbono a través de la fotosíntesis, la respiración y la combustión; que los bosques manifiesten una ganancia o pérdida neta de carbono depende del balance de estos procesos. El hecho de que el carbono se pierda de los bosques sugiere que el carbono no puede ser almacenado de forma

Figura 4. Las acciones de manejo deberían ser evaluadas en grandes áreas y por períodos de tiempo prolongados. Esta figura ilustra cómo cambia el almacenamiento de carbono en función del área y el número de rodales incluidos. A medida que el número de rodales aumenta, las ganancias en un rodal tienden a compensarse con las pérdidas en otro y por ende la curva de almacenamiento del carbono deja de oscilar, hasta prácticamente estabilizarse. La intensidad y severidad de los disturbios controla el almacenamiento de carbono promedio de un gran número de rodales, como se muestra en la Figura 7. Esto es, a medida que más frecuentes y severos son los disturbios, menos carbono se almacena en el ecosistema (Cortesía de Mark E. Harmon, Oregon State University, 2009.)



permanente en estos sistemas. Sin embargo, esta mirada ignora que en la mayoría de los casos, el carbono inevitablemente aumenta y eventualmente se recupera luego de un disturbio. Así, a lo largo del tiempo, un bosque aislado puede oscilar abruptamente en su capacidad para almacenar carbono. Sin embargo, al considerar un conjunto diverso de bosques en un área grande (escala de paisaje), visualizar tales ciclos de "auge y caída" puede que no sea muy sencillo. Esto se debe principalmente a que los distintos parches de bosque que integran la matriz del paisaje suelen encontrarse en distintas fases de recu-

peración luego de un disturbio o cosecha (Figura 4).

Para determinar qué tan rápido el carbono aumenta en los bosques, es importante conocer el punto de inicio o “línea base”. Un ecosistema de bosque que ya almacena una cantidad sustancial de carbono es posible que lo pierda cuando se lo convierta a otro uso, mientras que un ecosistema con un gran potencial de almacenar carbono pero que actualmente no almacena lo suficiente, será más fácil de convertir a uno que almacene más (Figura 5). Es importante entonces conocer el tiempo necesario para que un bosque aumente su capacidad de almacenar carbono, ya que si queremos mitigar el calentamiento global, debemos remover de forma rápida el CO₂ de la atmósfera.

Mientras que los procesos biológicos como la fotosíntesis, la respiración y la descomposición son similares entre bosques, su importancia relativa difiere entre tipo y ubicación geográfica de los bosques. Algunos bosques crecen más rápido que otros, y a la vez, también puede ser rápida la descomposición de sus árboles muertos. Por otro lado, los disturbios varían regionalmente: por ejemplo, los fuegos son más comunes en el oeste de los Estados Unidos y los huracanes en el este. El manejo (o gestión) de los bosques varía entre sitios, donde los distintos intervalos de cosecha y prácticas de regeneración pueden influir directamente sobre la capacidad de almacenar carbono. Cada bosque tiene un potencial diferente de almacenamiento de carbono. Por ejemplo, este potencial es particularmente alto en el noroeste de los Estados Unidos (Pacific Northwest) donde los bosques son relativamente productivos y viven mucho tiempo, la descomposición es relativamente lenta y el fuego es poco frecuente. Por ende, es importante tener en cuenta las diferencias entre bosques cuando se diseñan prácticas de manejo con el objetivo de almacenar carbono.

Carbono de los bosques

Todos los productos de un bosque eventualmente se descomponen, pero antes de hacerlo, almacenan carbono. Algunos productos tienen un período de vida corto (como los postes de un cerco) y otros un período de vida extenso (por ejemplo, las casas) y cuánto más extenso sea el período de vida de un producto, más carbono almacenará. Los productos forestales dispuestos en los basurales también pueden tener un período de vida extenso; sin embargo la descomposición allí genera metano, que al

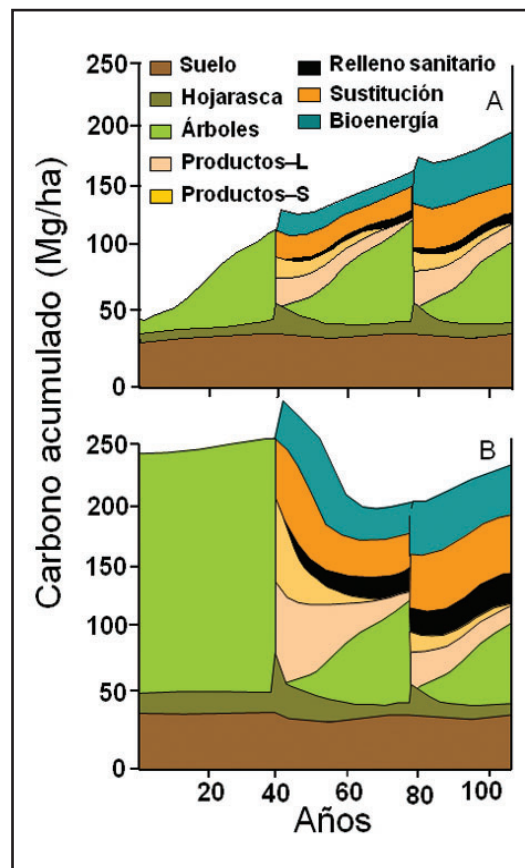


Figura 5. Almacenamiento de carbono y desplazamiento de combustible fósil proyectados si toda la biomasa utilizada generase un aumento considerable en el almacenamiento y las compensaciones de carbono en (A) un proyecto de restauración de bosques con cosechas periódicas. Cosechar la biomasa de un bosque maduro (B) genera pérdidas de carbono, incluso en el mejor de los escenarios, donde las cosechas serían poco frecuentes. En cada cosecha, se remueve la biomasa del bosque para ser utilizada como bioenergía y como productos madereros de vida larga (“Productos L”) y vida corta (Productos S”) en reemplazo del combustible fósil. La sustitución genera un gran ahorro de combustible fósil, ya que el carbono que se evita emitir al reemplazar el combustible fósil por madera es mayor que el carbono contenido en la biomasa cosechada. La sustitución y uso de bioenergía alcanzarían grandes beneficios de carbono, aunque hipotéticos aún, ya que en la actualidad estas estrategias se utilizan muy poco en los Estados Unidos (adaptado de IPCC 2007).

ser un gas de efecto invernadero mucho más potente que el CO₂, reduce los beneficios asociados al almacenamiento de carbono. Por otro lado, la combustión de la madera y corteza para hacer funcionar un molino, calentar una casa o producir biocombustibles líquidos, reduce las emisiones de carbono asociadas al uso de combustible fósil. Cuando el carbono ya no está en los bosques, es mucho más difícil rastrear y medir, en particular porque existen otros flujos de carbono, como la importación y exportación de productos forestales, que también deben ser tomados en cuenta.

Los efectos biofísicos podrían causar cambio climático

Los bosques tienen otros efectos sobre el clima además de los relacionados con el carbono. Estos efectos se conocen como efectos biofísicos (Figura 6) e incluyen la reflexión de la radiación solar y la transpiración del vapor de agua. Los árboles son oscuros y absorben más radiación que otro tipo de cobertura vegetal, como los cultivos o la tundra cubierta de nieve. Por ende, la conversión de sistemas no boscosos a bosques podría aumentar la temperatura de la tierra y el aire. Los árboles siempre verdes absorben en el invierno mucha más

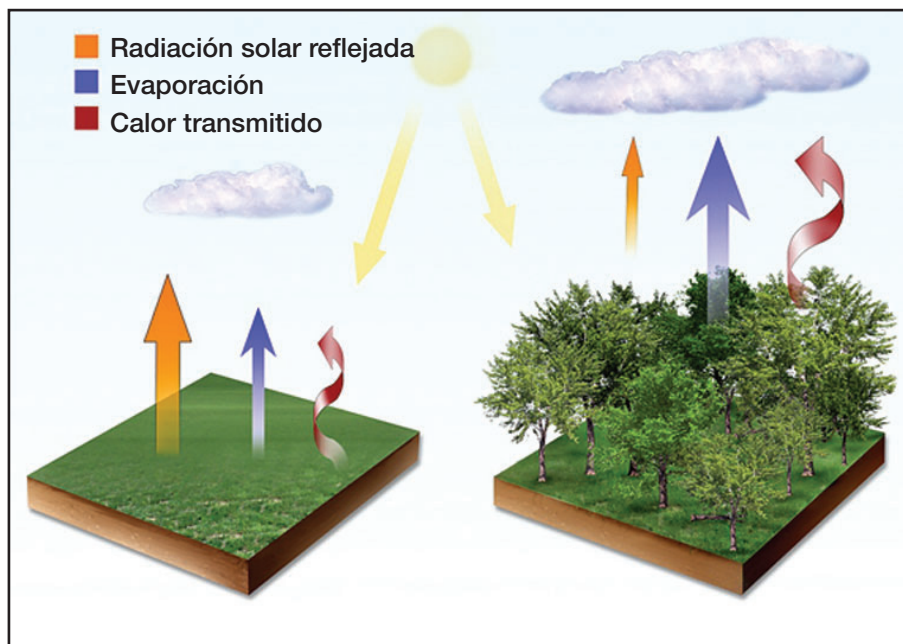


Figura 6. Los efectos biofísicos de diferentes usos de la tierra pueden tener impactos importantes sobre el clima. Los cultivos reflejan más radiación solar que los bosques, producen menos vapor de agua y transmiten menos el calor. (de Jackson et al. 2009. *Environmental Research Letters* 3: artículo 044006.)

energía que los deciduos y los bosques quemados absorben más que los no quemados, por lo que, tanto las especies como los disturbios también pueden alterar la cantidad de energía que los bosques absorban. A la vez, la transpiración de los bosques podría tener un efecto de enfriamiento al contribuir en la formación de nubes que reflejen la radiación solar.

Los efectos biofísicos a veces actúan en la dirección opuesta a aquellos relacionados con el almacenamiento o la emisión de CO₂. Por ejemplo, mientras se supone que la conversión de tierras agrícolas a bosque aumentará el

secuestro de CO₂, lo que *reduciría* el calentamiento global, también se supone que la absorción de la radiación solar aumentará, y en ese caso, *aumentaría* el calentamiento. En general, los efectos biofísicos sobre el clima no son tan fuertes como los de los gases de efecto invernadero. Sin embargo los efectos biofísicos tendrán mayor importancia al evaluar los beneficios de la forestación debido a los cambios en el uso de la tierra (y de cobertura) que se producirán. Desafortunadamente, se han realizado muy pocos estudios acerca de los efectos biofísicos, por lo que las estimaciones actuales son bastante inciertas.

Estrategias para incrementar los reservorios de carbono en los bosques

1. Evitar la deforestación

La deforestación, o conversión de áreas de bosque a otros usos, tiene un impacto significativo sobre las emisiones globales de CO₂. A escala global, la deforestación convierte unos 90.000 km² de bosque a otros usos de la tierra por año (superficie similar al tamaño de Indiana y equivalente al 0,2% de la superficie global de bosques). Anualmente, la deforestación emite entre 1.400 y 2.000 teragramos de carbono (10¹² gramos; ver Nota 1) a la atmósfera; dos tercios de estas emisiones ocurren en los bosques tropicales. A su vez, cada año las emisiones globales de carbono debidas a la deforestación representan entre un 17 y un 25% de las emisiones globales asociadas al uso de combustible fósil y son prácticamente equivalentes a las emisiones de los Estados Unidos.

En los Estados Unidos, las áreas de bosque aumentaron en un 0,1% anual entre los años 2000 y 2005, y el sumidero actual de carbono (162 teragramos de carbono por año) se debe en parte a este aumento. El crecimiento neto de las áreas de bosque resulta del balance entre la deforestación y la forestación: alrededor de 6.000 km² se deforestan anualmente, pero más de 10.000 km² de tierras sin bosque se cubren con nuevos bosques. El aumento neto de la superficie cubierta con bosques resulta de los cambios en el uso de la tierra y posiblemente también de una menor demanda de madera para la construcción en los Estados Unidos.

A pesar del beneficio de carbono que representa para los Estados Unidos tener una mayor superficie de bosques (nuevos depósitos), se deben considerar también las consecuencias a

Nota 1. UNIDADES

Cuando se analizan los reservorios y flujos de carbono a escala regional, nacional o global, los números se incrementan rápidamente. Si bien aquí expresamos el carbono en teragramos (10¹² gramos), puede que otros informes utilicen otras unidades, por lo que proporcionamos una tabla de conversiones. A escala de rodal o bosque, expresamos los reservorios y flujos en megagramos (Mg) por hectarea (10⁶ gramos). Además utilizamos masa de carbono y no masa de CO₂, ya que el carbono es la "moneda" corriente y puede ser convertida fácilmente a otras unidades. Muchos informes expresan los reservorios y flujos como masa de CO₂, y no de carbono. Para hacer la conversión de masa de carbono a masa de CO₂, simplemente se multiplica por 3,67, de modo de considerar también la masa de O₂.

1000 teragramos (Tg)	1 petagramo (Pg)
1000 teragramos	1 billón de toneladas métricas
1000 teragramos	1 gigatoneladas
1 teragramo	1 millón de toneladas métricas
1 teragramo	1 megatonelada
1 megagramo (Mg)	1 tonelada métrica
1 tonelada métrica	0,98 U.S. long ton
1 tonelada métrica por hectarea	0,4 U.S. long tons por acre
masa de carbono (C) * 3,67	masa de dióxido de carbono (CO ₂)

escala global de los cambios en el uso de la tierra dentro de los Estados Unidos. Si por ejemplo la forestación o la reducción de la deforestación en los Estados Unidos fomentaran la producción agrícola y ganadera en otros países, esto llevaría a una disminución de las áreas de bosque y pérdida de carbono por fuera de los Estados Unidos. Una pérdida de carbono asociada con tal deforestación, y en especial en los trópicos, seguramente sea mayor que la ganancia asociada al crecimiento de los nuevos bosques plantados en los Estados Unidos.

La conservación de bosques en el oeste de los Estados Unidos podría ser más importante aún en el futuro debido al cambio climático. El calentamiento climático es una de las causas de los actuales aumentos en el tamaño e intensidad de los fuegos, plagas de insectos e intensidad de las tormentas. La regeneración de los bosques podría fracasar si los disturbios o las condiciones de regeneración superasen el rango de condiciones ecológicas óptimas, y en ese caso un disturbio podría transformar los ecosistemas boscosos en ecosistema de pastizal o arbustivo. Este tipo de deforestación genera grandes pérdidas de carbono desde los ecosistemas hacia la atmósfera. Por ende, plantar árboles ayudaría a recuperar el carbono de los bosques en los casos donde fracasa la regeneración natural.

Evitar la deforestación no presenta demasiados riesgos. Sin embargo, son tres los que valen la pena señalar: los riesgos asociados a la cercanía de asentamientos humanos a ecosistemas que son muy susceptibles al fuego, las pérdidas económicas por no desarrollar prácticas agropecuarias en esas tierras y el aumento en la cosecha de madera o productos forestales en otros sitios. Por otro lado, evitar la deforestación tiene muchos beneficios, como se enumeran en la Nota 2.

2. Forestación

Definimos la forestación como el restablecimiento de bosques en tierras que han estado sin cobertura arbórea por un cierto período de tiempo, como también el establecimiento de bosques en tierras que históricamente no han contenido este tipo de vegetación (tener en cuenta que algunas entidades involucradas en los mercados de carbono utilizan otra definición para este término). La forestación puede remover una cantidad sustancial de CO₂ de la atmósfera. Entre los años 1850 y 2000, los cambios globales en el uso de la tierra llevaron

Nota 2. BENEFICIOS DEL BOSQUES

Nuestro informe se focaliza en los bosques vistos a través de la lente del carbono y sólo el carbono. Sin embargo, el manejo de bosques tiene muchos propósitos y el almacenamiento de carbono y crecimiento de la madera para productos y combustible que compensen el uso de combustible fósil son sólo algunas de las razones por las que vale la pena conservar los bosques. Los servicios de los ecosistemas que los bosques proveen son muchos y en su mayoría importantes para el bienestar de los Estados Unidos y sus habitantes: protección de las cuencas de la erosión, retención de nutrientes, purificación del agua, mitigación de las sequías e inundaciones, provisión de hábitat para una flora y fauna diversa, oportunidades recreativas, satisfacción estética y espiritual y conservación de la biodiversidad. Los norteamericanos están muy aferrados a sus bosques. En algunos casos, un manejo estricto y focalizado en el carbono podría entrar en conflicto con otros beneficios del bosque. La opción de evitar la deforestación mantiene los beneficios y el carbono de los bosques, mientras que la forestación de nuevos bosques agrega beneficios, además de aumentar el almacenamiento de carbono. Incluso bosques simples, como las plantaciones, generalmente reducen la erosión, regulan los flujos de agua y aumentan la diversidad biológica y de hábitat al compararlos con cultivos y pasturas, donde la frecuencia de las cosechas y rotación de los cultivos suele ser mayor que en los bosques.

a que 156.000 teragramos de carbono se emitieran a la atmósfera, principalmente debido a la deforestación. Esta cantidad sería equivalente a 21,9 años de emisiones globales de CO₂ asociadas al uso de combustible fósil a una tasa similar a la del año 2003.

La tasa de almacenamiento de carbono durante el crecimiento de un árbol varía con la especie, el clima y el manejo, fluctuando ampliamente entre los 3 y los 20 megagramos por hectárea por año (Mg, 10⁶ gramos). En la parte continental de los Estados Unidos, las máximas tasas de crecimiento potencial se encuentran en las regiones noroeste, sudeste y central del sur del continente. En el este de los Estados Unidos y en los estados de los lagos (centro), las grandes extensiones de tierra que actualmente se encuentran bajo un uso agrícola y bajo pastura, naturalmente volverían a su condición original de bosque si se dejarán en barbecho, mientras que en el oeste de los Estados Unidos habría que plantar árboles para que los bosques se reestablecieran.

Si los nuevos bosques que se establecen incluyeran una gran proporción de especies nativas, los beneficios de la forestación (puntualizados en la Nota 2) se potenciarían. Plantar especies nativas o permitir la sucesión natural de modo de reestablecer el bosque que históricamente se situaba en ese sitio, alcanzaría el máximo beneficio con respecto a la diversidad de especies y diversidad de hábitat para la flora y fauna. Sin embargo, dado que

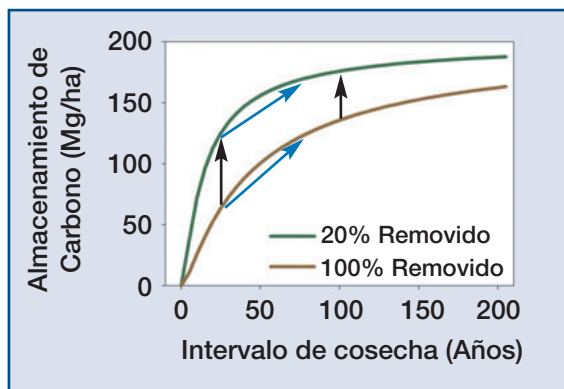


Figura 7. El carbono almacenado en el paisaje varía con el tiempo entre cosechas (intervalos de cosecha) y cantidad de biomasa removida por cosecha. Prolongar el intervalo de cosecha tiene un mayor impacto en las cosechas de mayor remoción de biomasa (las flechas azules indican un aumento en el intervalo de cosecha de 25 a 75 años). Disminuir la intensidad de las cosechas de los árboles de un 100% a un 20% (flechas negras) tiene un mayor impacto en los intervalos más cortos de cosecha. (Cortesía de Mark E. Harmon, Oregon State University, 2009.)

las especies nativas a menudo crecen más despacio que las exóticas o aquellas seleccionadas por su rápido crecimiento, es muy posible que la restauración del ecosistema original alcance menores tasas de acumulación de carbono que otro tipo de bosque que también se pueda reestablecer. Los monocultivos de especies exóticas o de nativas de rápido crecimiento en áreas históricamente de bosque podrían alcanzar altas tasas de acumulación de carbono, aunque serían pocos beneficios generados en lo que se refiere a la diversidad.

La forestación puede tener también consecuencias negativas. El establecimiento de bosques donde históricamente no estaban presentes podría disminuir la diversidad de las especies (si por ejemplo los árboles se plantan en un pastizal nativo), modificar la profundidad de las napas y aumentar la absorción de energía. Por lo general, las forestaciones disminuyen la escurritía de todo el ecosistema que reemplazan, dado que los árboles consumen más agua que los pastos y cultivos. También debemos tener en cuenta que la conversión de tierras agrícolas o ganaderas a bosques reduce la rentabilidad económica que derivaría de los productos agrícolas. Y a la vez, si la forestación viene acompañada del uso de fertilizantes nitrogenados, las emisiones de óxido nitroso (un gas de efecto invernadero 300 veces más poderoso que el CO_2) posiblemente aumenten.

3. Manejo de bosques: disminuir las pérdidas de carbono

Extender la duración de los intervalos de cosecha o reducir la cantidad de madera que se cosecha aumentarán el almacenamiento de carbono de los bosques. También la edad del bosque y cuánto se extienda el intervalo entre cosechas influirán sobre este aumento. Por ejemplo, extender en cinco años un intervalo de cosecha, y por ende cosechar un bosque a los 30 años en lugar de a los 25, llevaría a un aumento del 15% en el almacenamiento, mientras que la misma extensión pero en un bosque de 55 años, donde la cosecha se haría a los 60 años, sólo aumentaría en un 4%. (Figura 7). Una extensión de 50 años, de 25 a 75 años, incrementaría en un 92% el almacenamiento de carbono (Figura 7).

El impacto sobre el carbono de reducir la cantidad de árboles removidos durante la cosecha también varía con el intervalo de cosecha. Por ejemplo, reducir la cosecha de los árboles vivos de un 100% a un 20% aumentaría el carbono de los bosques en un 97% en un intervalo de 25 años, y sólo en un 30% en un intervalo de 100 años (Figura 7). En algunos bosques naturales son muy frecuentes los disturbios pequeños, en donde en cada evento algunos árboles son eliminados. Reducir la biomasa que se cosecha y por ejemplo remover de cada árbol sólo un porcentaje, simularía los disturbios naturales que comúnmente ocurren en el noreste y oeste medio de los Estados Unidos. Reducir las cosechas también podría ser deseable en bosques públicos que están bajo manejo, con propósitos múltiples como la recreación, conservación de la biodiversidad y purificación del agua.

Estas estrategias serían más convenientes en regiones con un manejo activo de sus bosques y un alto potencial de almacenar carbono, como los bosques del noroeste, donde las especies tienen un ciclo de vida largo y la descomposición es lenta. Los beneficios de carbono asociados a estas prácticas dependerán de la escala temporal y espacial, y por ejemplo la aplicación de estas prácticas por períodos de tiempo prolongados y sobre grandes áreas del paisaje posiblemente genere que los beneficios de carbono sean mayores.

Además de aumentar el almacenamiento de carbono, los beneficios de reducir las cosechas también incluyen un aumento de la diversidad de especies y diversidad estructural de los bosques. Por otro lado, el riesgo de perder una gran cantidad de carbono si ocurre un disturbio

Nota 3. RALEO Y CARBONO

El raleo es una técnica forestal muy utilizada para producir fustes más grandes en menos tiempo, reducir los riegos de fuego e incrementar la resistencia a insectos y enfermedades. Si bien el raleo aumenta el crecimiento individual de los árboles remanentes, en general el crecimiento en madera de todo el rodal disminuye temporalmente hasta que los árboles remanentes crecen lo suficiente y ocupan nuevamente todo el espacio. Los reservorios de carbono en un bosque raleado generalmente son menores que en uno no raleado. Si los árboles cosechados se destinaran a la producción de bioenergía o a productos forestales de larga vida, estos beneficios de carbono podrían compensar la menor biomasa y crecimiento del bosque raleado. Sin embargo, es tan grande la reducción debido al raleo, que aunque el 100% de la cosecha fuera destinada a estos usos (bioenergía y productos forestales), los beneficios de carbono no compensarían todo el carbono acumulado y las altas tasas de almacenamiento de un bosque no raleado. Por ende, el efecto neto del raleo sobre el carbono dependerá no sólo del uso que se le de a los árboles cosechados, sino también del cambio en el riesgo de un fuego en corona (relativo a la probabilidad de ocurrencias de fuegos), de las especies, del sitio, del régimen del raleo y de la duración de los intervalos de cosecha.

es alto, como también la probabilidad de que aumenten las cosechas de productos forestales en otros sitios.

4. Manejo de bosques: aumentar el crecimiento de los bosques

Además de la forestación, una estrategia para aumentar el almacenamiento de carbono es aumentar la tasa de crecimiento de los bosques ya existentes y de los nuevos. Las prácticas que pueden aumentar el crecimiento de los bosques incluyen: la regeneración de los bosques cosechados o dañados, el control de la competencia de la vegetación, la fertilización, la introducción de árboles genéticamente mejorados y la selección de especies más productivas. Estas prácticas pueden generar imponentes ganancias en el rendimiento. En bosques de pino del sur de los Estados Unidos, el cultivo de renovales en viveros ha mejorado el crecimiento en madera entre un 10 y un 30%, mientras que la fertilización alcanza ganancias de hasta un 100%. El manejo estratégico de estas plantaciones de pino, a través del uso de semillas mejoradas, control de la competencia y la fertilización, genera un crecimiento en madera cuatro veces mayor que el de los bosques secundarios de pino que se regeneran naturalmente y sin control de la competencia. Sin embargo, se debe tener en cuenta que además del manejo, el potencial para aumentar el crecimiento de los bosques varía con el clima, tipo de suelo y las especies arbóreas.

Es de esperar que los reservorios de carbono y las tasas de crecimientos de los bosques aumenten proporcionalmente. Esto significa que un 10% de aumento en el crecimiento resultará en un 10 % de aumento en los reservorios de carbono, si se asume que los intervalos de cosecha y la cantidad de madera cosechada se mantienen constantes. Como se muestra en la Figura 3, la tasa de crecimiento de los bosques naturalmente declinará con la edad del bosque. Las decisiones de manejo que aumenten las reservas de carbono deben tener en cuenta el patrón temporal de crecimiento de los bosques, la cantidad de madera que se destinaría a productos madereros al cosechar el bosque y el tiempo en que el carbono cosechado permanecería secuestrado en los productos madereros. Conocer estas



Figura 8. Una hidro-hacha es utilizada para moler árboles y reducir las cargas de combustible del dosel y por ende, los riesgos de fuegos en corona. Fotografía de Dan Binkley, Colorado State University.

variables ayudará a determinar dónde y cuándo cosechar.

El manejo de bosques, con el objetivo de aumentar el crecimiento, podría abarcar una superficie mayor a los 500 millones de acres en los Estados Unidos, entre áreas públicas y privadas. No se incluyen áreas remotas ni reservas como parques nacionales. Sin embargo, las reservas también podrían potencialmente estar bajo manejo, ya que la restauración de los ecosistemas dañados aumentaría el crecimiento.

Existen costos y beneficios asociados a este tipo de gestión o manejo. Los beneficios incluyen un aumento en la producción de madera y en el potencial de plantar especies y genotipos que se adaptarían a los climas futuros. Los costos incluyen la reducción de los beneficios de carbono debido a la emisiones de óxido nítrico provenientes de la fertilización, la reducción en el rendimiento del agua (un crecimiento más rápido consume más agua) y la pérdida de biodiversidad cuando se reemplazan bosques multiespecíficos por monocultivos.



Figura 9. Sicomoros en línea en la calle Sycamore Street de Los Angeles, California. Fotografía de Diane E. Pataki, University of California, Irvine.

Figura 10. Troncos cosechados en el Manitou Experimental Forest en Colorado. Fotografía de Richard Oakes, USDA Forest Service.



5. Manejo de bosques: control de la biomasa y desechos leñosos para reducir las amenazas de fuego

El control de la biomasa y desechos leñosos comúnmente se realiza a través del raleo (Nota 3), de modo de reducir el material inflamable o combustible de un bosque. Por ejemplo, al disminuir la biomasa foliar se reduce principalmente el riesgo de un fuego en corona, uno de los más difíciles, sino imposibles, de controlar. El raleo se realiza en bosques que varían ampliamente en su historia de fuego: desde bosques con una frecuencia baja de fuegos y en su mayoría superficiales, a bosques con fuegos en corona en donde prácticamente todo el rodal es afectado. Al ralear, el carbono almacenado en la biomasa y madera muerta disminuye temporalmente, ya que los árboles extraídos son comúnmente apilados, quemados o triturados y luego se descomponen.

Es frecuente que un fuego en corona no prospere en un bosque que ha sido raleado intensamente, ya que el fuego pasa a ser superficial y la mayoría de los árboles logran sobrevivir. Por el contrario, muchos o todos los árboles de un rodal muy denso morirán a causa de un fuego en corona. Estas diferencias en la supervivencia han promovido el control de la biomasa de los bosques, al considerar que este ofrecería un gran beneficio de carbono: remover una parte del carbono del bosque para proteger al carbono restante.

Existen dos puntos de vista acerca de la conservación o “ahorro” de carbono a través del control de la biomasa y desechos leñosos. Algunos estudios han demostrado que en rodales raleados la supervivencia de los árboles es mayor y las pérdidas de carbono a causa de un fuego en corona son menores. Los modelos de simulación de fuego también sugieren que

las pérdidas de carbono son menores en rodales de baja densidad. Sin embargo, otros estudios a escala de rodal no han demostrado tal beneficio de carbono y la evidencia a partir de modelos a escala de paisaje sugiere que en la mayoría de los bosques, el control de la biomasa disminuirá el carbono, incluso si se utilizara la biomasa de los árboles raleados como bioenergía. Se debe avanzar en este tipo de investigaciones y resolver con urgencia las diferencias encontradas, ya que el raleo es una práctica muy usada en los bosques de Estados

Unidos para reducir los eventos de fuego. Sugerimos focalizar las investigaciones a escala de paisaje, y en función de la frecuencia y extensión de los fuegos a dicha escala, evaluar el efecto de las pérdidas de carbono por el raleo, así como también el potencial de regeneración luego del fuego. A su vez, aún sin tener en cuenta los resultados de tal investigación, consideramos que los beneficios de carbono derivados del control de la biomasa podrían aumentar si los árboles extraídos se destinaran a productos madereros y bioenergía.

6. Silvicultura urbana

La silvicultura urbana ofrece un potencial de almacenamiento de carbono muy limitado. Sin embargo, hacemos referencia a dicha actividad ya que existe un gran interés por compensar las emisiones de carbono a través del uso de bosques urbanos, y además, porque más allá de la capacidad de secuestrar carbono, los árboles urbanos proveen muchos beneficios, aparte de los estéticos y ambientales. El potencial de compensación de carbono de las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la silvicultura urbana es muy limitado por dos razones: 1) las áreas urbanas constituyen una fracción pequeña del paisaje de los Estados Unidos y 2) los bosques urbanos están intensamente subsidiados y en particular, suelen requerir de grandes suministros de energía, agua y fertilizantes para plantarlos y mantenerlos.

Los bosques urbanos pueden tener importantes efectos biofísicos sobre el clima. Los árboles ejercen un efecto de enfriamiento sobre las temperaturas locales a través del sombreado y la transpiración (enfriamiento evaporativo). Durante el día, el sombreado intercepta la radiación incidente, lo que reduce las temperaturas superficiales tanto de día como de

noche. Los árboles que se plantan muy cerca de los edificios, enfrían la temperatura de los mismos y reducen las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al uso de aires acondicionados. Sin embargo, cuando los bosques urbanos ocupan grandes regiones, los efectos sobre el clima son más inciertos, dado que los árboles pueden tener simultáneamente, efectos de calentamiento (absorción) y enfriamiento.

Cuanto mayor sea el mantenimiento requerido por estos árboles urbanos, menor será su contribución a mitigar el cambio climático. En algunas regiones, las ciudades están ubicadas en lo que naturalmente serían áreas de bosques; en ese caso se plantan los bosques urbanos de manera de restaurar áreas de bosque previamente deforestadas. En tales regiones, el costo de mantenimiento de dichos árboles suele ser bajo. Por el contrario, los bosques urbanos ubicados en ciudades que han reemplazado pastizales y desiertos, suelen precisar de una alta irrigación, por lo que el costo de mantenimiento es mayor.

Además de los numerosos compromisos ya enumerados, el impacto neto de los árboles urbanos sobre el clima dependerá de: 1) la tasa de almacenamiento de carbono de los árboles, 2) las emisiones de carbono y otros gases asociados a la energía fósil utilizada en el establecimiento, mantenimiento y riego 3) las emisiones de óxido nitroso y óxido nítrico debidas a la aplicación de fertilizantes y 4) el efecto neto de los árboles sobre la temperatura local del aire y su impacto sobre la energía utilizada en los edificios. Estos factores probablemente varíen ampliamente entre regiones y especies arbóreas.

7. Bioenergía (o energía de biomasa), almacenamiento de carbono en productos y sustituciones

Bioenergía

El uso de la energía contenida en la biomasa del bosque evita las emisiones de carbono asociadas al uso de combustible fósil. Durante el 2003, el uso de bioenergía representó el 28% de todo el suministro de energías renovables y el 2% del total de la energía utilizada en los Estados Unidos. La bioenergía se utiliza principalmente como suministro eléctrico en la industria forestal y para calefaccionar los hogares. En un futuro, la biomasa podría conver-



Figura 11. Cosecha de árboles en el Manitou Experimental Forest in Colorado. Fotografía de Richard Oakes, USDA Forest Service.

tirse en la materia prima de los biocombustibles líquidos.

Si los costos no fueran una restricción y la población apoyara el uso de bosques, los Estados Unidos podrían potencialmente proveer de una producción de energía que compensara en 190 teragramos a las emisiones anuales de carbono asociadas al uso de combustible fósil. Esto sería equivalente a una compensación del 12% de las emisiones de los Estados Unidos del 2003. Además, se estima que para el año 2022, la biomasa boscosa podría producir 4 billones de galones de biocombustible líquido al año (lo que podría compensar las emisiones de carbono fósil en 2,6 teragramos)

Carbono almacenado en productos madereros y papel

En los Estados Unidos, los productos forestales se almacenan principalmente en dos tipos de compartimentos o “pools”: aquellos que están en uso y aquellos contenidos en los basurales. Las adiciones actuales de carbono a estos compartimentos, provenientes de la extracción de árboles, son mayores que las pérdidas por descomposición de la materia orgánica, y genera que el carbono en estos aumente. En el 2007, el incremento neto del carbono almacenado en los productos en uso y basurales fue de 30 teragramos y compensó en un 1,7% las emisiones asociadas al uso de combustible fósil de los Estados Unidos de ese mismo año. De estos 30 teragramos de carbono, alrededor de las dos terceras partes fueron adiciones netas a los basurales. Sin embargo, en los últimos años estas adiciones han disminuido debido a que la extracción de madera en los Estados Unidos se redujo.

El carbono también se acumula en los “pro-

Figura 12. Regeneración en el Yellowstone National Park 19 años después de los fuegos ocurridos durante el año 1988, con Dan Kashian (Wayne State University). Fotografía de Mike Ryan, USDA Forest Service.



ductos en uso”, principalmente en edificios residenciales y comerciales. Por ejemplo, el carbono acumulado en hogares (monoambientes y casas de familia) en el 2001 fue de 700 teragramos. Por otro lado, la acumulación actual de carbono es mayor en los basurales que en “los productos en uso”, principalmente porque las condiciones de anaerobiosis de los basurales generan que la descomposición de un porcentaje importante de la madera (80%) y del papel (40%) sea muy lenta. Sin embargo, estas mismas condiciones de anaerobiosis que disminuyen la descomposición, también producen metano, que es un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento 21 veces mayor que el CO_2 . Dado que sólo un 50% del metano es capturado u oxidado antes de emitirse, las emisiones de metano reducen sustancialmente los beneficios asociados al almacenamiento de carbono en los basurales. Si por ejemplo destináramos los 30 teragramos anuales de productos forestales que van a parar a los basurales a la producción de bioenergía, compensaríamos en un 1,2% el uso de combustible fósil de los Estados Unidos, reduciríamos las emisiones de metano y prolongaríamos la vida media de los basurales.

Sustitución

Las emisiones de carbono pueden ser compensadas a través de sustituir productos como el acero u hormigón, cuya elaboración emite una gran cantidad de gases de efecto invernadero, por madera. Una revisión de estudios sugiere que si se reemplazara el acero u hormigón utilizado en la construcción de edificios, por una madera que contenga tan sólo una unidad de carbono, las emisiones de carbono fósil asociadas a la elaboración de estos materiales se reducirían en dos o más unidades. Las oportunidades de aumentar la sustitución en los Estados Unidos tendrán que buscarse por fuera

del sector de la construcción de casas residenciales, ya que la mayoría de las casas ya están construidas con madera.

Costos ambientales asociados al uso de bioenergía y productos forestales

Los beneficios de carbono asociados a un mayor uso de madera, ya sea para producir bioenergía o sustituir materiales de la construcción, requiere de un manejo de bosques más intenso y sobre un área mayor de lo que actualmente sucede. Por ejemplo, para obtener los ya mencionados 190 teragramos anuales de bioenergía sería necesario cosechar toda la producción anual de los bosques de los Estados Unidos. Esto reduciría el carbono almacenado de los bosques e incluso, remover por ejemplo las ramas y hojas para destinarlo a bioenergía requeriría luego de altas dosis de fertilizantes, de manera de reponer los nutrientes removidos y mantener la productividad.

Además, la madera muerta y el carbono del suelo disminuirían con las cosechas, generando una deuda de carbono muy difícil de saldar en el corto plazo.

Vínculos entre estrategias

Combinar las estrategias puede aumentar los beneficios de carbono. Por ejemplo, el máximo beneficio potencial de un proyecto de restauración de bosques puede aumentar si estos son periódicamente cosechados y la madera se utiliza en la sustitución y la biomasa en la generación de combustible (Figura 5). Aumentar el uso de madera para productos forestales y bioenergía sería compatible con la forestación y el manejo de bosques, ya que aumentaría el crecimiento de los bosques y disminuiría la amenaza de fuegos. Sin embargo, aumentar el uso de madera iría en contra de las estrategias propuestas para aumentar los reservorios de carbono, como reducir las cosechas y evitar la deforestación. Alternativamente, aumentar el crecimiento de los bosques sería compatible con reducir las cosechas y evitar la deforestación si este aumento en el crecimiento dejara en disponibilidad tierras para estos otros usos (el crecimiento de unos bosques posibilitaría mantener a otros bosques intactos, sin cosechar).

Compensaciones y créditos de carbono

Una compensación de carbono es una reducción en las emisiones de gases de efecto inver-

nadero (o un aumento en el secuestro de carbono) que una entidad realiza; esta entidad puede compensar parte de las emisiones generadas por otra entidad. Así, esta última puede continuar con sus actividades y negocios sin tener que reducir sus propias emisiones. Existe un comercio de derechos de emisión, donde estas compensaciones se compran y venden como “créditos de carbono”. Normalmente los proyectos de compensación están certificados; esto genera confianza en que las compensaciones son reales y permite negociar o vender los créditos de carbono certificados a aquellos que voluntariamente desean reducir sus emisiones o que por ley se ven obligados a hacerlo. En los Estados Unidos, los créditos de carbono forman parte de un mercado voluntario de comercialización y el proceso de certificación varía ampliamente. Europa en cambio ratificó el Protocolo de Kyoto y tiene un mercado de carbono regulado. Algunas de las estrategias vinculadas con el manejo de bosques, como reducir la intensidad de las cosechas, aumentar el crecimiento de los bosques, el uso de bioenergía, la sustitución y la forestación de nuevos bosques, podrían producir una ganancia de créditos de carbono.

Las compensaciones de carbono requieren *adicionalidad*, lo que implica que todo beneficio de carbono sea el resultado directo de una acción deliberadamente llevada a cabo para aumentar el secuestro de carbono. El objetivo es lograr una reducción adicional de las emisiones a lo que sucedería en ausencia de dicha acción, de modo que nadie pague por algo que podría ocurrir de todos modos. Demostrar la adicionalidad de las actividades forestales requiere que se las compare con la línea base de un escenario sin actividad. De este modo, demostrar la adicionalidad de la forestación, la silvicultura urbana y el uso de bioenergía es relativamente sencillo ya que el punto de inicio puede ser cuantificado. Por el contrario, es mucho más complejo demostrarlo en gestiones que intenten reducir las salidas de carbono o aumentar el crecimiento de los bosques, ya que en éstas se deberían monitorear áreas de gran tamaño y por un período de tiempo prolongado, de modo que el aumento en el almacenamiento de carbono sea válido. También es difícil demostrar adicionalidad cuando la estrategia es evitar la deforestación, ya que el almacenamiento de carbono no necesariamente aumenta si los bosques son simplemente conservados.

Muchos comerciantes de créditos de carbono también están preocupados por la *perma-*

nencia del carbono en los bosques, ya que los créditos de carbono asociados a las compensaciones se venden antes de que el proyecto sea implementado por completo.

Un disturbio, una cosecha o un cambio en el uso de la tierra podrían generar pérdidas transitorias del carbono de los bosques. Y si directamente el paisaje se urbanizara, las pérdidas de carbono serían definitivas, ya que en ese caso no sería factible reestablecer el bosque. En términos generales, el nivel de carbono que el paisaje mantenga estará determinado por los disturbios y los intervalos de cosecha y el almacenamiento de carbono del bosque podrá considerarse como permanente siempre y cuando las condiciones climáticas sean las adecuadas.

Lo más complicado en cualquier esfuerzo por obtener beneficios de carbono a través del manejo de bosques es que ocurran cambios imprevistos por fuera de los límites del proyecto, con el riesgo de reducir o eliminar tales beneficios. Por ejemplo, forestar tierras agrícolas en los Estados Unidos podría aumentar la deforestación de otros sitios para cubrir las demandas alimenticias. Subsidar el carbono de los bosques de los Estados Unidos podría disminuir las cosechas y aumentar las importaciones de madera y sus productos derivados, lo que llevaría a un aumento de las cosechas en otros bosques y por ende a una reducción de su carbono.

Si bien las compensaciones y créditos de carbono tienen un papel legal destacado y podrían ser cruciales en los esfuerzos de una sociedad por mitigar el cambio climático, otro tipo de medidas que incrementen el secuestro de carbono podrían ser más simples y confiables que las compensaciones de carbono. Por ejemplo, sería más efectivo pagarle directamente a los dueños de las tierras para que realicen un uso determinado de sus tierras (como lo hace el actual Programa de Conservación de Reservas), y premiar a los que evitan la deforestación. La regulación de la tierra podría también utilizarse para impulsar acciones que secuestren carbono (por ejemplo, disminuir los intervalos de cosecha o facilitar la introducción de árboles en tierras agrícolas).

Medición, monitoreo y verificación de las compensaciones de carbono

Dado que los Estados Unidos no tiene un mercado de carbono regulado, esta sección acerca

del monitoreo y verificación de las compensaciones de carbono está basada en los procesos esbozados para mercados voluntarios. La gestión del carbono comienza con el diseño de un proyecto que ha sido previamente validado por un estudio científico y que propone aumentar la tasa de almacenamiento de carbono de un determinado ecosistema con respecto a su actual tasa (línea base). Una vez que el carbono adicional se acumula, se debe implementar un sistema de mediciones (confiables y aceptadas) y monitoreos para documentar las ganancias de carbono. Luego, aunque no es requisito de todo mercado voluntario, ya que si bien es importante es bastante difícil de probar, muchos de estos proyectos de compensación suelen demostrar que las ganancias son seguras y que no tienen un riesgo de pérdida de carbono asociado. Finalmente, una evaluación independiente confirma que el proyecto ha sido instalado correctamente, que funciona como era lo esperado y que el carbono que informa haber ganado es el correcto.

Medición de carbono a varias escalas

A escala de rodal, a través del uso de inventarios forestales se pueden obtener estimaciones adecuadas (con una exactitud del 20%) del carbono almacenado en árboles, vegetación del sotobosque, madera muerta, mantillo o colchón de detritus. Mejorar estas estimaciones requeriría aumentar los costos de monitoreo. Las mediciones de los reservorios de carbono enterrado son aún más complicadas debido a los mayores costos en muestrear el carbono del suelo y el menor número de ecuaciones disponibles para estimar la biomasa subterránea. Es muy importante evaluar los cambios en el carbono del suelo de los bosques, ya que las cosechas pueden generar pérdidas del 8% del

carbono del suelo mineral y hasta del 30% del horizonte orgánico de los suelos de bosque.

A escala de paisaje, el monitoreo y verificación de los proyectos se realiza a través del uso de sensores remotos. Los sensores remotos brindan información directa acerca de la edad del bosque, tipo de cobertura y disturbios. Con esta información y el uso de modelos ecosistémicos se pueden estimar los cambios en los reservorios de carbono. El monitoreo a escala regional permite conocer el impacto de las gestiones de carbono a gran escala. El *Forest Inventory* (Inventario de bosques) y el *Analysis National Program* (Programa Nacional de Análisis) llevan adelante en forma conjunta un inventario nacional de bosques basado en mediciones a campo y observaciones con sensores remotos de los compartimentos de carbono de todos los bosques. Este inventario estima la edad del bosque, tipos de cobertura y disturbios y aplica modelos para los componentes que son difíciles de medir directamente.

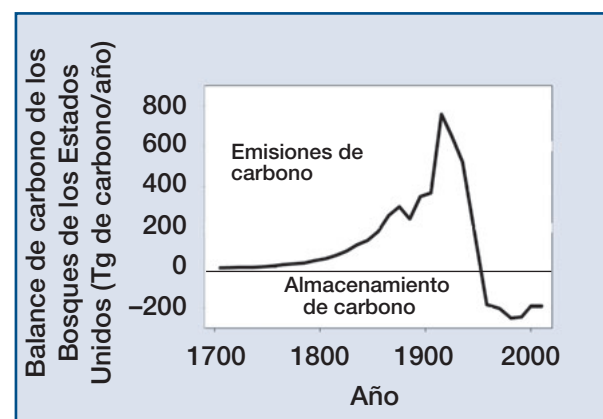
Aplicar un sistema de monitoreo al carbono almacenado en los productos madereros es bastante más complicado. El carbono en estructuras sólidas de madera podría estimarse usando los datos de censos actuales que discriminan la fracción de productos que se importan. También se podrían estimar las tasas de acumulación de todos los productos del bosque con las tasas de producción, reciclado y descarte a los basurales. El uso de bioenergía podría rastrearse a través de estudios que brinden información sobre las medidas implementadas para llevar adelante dicho uso.

¿Cómo deberían medirse los reservorios de carbono?

Dado que los proyectos de almacenamiento de carbono ocurren a varias escalas (rodal, paisaje, regional y nacional) y jurisdicciones, se necesitan múltiples métodos de medición.

Una lista con todos los métodos posibles debería incluir el mínimo número de compartimentos de carbono que se deban medir cuando se utilice un método preciso, como también la frecuencia mínima de muestreo. Cada método tiene un grado inherente de incertidumbre asociado y existe una necesidad práctica de decidir cómo tratar estas incertidumbres en la toma de decisiones. Si utilizamos las estimaciones máximas, podríamos sobrestimar la capacidad de los bosques de almacenar carbono y esto desalentaría las acciones de mitigación en otros sectores.

Figura 13. El balance de carbono de los bosques de los Estados Unidos muestra que el desmonte para un uso agrícola y pastoril, la urbanización y el uso de madera emitió ~42,000 Tg de carbono entre los años 1700 y 1935, y recuperó alrededor de 15,000 Tg entre 1935-2010. (Adaptado de Birdsey y colab. 2006. *Journal of Environmental Quality* 35:1461-1469.)



Dada la necesidad urgente de alcanzar los objetivos planteados de mitigación del cambio climático y el alto riesgo que tienen las sociedades si fracasan en alcanzar dichos objetivos, recomendamos descontar toda estimación de carbono que parezca incierta. A medida que la frecuencia y especificidad de los muestreos aumenten, las incertidumbres posiblemente disminuyan, pero los costos también aumentarán. Algunos grupos individuales o entidades podrían decidir el método a utilizar en cada proyecto en función de la relación costo:beneficio, principalmente comparando los costos económicos con los beneficios potenciales de carbono. Los riesgos potenciales de pérdidas imprevistas de carbono se podrían reducir implementando un sistema de contabilidad nacional que priorizara el almacenamiento de carbono a escala nacional.

Economía del carbono de los bosques

Los créditos de carbono asociados al secuestro de carbono y uso de productos forestales deberían tener un rédito económico igual o mayor a los costos asociados a las estrategias de mitigación implementadas y a los costos de oportunidad asociados a aquellas actividades que ya no se realizarán. Por ejemplo, en la forestación de nuevos bosques, los propietarios de las tierras esperarían recibir una compensación económica por las rentas agrícolas que ya no ganarían, como también por los costos de plantar árboles. También, al prolongar los intervalos de las cosechas, los propietarios necesitarán compensaciones por la reducción de su producción. Un secuestro adicional en los bosques de 200 a 330 teragramos de carbono (equivalente a una compensación de un 13 al 21% de las emisiones de combustible fósil de los Estados Unidos durante el 2003) debería recibir entre \$110 a \$183 por tonelada métrica de carbono o entre 23 y 60 billones de dólares por año. Es decir, el pago de cada tonelada de carbono debe reflejar el valor económico de su uso en ese momento.

A pesar de los grandes costos que parece tener el uso de bosques como estrategia para secuestrar carbono, los costos asociados son significativamente menores que los costos de reducir la misma cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero a través de otros medios, como el sector del transporte y eléctrico. Por ende, los bosques pueden jugar un papel clave al reducir el costo global asociado a la reducción de las emisiones de gases de

efecto invernadero. Los modelos económicos sobre políticas de asuntos climáticos de los Estados Unidos muestran consistentemente que el secuestro de carbono de los bosques y otras actividades de “compensación” pueden disminuir significativamente los costos de cumplir con las regulaciones propuestas.

Cambio climático y otros riesgos asociados al almacenamiento de carbono de los bosques

Es necesario evaluar los costos y beneficios de un potencial aumento en el almacenamiento de carbono de los bosques frente al aumento proyectado en los disturbios debido al cambio climático, ya que los disturbios disminuirían el almacenamiento de carbono. Además, el cambio climático podría empeorar las condiciones para la regeneración de ciertas poblaciones de árboles luego de un disturbio. Finalmente, la población humana aumenta y con ella la urbanización, por lo que los ecosistemas boscosos disminuirán. Dado que se espera que los disturbios aumenten en el futuro, recomendamos estimar con cautela las ganancias potenciales de carbono que se lograrían a través del manejo de los bosques.

Un potencial efecto negativo asociado a un mayor almacenamiento de carbono en los bosques es que a medida que el contenido de carbono aumenta, también aumentan los riesgos de perderlo por un disturbio como el fuego, plaga de insectos, huracanes y tormentas de viento y hielo, debido principalmente al cambio climático. El cambio climático amenaza con aumentar la frecuencia de estos disturbios. Si esto sucede, como lo sugieren algunos estudios empíricos y simulaciones de los Estados Unidos, muchos bosques podrían emitir grandes cantidades de carbono a la atmósfera durante los próximos 50 a 100 años. Es importante recordar que, a escala de paisaje y por un período prolongado, los disturbios no generan una pérdida neta de carbono siempre y cuando el bosque se regenere. Pero, si la frecuencia y/o severidad de los disturbios aumenta sustancialmente, es muy probable que parte del paisaje con los árboles más grandes y antiguos (y que representan un gran reservorio de carbono) disminuya y con esto, el carbono almacenado. El cambio climático también podría aumentar la descomposición de la materia orgánica del suelo, lo que generaría que parte del carbono del suelo, uno de los compartimentos más estables del ecosistema y que contiene alrededor

del 40% del total de carbono de los bosques de los Estados Unidos, se pierda.

El mayor riesgo es que los bosques no se regeneren luego de un disturbio y sean reemplazados por un ecosistema de pastizal o arbustivo, perdiendo aún más carbono en la transición. Esto sucede actualmente en el oeste de los Estados Unidos, en donde luego de una larga historia de fuegos suprimidos, la frecuencia de fuegos ha vuelto a ser alta y el ecosistema natural no se recupera. Si bien se han tomado medidas para reducir los riesgos de fuego, las consecuencias sobre el carbono aún se desconocen. El tiempo de reproducción y crecimiento de ciertas especies y genotipos altamente adaptados a las condiciones actuales podría ser acotado en un escenario de condiciones climáticas cambiantes, por lo que la probabilidad de regeneración de ciertos bosques sería menor.

Conclusiones y Recomendaciones

Los bosques y los productos forestales de los Estados Unidos actualmente compensan entre un 12 y un 19% de las emisiones asociadas al uso de combustible fósil. Esto se debe principalmente a que los bosques se han podido recuperar de la deforestación y cosechas intensas ocurridas en el pasado. Los aumentos en el CO₂ atmosférico y deposiciones de nitrógeno con respecto a los niveles históricos podrían también acelerar el crecimiento de los bosques. Sin embargo no es suficiente aún el conocimiento que tenemos al respecto, ya que el número de trabajos científicos es limitado y existe una gran dificultad en identificar estos efectos en la diversidad de bosques de los Estados Unidos.

¿Por cuánto tiempo los bosques de los Estados Unidos funcionarán como depósitos de carbono? Desde 1940, el crecimiento secundario de los bosques ha recuperado aproximadamente la tercera parte del carbono emitido a la atmósfera a través de la deforestación y las cosechas ocurridas entre los años 1700 y 1935 (Figura 3). Para recuperar las otras dos terceras partes se deberían restablecer los bosques en una gran porción de tierras que hoy en día están bajo un uso agrícola y pastoril. Sin embargo, reforestar esta parte de los Estados Unidos (superficie equivalente a casi todas las tierras al este del río Mississippi) no sería factible desde una perspectiva económica y de seguridad alimentaria. La recuperación actual de los bosques, luego de los desmontes y

de una economía basada en la madera durante todo el siglo XVII y principios del XIX, podría sostener las tasas de almacenamiento actuales por décadas, pero no indefinidamente.

Por otra parte, el almacenamiento de carbono no resuelve el problema. En todo escenario de cambio global, incluso en los más optimistas, la cantidad potencial de carbono que se puede almacenar es finita. Las estrategias que combinan un mayor uso de los productos forestales (como el uso de bioenergía y sustitución) y un mayor almacenamiento de carbono en los ecosistemas forestados con el objetivo de compensar el uso de combustible fósil, probablemente representen los beneficios de carbono más sustentables.

Cada estrategia tiene sus compromisos. Evitar la deforestación y aumentar los intervalos de cosecha en los Estados Unidos podría promover la producción de madera a otros sitios, por lo que no habría un beneficio neto de carbono en la atmósfera. Reestablecer los bosques tiene un gran potencial pero también desplazará ciertos usos actuales como el agrícola y pastoril hacia otros sitios. Aumentar el uso de los productos forestales y bioenergía necesitará de un manejo activo de los bosques y sobre áreas más grandes que las actuales, lo que podría disminuir los reservorios de carbono. La silvicultura intensiva puede aumentar el crecimiento, y a la vez disminuir los flujos de agua y la biodiversidad. Los productos forestales de los basurales puede aumentar el almacenamiento de carbono, pero las emisiones de metano resultantes también contribuyen al calentamiento climático. Reconocer todos estos compromisos será vital para cualquier esfuerzo que promueva el almacenamiento de carbono de los bosques.

Dado que las pérdidas de carbono de los bosques plantean un gran riesgo climático, y el cambio climático podría impedir la regeneración del ecosistema luego de un disturbio, las políticas públicas deberían priorizar la conservación de los bosques y promover la regeneración. Las pérdidas de carbono de los bosques movilizan una gran fracción del carbono secuestrado a la atmósfera, particularmente porque no sólo se pierden árboles, sino también el carbono orgánico del suelo. Debido al cambio climático, al aumento de los disturbios y al continuo crecimiento de la población humana y la urbanización, no todos los bosques actuales perdurarán en el tiempo. Por ende, dado que es muy probable que los patrones climáticos cambien y aumente la frecuencia de los disturbios, y que esto modifique

el hábitat de las especies arbóreas existentes, sería prudente focalizarnos en la regeneración luego de un disturbio de modo de asegurar la conservación de los bosques.

Cada una de las estrategias tiene distintos riesgos y grados de incertidumbre asociados. La conservación, la regeneración y la forestación de bosques tienen un bajo grado de incertidumbre y riesgos asociados a la capacidad de almacenar carbono, si no se consideran los riesgos de pérdida de carbono debido a los disturbios y a la deforestación en otros sitios. Los beneficios asociados al uso de bioenergía y productos forestales de vida larga también son bastante ciertos, siempre y cuando el bosque pueda regenerarse. Prolongar los intervalos de cosecha presenta un riesgo un poco mayor ya que por un lado, los disturbios podrían suceder en los bosques que más carbono acumulan y por el otro, porque las decisiones de mercado pueden cambiar rápidamente la intensidad de las cosechas en función de la tasa de crecimiento de los bosques.

A pesar de los riesgos e incertidumbres, cualquier política que incentive el almacenamiento de carbono en los bosques debería: 1) promover la conservación de los bosques existentes; 2) tener en cuenta las emisiones de otros gases de efecto invernadero (como metano y óxido nitroso) y los cambios biofísicos; 3) tener en cuenta que el manejo y conservación de ciertas áreas podría promover indirectamente las cosechas en otros sitios; 4) reconocer los diversos beneficios ambientales que proveen los bosques, como la biodiversidad, reciclado de nutrientes y protección de cuencas; 5) focalizarse en el almacenamiento de carbono más robusto y certero en todo sistema de compensación; 6) reconocer las dificultades y gastos de rastrear el carbono del bosque, la naturaleza cíclica de crecimiento y regeneración de los bosques y el extenso movimiento de productos forestales a escala global; 7) reconocer que el valor de cualquier crédito de carbono dependerá de la exactitud con que el carbono pueda ser medido y verificado; 8) admitir que el cambio climático y el crecimiento de la población humana aumentarán el potencial de pérdida de bosques y se precisará de proyectos a gran escala para frenar esta tendencia 9) reconocer los compromisos; y 10) entender que el éxito de toda estrategia de mitigación del carbono depende no sólo de la estructura y funcionamiento de los bosques, sino también del comportamiento humano y avances tecnológicos. Finalmente, dado que el CO₂ permanece en la atmósfera por más de

100 años, cualquier acción que evite futuras emisiones debería ser tomada en cuenta lo antes posible.

Un manejo sostenible de los bosques pocas veces se focaliza únicamente en el carbono, ya que el almacenamiento de carbono es un beneficio más entre otros servicios que los ecosistemas boscosos suelen brindar (Nota 2). Como lo hemos discutido más arriba, considerar el almacenamiento de carbono como el principal objetivo del manejo de bosques podría potencialmente poner en riesgo a los otros beneficios de los bosques, por lo que sería una estrategia “miope” focalizarnos en dicho almacenamiento en detrimento de los otros servicios de los ecosistemas.

Lecturas complementarias

- Birdsey, R.A., K.S. Pregitzer, y A. Lucier. 2006. Forest carbon management in the United States: 1600-2100. *Journal of Environmental Quality*. 35: 1461-1469.
- CCSP. 2007. The First State of the Carbon Cycle Report (SOCCR): The North American Carbon Budget and Implications for the Global Carbon Cycle. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research [King, A.W., L. Dilling, G.P. Zimmerman, D.M. Fairman, R.A. Houghton, G. Marland, A.Z. Rose, y T.J. Wilbanks (eds.)]. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center, Asheville, NC, USA, 242 pp.
- Harmon, M.E., A. Moreno, y J.B. Domingo. 2009. Effects of partial harvest on the carbon stores in Douglas-fir/Western hemlock forests: A simulation study. *Ecosystems*. 12: 777-791.
- Hurteau, M.D., G.W. Koch, y B.A. Hungate. 2008. Carbon protection and fire risk reduction: toward a full accounting of forest carbon offsets. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 6: 493-498.
- Jackson, R.B., E.G. Jobbagy, R. Avissar, S.B. Roy, D.J. Barrett, C.W. Cook, K.A. Farley, D.C. le Maitre, B.A. McCarl, y B.C. Murray. 2005. Trading water for carbon with biological sequestration. *Science*. 310: 1944-1947.
- Mitchell, S.R., M.E. Harmon, y K.E.B. O'Connell. 2009. Forest fuel reduction alters fire severity and long-term carbon storage in three Pacific Northwest ecosystems. *Ecological Applications*. 9: 643-655.
- Murray, B.C., B.L. Sohngen, A.J. Sommer,

- B.M. Depro, K.M. Jones, B.A. McCarl, D. Gillig, B. DeAngelo, y K. Andrasko. 2005. Greenhouse gas mitigation potential in U.S. forestry and agriculture, EPA-R-05-006. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs, Washington, D.C.
- Nabuurs, G.J., O. Masera, K. Andrasko, P. Benitez-Ponce, R. Boer, M. Dutschke, E. Elsidig, J. Ford-Robertson, P. Frumhoff, T. Karjalainen, O. Krankina, W.A. Kurz, M. Matsumoto, W. Oyhantcabal, N.H. Ravindranath, M.J. Sanz Sanchez, y X. Zhang. 2007. Forestry. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nowak, D.J. y D.E. Crane. 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*. 116: 381-389.
- Skog, K.E. 2008. Carbon storage in forest products for the United States. *Forest Products Journal*. 58: 56-72.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2008. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2006*. 394 pp.
- Woodbury, P.B., J.E. Smith, y L.S. Heath. 2007. Carbon sequestration in the US forest sector from 1990 to 2010. *Forest Ecology Management*. 241: 14-27.

Agradecimientos

Agradecemos a Noel Gurwick, editor invitado, por sus valiosas sugerencias. Este proyecto estuvo financiado por el convenio "Joint Venture Agreement 08-JV-11221633-248" entre el USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station y la Ecological Society of America. En la versión español, agradecemos la ayuda y valiosos comentarios de Adelia González Arzac.

Acerca del panel de Científicos

Michael G. Ryan, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO 80521 and Graduate Degree Program in Ecology, Colorado State University, Fort Collins, CO 80526

Mark E. Harmon, Department of Forest Ecosystems and Society, Oregon State University, Corvallis, OR 97331

Richard A. Birdsey, USDA Forest Service, Northern Research Station, Newtown Square, PA 19073

Christian P. Giardina, USDA Forest Service, Institute of Pacific Islands Forestry, Hilo, HI 96720

Linda S. Heath, USDA Forest Service, Northern Research Station, Durham, NH 03824

Richard A. Houghton, Woods Hole Research Center, Woods Hole, MA 02540

Robert B. Jackson, Nicholas School of the Environment and Earth Sciences and Department of Biology, Duke University, Durham, NC 27708

Duncan C. McKinley, American Association for the Advancement of Science, Washington, DC 20005

James F. Morrison, USDA Forest Service, Northern Region, Missoula, MT 59807

Brian C. Murray, Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions and Nicholas School of the Environment, Duke University, Durham, NC 27708

Diane E. Pataki, Department of Earth System Science and Department of Ecology & Evolutionary Biology, University of California, Irvine, CA 92697

Kenneth E. Skog, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI 53726

Redacción científica y edición

Christine Frame, Periodista científica

Amanda Mascarelli, Periodista científica

Bernie Taylor, Diseño y compaginación

Acerca de los Issues in Ecology (Tópicos en Ecología)

Los *Issues in Ecology* se diseñaron para comunicar, en un lenguaje comprensible para un público no científico, el consenso de un panel de científicos expertos en temas relevantes para el medio ambiente. Todos los informes se someten a una revisión por pares y deben ser aprobados por el Jefe de editores antes de su publicación. Este informe es una publicación de la Ecological Society of America. El comité editorial de los *Issues in Ecology* no asume responsabilidad alguna por los puntos de vista expresados por los autores en las publicaciones de la ESA.

Jill S. Baron, Jefe de Editores, US Geological Survey and Colorado State University, jill@nrel.colostate.edu

Comité Editorial de Issues in Ecology

Charlene D'Avanzo, Hampshire College
Robert A. Goldstein, Electric Power Research Institute
Noel P. Gurwick, Union of Concerned Scientists
Rachel Muir, US Geological Survey
Christine Negra, the H. John Heinz III Center for Science, Economics, and the Environment
Louis Pitelka, University of Maryland - Center for Environmental Science
Sandy Tartowski, USDA - Agricultural Research Service, Jornada Experimental Range
David S. Wilcove, Princeton University
Kerry Woods, Bennington College

Consultores externos

Jayne Belnap, US Geological Survey
Clifford S. Duke, Ecological Society of America
Robert Jackson, Duke University
Richard Pouyat, USDA - Forest Service

Miembros de la ESA

Clifford S. Duke, Director of Science Programs
Aleta Wiley, Science Programs Assistant

Traducción al castellano:

Patricia Inés Araujo
IFEVA – CONICET – Facultad de Agronomía
– Universidad de Buenos Aires
Av San Martín 4453, Buenos Aires C1417DSE,
Argentina

Revisor de la traducción: Amy T. Austin

Copias adicionales

Toda la serie de *Issues in Ecology*, está disponible en forma gratuita en la dirección electrónica: http://esa.org/science_resources/issues.php. Las copias impresas de este informe y de versiones anteriores se pueden solicitar a través del correo electrónico o contactándose con la ESA:

Ecological Society of America
1990 M Street NW, Suite 700
Washington, DC 20036
(202) 833-8773, esahq@esa.org

