

UN MÉTODO PARA MEDIR EL CARBONO ALMACENADO EN LOS BOSQUES DE MALLECO (CHILE)

Para determinar la importancia de los bosques en los mecanismos del cambio climático mundial, es importante conocer y seguir la evolución del carbono almacenado.

El método que aquí se presenta, puesto a punto en bosques naturales templados de Chile, comprende tres etapas : recopilación de datos y pruebas de tipos de muestreo, inventario sobre los sitios y modelización de datos.

Foto 1. Las especies dominantes son el raulí (*Nothofagus alpina*) y el coigüe (*Nothofagus dombeyi*).
Les espèces dominantes sont le rauli (Nothofagus alpina) et le coigüe (Nothofagus dombeyi).



Aunque los bosques nativos desempeñan un papel importante en el ciclo del carbono, las actividades forestales iniciadas con el anhelo de limitar el cambio climático apuntan principalmente a las plantaciones. Sin embargo, existen métodos de gestión del bosque nativo que pueden tener consecuencias benéficas sobre el efecto de invernadero. Por esa razón, algunos proyectos de manejo forestal ahora integran componentes relativos a la captura del carbono. Es el caso del proyecto de 'Apoyo a la conservación y a la gestión sustentable del bosque nativo en Chile', cofinanciado por la cooperación francesa y coordinado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF, Chile) y el Office National des Forêts (ONF, instituto forestal de Francia).

Evaluar los efectos de diferentes métodos de manejo del bosque nativo sobre el efecto de invernadero requiere poder cuantificar sus consecuencias sobre el ciclo del carbono. Este es el objeto de la metodología que actualmente se desarrolla en la Reserva Nacional (RN) Malleco.

CONTEXTO CIENTÍFICO Y POLÍTICO

La toma de conciencia pública del problema del cambio climático global tuvo lugar en la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro en junio 1992. Entonces, más de ciento cincuenta gobiernos firmaron el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre los Cambios Climáticos, que propone 'estabilizar las concentraciones de gases de efecto de invernadero en la atmósfera a un nivel que impida toda perturbación antrópica peligrosa del sistema climático' (artículo 2).

Entre los gases que producen el efecto de invernadero, el dióxido de carbono (CO₂) es actualmente el más importante. Su concentración en la atmósfera aumentó en un 25% desde el inicio de la era industrial. Este aumento se explica por el crecimiento de dos fuentes antrópicas de emisión del carbono: el consumo de energías fósiles (petróleo, gas, carbón) y los cambios en la utilización de las tierras o las transformaciones de los ecosistemas (en particular la deforestación). Durante los años 80, la primera fuente representaba aproximadamente 5,6 ± 0,5 GtC/año* y la segunda 1,6 GtC/año (DIXON *et al.*, 1994).

Si bien el desequilibrio está esencialmente causado por la combustión del carbono fósil, los ecosistemas son primordiales por su capacidad en llegar a ser pozos de carbono: cuando un bosque crece, resta carbono de la atmósfera. Los bosques son entonces ecosistemas particularmente importantes en términos de stocks (se estima que los bosques mundiales almacenan 80% del carbono de la biosfera aérea y 40% del carbono subterráneo) y en términos de flujo (las modificaciones antrópicas de los bosques tropicales emiten grandes cantidades de carbono en la atmósfera).

Desde la conferencia de Río en 1992, otras negociaciones internacionales se han llevado a cabo, como las de Kioto en diciembre de 1997, que iniciaron las reflexiones sobre los mercados de cuotas de emisión. En esta conferencia, se fijaron objetivos de reducción de emisiones para los países industrializados y diversos instrumentos de flexibilidad fueron propuestos. Estos instrumentos conciernen los países industrializados (llamados del

anexo 1), salvo los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) que asocian países industrializados con países no industrializados. En el marco de los MDL, empresas o países del anexo 1 pueden financiar proyectos en los países que no figuran en el anexo 1 para contribuir a la limitación del cambio climático (GODDARD, 1998). A cambio, aquellos que financien tales proyectos reciben certificados de reducción de emisión (CRE) que se contabilizan como una contribución al cumplimiento de sus objetivos de reducción (KARSENTY, 1999).

Dichos proyectos son esencialmente energéticos (por ejemplo, de desarrollo de energías limpias) y forestales (por ejemplo, de reforestación). Para una reducción de emisión equivalente, un proyecto forestal tiene costos muy inferiores a los de un proyecto energético (KARSENTY, 1999), pero no es posible garantizar la perennidad de un proyecto forestal.

Para que un proyecto pueda ser considerado en los MDL, su contribución a la reducción de emisiones debe comprobarse** y el proyecto no ser financieramente rentable de no existir los MDL (cláusula de adicionalidad). Pero implementar los MDL significa afrontar numerosas dificultades relativas a la definición de escenarios de referencia, medición de las emisiones, cláusula de deperdición***, etc.

En este contexto científico, político e institucional, la elaboración de métodos de medición adaptados a los bosques nativos reviste gran importancia.

** La reducción generada por el proyecto debe ser superior a la reducción sin proyecto, que constituye el escenario de referencia.

*** Un proyecto que reduzca las emisiones en un lugar definido no debe inducir indirectamente un aumento de emisiones en otro lugar.

* GtC/año: giga toneladas de carbono por año.



Foto 2. En algunas zonas de la reserva existen prados de altura en los que habrá que realizar balances de carbono si se quiere evaluar el stock global de la reserva.

Dans quelques zones de la réserve, se trouvent des pâturages d'altitude (prado) qui nécessiteront des bilans de carbone si le stock global de la réserve doit être évalué.

LA RESERVA NACIONAL MALLECO

Desde 1995, se desarrolla en la RN Malleco un proyecto de cooperación entre la CONAF y el ONF, con el apoyo de los ministerios franceses de Relaciones Exteriores y de Agricultura. El objetivo del proyecto es desarrollar un modelo de manejo multifuncional y sustentable del bosque nativo templado chileno. En 1997, tras haberse elaborado el Plan de Ordenación de la Reserva, se inició la ejecución operativa del proyecto.

Un segundo proyecto complementario comenzó en 1999, con el apoyo del Fondo Francés para el Medio Ambiente Mundial (FFEM), que busca aplicar el concepto de Reser-

va de Biosfera al conjunto conformado por la RN Malleco, el Parque Nacional Tolhuaca, y sus zonas de amortiguamiento. El proyecto contempla tres componentes :

- apoyo institucional a la CONAF en el desarrollo del modelo de manejo multifuncional y sustentable del bosque nativo ;
- fortalecimiento de la vocación multifuncional de la RF Malleco (producción, protección y conservación, investigación, desarrollo local, turismo) ;
- investigación aplicada al seguimiento y evaluación de los parámetros del medio ambiente global.

Naturalmente, el presente trabajo se lleva a cabo en el marco de este último componente.

La RN Malleco (16 625 ha) y el Parque Nacional Tolhuaca (6 474 ha), se ubican en la región Araucanía de Chile (IX° región), aproximadamente en los 38° de latitud sur, en la precordillera de los Andes. La altura (de 460 a 2 000 m) determina cuatro tipos de vegetación (colino, montano, subandino y andino). El clima es templado lluvioso con menos de cuatro meses secos por año, precipitaciones anuales promedio del orden de los 3 000 mm y una temperatura mensual promedio que varía entre 11,4 y 12,7° C. La vegetación se compone esencialmente de bosques, las especies principales del dosel superior son *Nothofagus dombeyi*, *Nothofagus alpina* y *Nothofagus obliqua*.

La creciente preocupación por el medio ambiente mundial llevó a una modificación de las leyes y actividades forestales chilenas. En este contexto, son varias las razones por las cuales la RN Malleco fue escogida como zona piloto de un manejo de los bosques chilenos consecuente con las problemáticas ambientales mundiales (efecto de invernadero y biodiversidad).

Primero, la RN Malleco se encuentra en una importante zona forestal y de gran riqueza ecológica. Contiene cinco de los doce tipos forestales chilenos (roble-raulí-coigüe, coigüe-raulí-tepa, araucaria, ñirre, ciprés de cordillera) y de especies que presentan dificultades de conservación. Segundo, la historia de las presiones sobre el bosque es muy representativa del bosque chileno. Tercero, la asociación de una reserva forestal y de un parque nacional le da un interés particular.

OBJETIVOS DEL TRABAJO

En el marco de la aplicación del plan de ordenación multifuncional de la RN Malleco, el plan de seguimiento ambiental contempla objetivos relacionados con el efecto de invernadero.

En efecto, la mayoría del bosque se compone de masas forestales sobremaduras, diversamente degradadas por las acciones antrópicas anteriores. La capacidad de estas masas de actuar como pozos de carbono es probablemente muy débil, como todo bosque maduro no manejado. El proyecto va a favorecer una estrategia de regeneración permanente y una silvicultura dinámica. Estas operaciones quizás permitan aumentar el almacenamiento del carbono en el bosque, sin dejar de producir madera aprovechable y de uso duradero.

El problema consiste en medir los efectos de estas operaciones sobre el balance de carbono y compararlos a escenarios de referencia. Estos escenarios de referencia corresponden a situaciones sin manejo sustentable (por ejemplo, un bosque primario preservado, un bosque primario sobreexplotado, un bosque secundario no manejado o un bosque nativo reemplazado por plantaciones de pino o eucalipto).

Nuestro interrogante específico de investigación es el siguiente : ¿cuál es la influencia de los diferentes manejos forestales en el balance de carbono? El objetivo principal del trabajo será desarrollar una metodología adaptada a esta problemática y a los recursos disponibles.

PROBLEMÁTICA

Tres puntos específicos merecen una reflexión preliminar. El primer punto concierne la definición de las nociones de stock de carbono, de flujo y de stock acumulado. Tomando en cuenta los trabajos actualmente llevados a cabo sobre el cambio climático a escala global, ¿qué indicadores se deben privilegiar en un bosque? El segundo punto concierne el sistema por estudiar. Considerando nuestro interrogante, ¿debemos o no interesarnos únicamente en el ecosistema forestal? El tercer punto es relativo a la forma de enfocar el trabajo en terreno. Considerando el gran número de parámetros existentes en un balance del carbono, ¿cómo poner énfasis en los más importantes?

¿QUÉ DEBEMOS MEDIR?

Las mediciones de terreno dan informaciones sobre el carbono almacenado en la vegetación y en el suelo en un momento dado*. Sin embargo, los trabajos sobre el cambio climático deben hacerse en función de los flujos y de los stocks acumulados.

* Existen también varios métodos de medición directa de los flujos de CO₂ o de vapor de agua que se dan por encima dese dan por sobre los ecosistemas (el método de fluctuaciones turbulentas) pero estos métodos apuntan a investigaciones más fundamentales (la escala de tiempo es corta y la precisión espacial es grande). Para nuestros objetivos, la escala es la del ecosistema y los plazos varios años. Además, los medios requeridos para la medición directa de flujos son muy importantes.



Foto 3. Incluso si la biomasa aérea parece constituir el mayor stock de carbono, es necesario medir otras partes importantes, especialmente suelo y raíces.

Même si la biomasse aérienne des arbres semble constituer le plus gros stock de carbone, il est nécessaire de mesurer d'autres compartiments importants, en particulier le sol et les racines.

La tasa de carbono en la atmósfera aumenta en parte a causa de los cambios de uso de los suelos, como la deforestación. El flujo neto de carbono entre la biosfera y la atmósfera es positivo. Localmente, el flujo neto puede invertirse, como en el caso de un bosque en crecimiento. La contribución de un ecosistema a la reducción o acentuación del cambio climático se mide por los flujos de carbono. Cuando dos medidas de stock de carbono han sido realizadas en un bosque en dos momentos diferentes, la variación del stock indica que ha habido flujos de carbono entre el bosque y el exterior. Estos flujos son de dos tipos : gaseosos o sólidos (mediante los productos exportados del bosque)**.

** No se tomarán en cuenta los flujos de carbono por efecto de erosión de suelos.

El carbono almacenado en un bosque en un momento dado aporta pocas informaciones sobre su contribución al ciclo global del carbono, ya que el proceso de cambio climático se mide con el tiempo.

Como el stock del carbono en un bosque no es definitivo, es necesario asociar la medición del stock a una noción de tiempo. La noción de stock acumulado tiene esa función : es el producto de una cantidad almacenada por la duración del stock y se expresa en 'toneladas.año'. Se aplica tanto a las cantidades almacenadas en la biosfera como a las cantidades liberadas en la atmósfera. Esta noción fue introducida en los mecanismos de desarrollo limpio para permitir una comparación entre las diversas fuentes y pozos de carbono (energía, bosque...).

Los trabajos sobre el cambio climático dan mucha importancia a los flujos de carbono y a las fuentes y pozos, más que al stock acumulado. Por ende, en el marco de los MDL, hay mayor interés por las plantaciones que por los bosques nativos. Las plantaciones, a diferencia de los bosques nativos, se evalúan por su capacidad de absorber carbono atmosférico.

Sin embargo, el alcance del cambio climático es función del stock acumulado de carbono en la atmósfera, pudiendo entonces ser limitado por un importante stock acumulado de carbono en la biosfera. Observemos el siguiente esquema : un bosque (que almacena 50 t C/ha) es talado (el stock cae a 10 t C/ha) y reemplazado por plantaciones (que almacenarán 70 t C/ha después de 30 años). Si razonamos en términos de flujo, entonces la operación es benéfica a partir de 20 años ya que hubo absorción de carbono por la biosfera (figura 1). Después de 30 años, la operación incluso contribuyó a almacenar 20 t/ha adicionales.

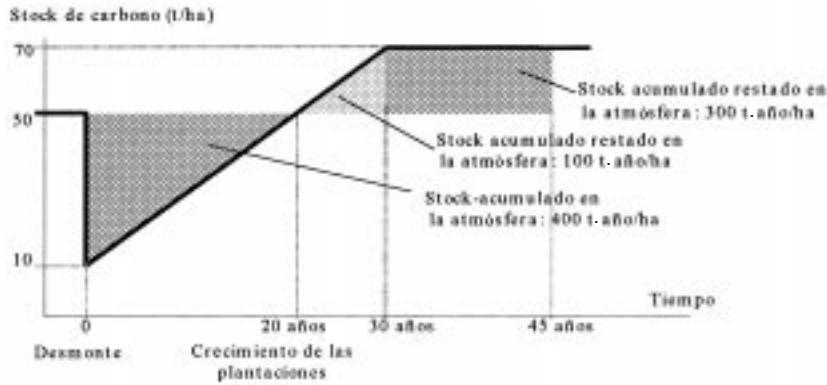


Figura 1. Ejemplo de stock acumulado de carbono.
Un exemple de stock cumulé de carbone.

Pero, durante 20 años, un stock acumulado de carbono en la atmósfera (alrededor de 400 toneladas-año/ha) contribuyó negativamente al cambio climático. Después de 20 años, el stock acumulado en la atmósfera disminuye, es de 300 toneladas-año/ha después de 30 años, y nulo tras 45 años. En términos de stock acumulado, la operación es benéfica sólo después de 45 años (lo sería aún más tarde si tomáramos cuenta de una tasa de actualización: mientras más temprano se capture, más valor tiene la tonelada de carbono).

Considerando lo anterior sobre las nociones de stock, flujo y stock acumulado, nos proponemos razonar en términos de flujos y stock acumulado. De ahí, el interés en conservar bosques nativos y manejarlos en forma duradera para aumentar progresivamente el stock de carbono.

LOS LÍMITES DEL SISTEMA ESTUDIADO

El ejemplo anterior trataba de un bosque no cosechado y los flujos sólidos de carbono no se tomaron en cuenta. En el caso en que se exporten productos del bosque, estos contienen carbono que será liberado más tarde en la atmósfera.

Si los balances del carbono conciernen solamente el ecosistema, las va-

riaciones del stock del carbono en el sistema se explican por los flujos hacia el exterior (la atmósfera, los asentamientos humanos, el mercado, los aserraderos) pero el futuro del carbono exportado importa poco.

Sin embargo, nuestra investigación trata de la influencia de los métodos de gestión sobre el cambio climático. Si el bosque es explotado para madera aserrable, una parte del carbono exportado permanecerá en estado sólido durante años (como madera de estructura o muebles...). Al contrario, si el producto del bosque es utilizado como combustible, el carbono volverá rápidamente a la atmósfera. Estos dos eventos no tienen el mismo efecto sobre el cambio climático.

Como las opciones de ordenamiento y de manejo del bosque tienen consecuencias sobre el porvenir de la madera en el exterior del bosque y, por ende, sobre la liberación de carbono en la atmósfera, proponemos incorporar al sistema estudiado el destino de los productos exportados del bosque.

Otro nivel de trabajo consiste en integrar los efectos 'inducidos'. Por ejemplo, la combustión del combustible de maquinarias de explotación debería ser contabilizada. Asimismo, la producción de leña puede in-

ducir una sustitución de fuentes de energía fósil por madera, induciendo efectos que habría que evaluar.

UN GRAN NÚMERO DE PARÁMETROS

Un balance del carbono involucra numerosos parámetros, desde la cantidad de carbono en la madera seca de un cierto tipo de árbol hasta la tasa de rendimiento del aserradero. Todos no pueden ser determinados con precisión. Un trabajo eficaz debe preocuparse de los más importantes.

En el bosque, el balance del carbono contempla varios sectores: la biomasa aérea viva (compuesta por arbustos y hierbas, por árboles y arbustos que se componen de troncos, de corteza, de ramas y hojas), la biomasa subterránea viva (las raíces), la vegetación muerta y los residuos en descomposición, la hojarasca, los pequeños organismos animales (insectos descomponedores, por ejemplo) y los suelos (cuadro I).

En cuanto al árbol, sus diferentes componentes tienen volúmenes, densidades y tasas en carbono distintas. En un bosque, cada árbol es diferente y los demás sectores son muy heterogéneos. El balance del carbono no puede contemplar la medición de todos los parámetros necesarios para la evaluación del balance de cada sector. Algunas simplificaciones son necesarias.

Los principales esfuerzos de precisión se harán sobre los sectores que más almacenan carbono. El cuadro siguiente presenta el stock de carbono para cuatro tipos de ecosistemas, en toneladas por hectárea.

La participación de los animales no es relevante (entre 0,01 y 0,10%). La hojarasca (de 0,4 a 10,1%) y la materia muerta (de 0,7 a 2,4%) lo son, pero la búsqueda de precisión será menos avanzada en estos sectores. En cambio, los suelos y la bio-

CUADRO I
STOCK DE CARBONO PARA CUATRO TIPOS DE ECOSISTEMAS (AJTAY et al., 1979).

Tipo de bosque	Biomasa vegetal viva (t/ha) (%)	Materias muertas (t/ha) (%)	Hojasasca (t/ha) (%)	Animales (t/ha) (%)	Suelo (t/ha) (%)	Total ecosistema (t/ha)
Bosque tropical	450 (83)	8 (1,5)	2 (0,4)	0,2 (0,04)	80 (15)	540
Bosque templado caducifolio	300 (66)	11 (2,4)	20 (4,4)	0,15 (0,03)	120 (27)	450
Sabana	40 (26)	1 (0,7)	2 (1,3)	0,15 (0,10)	110 (72)	150
Bosque boreal	200 (51)	5 (1,3)	40 (10,1)	0,05 (0,01)	150 (38)	400

masa vegetal viva son sectores esenciales. Para cada sector, a medida que se vaya implementando la metodología, se considerará la relevancia de uno u otro parámetro sobre la precisión global del balance.

La otra parte del balance trata de los productos forestales exportados del bosque, que pueden tener evoluciones muy variadas. La madera puede ser abandonada al borde del camino (y descomponerse lentamente), almacenada en los aserraderos, quemada, aserrada. En el último caso, una parte se convertirá en madera aserrada (y conservará ese estado durante cierto tiempo), y otra parte se convertirá en aserrín o en desecho de aserradero (y se descompondrá lentamente).

Hacer un seguimiento de los productos exportados del bosque no es tarea sencilla. ¿Cuál es la parte de la madera que llega hasta su lugar de transformación? ¿Cuáles son las pérdidas durante el proceso de transformación y qué parte permanece como madera aserrada? ¿Durante cuánto tiempo? ¿Qué parte es quemada rápidamente? ¿Qué

parte se descompone en distintos lugares? ¿Con qué velocidad se descompone? Según las condiciones locales de explotación, el conocimiento del sector maderero será más o menos completo. Deberá hacerse una reflexión para determinar la precisión que podemos esperar obtener.

LOS GRANDES TIPOS DE MÉTODOS

Los métodos existentes para evaluar los stocks de carbono en los bosques son de tres tipos. Los primeros apuntan a evaluaciones globales, en el ámbito de un país o de un continente y están muy alejados de la realidad del terreno. Los segundos se acercan más a las realidades forestales pero se desarrollaron para eludir mediciones de terreno. Su campo de aplicación nos muestra que no se puede dejar de lado un tercer método: las mediciones de terreno. Sin embargo, el marco teórico de los métodos anteriores será útil para acompañar el trabajo en terreno.

LOS ENFOQUES GLOBALES

Algunos métodos han sido desarrollados para generar fácilmente estimaciones de los stocks y flujos de carbono. La ventaja de estos métodos reside en su carácter general y en la sencillez de los datos necesarios. Por estas razones, se utilizaron para trabajos a escala nacional o mundial. Pero estos métodos son muy imprecisos. Utilizados a escala local, no pueden proporcionar más que valores aproximados.

El método del GIEC* (HOUGHTON et al., 1996) es el método global más conocido. Fue desarrollado para llevar a cabo los 'inventarios nacionales de gases de efecto de invernadero' incluso en situaciones de escasez de datos. Existen cuadros de 'valores por defecto' para la mayoría de los parámetros necesarios que substituyen a los datos que faltan.

El GIEC agrupa las fuentes y los pozos de gas de efecto de invernadero en 6 categorías: energía, pro-

* Grupo Intergubernamental sobre la Evolución del Clima.



Foto 4. Los muestreos destructivos requieren la separación del árbol en varias partes (aquí, se separan las ramas grandes de las pequeñas tras la medición).
Les échantillonnages destructifs nécessitent de séparer l'arbre en différents compartiments (ici, les grosses branches sont séparées des petites après la mesure).

cesos industriales, utilización de solventes, agricultura, cambio de uso de la tierra y sector forestal, desechos. La quinta categoría se divide en tres subcategorías, y para ella se presentan métodos de estimación para la conversión de los bosques y praderas, el abandono de tierras explotadas, la evolución del patrimonio forestal y otros stocks de biomasa leñosa, la modificación del carbono del suelo por el cambio de uso de las tierras y su gestión.

Otros estudios utilizan informaciones existentes sobre los stocks de carbono, fundándose en trabajos de terreno realizados en el mundo entero. El objetivo de estos estudios es calcular el stock de carbono en la vegetación sobre áreas de gran extensión (la Tierra, la zona tropical...). Las informaciones se agrupan por zonas bioclimáticas (BROWN, HUGO, 1984) o según clasificaciones de ecosistemas (OLSON *et al.*, 1983). Estudios similares existen para los suelos. Utilizan los análisis de carbono en los suelos agrupándolos por tipos de suelo

(BURINGH, 1984), por tipo de vegetación (SCHLESINGER, 1984) o por zona bioclimática (POST *et al.*, 1982).

Dado el gran número de valores por defecto utilizados en el modelo del GIEC y la variabilidad natural de los parámetros que reemplazan, estamos conscientes de la imprecisión de un tal método.

El uso de las otras metodologías supone que se asimile el ecosistema que se estudia a otro ecosistema del mismo tipo climático o ecológico. Proponemos descartar dichos métodos a favor de métodos más cercanos al terreno.

UTILIZAR LOS DATOS EXISTENTES

Para realizar un balance de carbono en un bosque, es posible utilizar datos existentes, particularmente aquellos proporcionados por los inventarios forestales.

Existen metodologías que, a partir del volumen de madera comercial, permiten estimar el stock de carbono

(mediante factores de expansión y de densidad y considerando que un kilogramo de peso seco de madera contiene medio kilogramo de carbono). También se disponen de ecuaciones matemáticas o de tablas que dan idea de la biomasa total en función esencialmente del diámetro a la altura del pecho o del área basal del árbol (BROWN, 1997).

Las dos metodologías presentadas son bastante simples y permiten valorar inventarios forestales preexistentes. Pero, como para los enfoques globales, su simplicidad les resta precisión. Además, han sido elaboradas para zonas tropicales y no para bosques templados.

Finalmente, otra limitación reside en el hecho que se contabiliza únicamente la biomasa de los árboles de más de 10 cm de diámetro. No se toman en cuenta la vegetación de los estratos inferiores (arbustos, hierbas, lianas...), las raíces, la madera muerta, la hojarasca (hojas muertas, frutos, ramillas).

En los bosques densos, la biomasa del estrato inferior representa menos del 3% de la biomasa de los árboles de más de 10 cm de diámetro*. En bosque tropical, la proporción entre biomasa de las raíces y biomasa aérea varía entre 4 y 230%, de ahí el interés de evaluar este sector (BROWN, 1977).

Las mediciones de terreno tendrán entonces una importancia primordial en la elaboración del balance de carbono.

REALIZAR MEDICIONES DE TERRENO EN EL BOSQUE

La estimación de un stock de biomasa aérea no es fundamentalmente diferente de un inventario forestal. Los árboles presentes en una super-

* En cambio, en bosque poco denso o en bosque secundario, puede ser más importante.



Foto 5. Algunas partes se pesan (aquí, las ramillas) para luego tomar muestras que serán analizadas en el laboratorio (tasa de humedad, tasa de carbono).
Certains compartiments sont pesés (ici, les petites branches), puis des échantillons sont prélevés pour être analysés au laboratoire (taux d'humidité, taux de carbone).

ficie dada deben ser medidos y contabilizados.

BROWN (1977) da algunas recomendaciones para los inventarios destinados a la estimación de la biomasa. Todas las especies, comerciales o no, deben incluirse en el inventario, así como todos los árboles cuyo diámetro a la altura del pecho esté por encima de un diámetro dado (en general, este umbral debe ser inferior a 10 cm; para algunos bosques secos debe ser inferior a 5 cm). El tamaño de los rangos de diámetros no debe superar los 10 cm. Los diámetros grandes no deben ser incluidos dentro de un rango único: deben ser medidos individualmente. Se deben definir el volumen a medir y los métodos al inicio de las operaciones y no alterarlos.

Sobre la base del inventario forestal, que apunta a medir las dimensiones de los árboles de una parcela, se utilizarán correlaciones entre las dimensiones y la biomasa. Éstas serán elaboradas a partir de muestreos destructivos.

Para los suelos, los desechos, la hojarasca y el estrato inferior, existen métodos desarrollados para investigaciones sobre uno u otro sector independientemente del sistema. Proponemos desarrollar un conjunto metodológico coherente que cubra integralmente el sistema estudiado y que se adapte a nuestro interrogante específico de investigación.

UNA METODOLOGÍA APLICADA A MALLECO

Algunos lineamientos de la metodología en proceso de elaboración se presentan a continuación. Esta metodología se articula en tres actividades: las primeras son comunes al conjunto de las acciones; otras serán realizadas en sitios especialmente elegidos; las últimas conciernen la modelización.

LOS TRABAJOS COMUNES

Los trabajos comunes corresponden a un trabajo de síntesis de los datos existentes sobre el bosque de Malleco. Por ejemplo, funciones de volumen han sido desarrolladas anteriormente sobre las principales especies de árboles del bosque. Trataremos de obtener las definiciones de los volúmenes estimados y los datos de base. Algunas informaciones sobre el crecimiento de los árboles y sobre la respuesta a los raleos están disponibles para Malleco o el fundo Jauja, un bosque cercano a la Reserva. Otros datos sobre el sector maderero y el uso de los productos exportados del bosque pueden obtenerse. Es necesario un trabajo de síntesis de estas informaciones.

Otro tipo de trabajo común será relativo al método de muestreo de los suelos. En las investigaciones sobre el cambio climático, las mediciones del carbono en los suelos se suelen hacer en los primeros treinta centímetros. Sin embargo, en andisoles profundos como los de Malleco, el carbono es muy abundante, incluso a más de un metro de profundidad y no se excluye que participe en los intercambios con la atmósfera. Proponemos verificar dos protocolos de medición sobre diferentes sitios (en diferentes estados de desarrollo, incluso en zonas deforestadas). El primer protocolo trabajará hasta una profundidad de un metro y se realizarán muestreos en cada horizonte para determinar la densidad aparente y la tasa de carbono. El segundo protocolo trabajará a una profundidad menor (treinta centímetros por ejemplo) y se efectuarán dos muestreos uno estimará la densidad promedio aparente a una profundidad promedio y otro tomará muestras del suelo sobre toda la profundidad para analizar su tasa de carbono. Según los resultados, podremos ver si la variación del carbono en profundidad es si-



Foto 6. La reserva forestal de Malleco es una zona piloto para el desarrollo de planes de ordenación multifuncionales.
La réserve forestière de Malleco est un site pilote pour le développement de plans d'aménagement multifonctionnels.

gnificante o si se puede establecer una correlación con la variación del carbono a menor profundidad. Una explicación inicial de la variación de las cantidades de carbono podrá realizarse gracias a la compilación de datos sobre la textura de los suelos, sobre la vegetación de lugar del muestreo, según su pendiente o su exposición, etc.

El tercer tipo de trabajo común concierne los muestreos destructivos. Árboles de las dos especies dominantes (raulí o *Nothofagus alpina*, y coigüe o *Nothofagus dombeyi*) serán destruidos y pesados por sectores. Los árboles, de diversas dimensiones, se tomarán de un mismo lugar representativo y de fácil acceso. Antes de su volteo, el árbol será medido y su entorno descrito. Después de su volteo, el árbol será separado por sectores (tronco hasta la primera rama, tallo hasta

un diámetro límite dado, corteza del tallo, ramas hasta un diámetro límite dado, ramillas y hojas). Los sectores serán pesados y el análisis de muestras permitirá estimar su masa volúmica, su tasa de humedad y su tasa de carbono. Un análisis de tronco y tallo se efectuará en paralelo. Después, el árbol será desraizado y sus raíces pesadas. Con la ayuda de los datos obtenidos, trataremos de establecer correlaciones entre las dimensiones de los árboles y las cantidades de carbono en sus diferentes sectores. El valor estadístico de estas correlaciones será estimado. Para empezar, efectuaremos diez muestreos destructivos por especie. Para la parte más importante del árbol (su tronco), el valor estadístico de las correlaciones se reforzará por el uso de datos complementarios provenientes de funciones de volúmenes elaborados anteriormente.

LOS TRABAJOS IN SITU

Para elegir los sitios donde se realizarán balances de carbono, dos en-

foques son posibles. El enfoque diacrónico consiste en hacer múltiples balances en el tiempo para hacer un seguimiento de la evolución del stock de carbono en el tiempo, pero estos balances deberían realizarse con 10 o 20 años de intervalo para que las variaciones de stock sean superiores a los márgenes de error de la medición. Como no es posible considerar un tiempo tan largo, optamos por el método sincrónico. Este último consiste en realizar balances al mismo momento en parcelas diversas. La dificultad reside en la explicación de las diferencias observadas : esto se analizará más en adelante.

Los sitios serán elegidos tomando en cuenta los escenarios de evolución del bosque de Malleco (para escoger sitios que estén en diferentes etapas del escenario) y considerando las etapas de población presentes en el bosque. En cada sitio, se harán mediciones sobre varias parcelas. En las parcelas escogidas, las mediciones se harán privilegiando diferentes escalas de medición (figura 2).

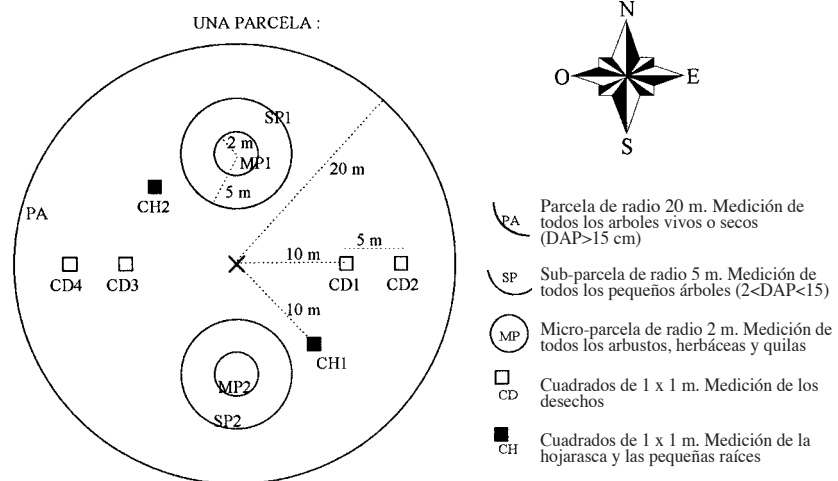


Figura 2. Diferentes escalas de medición, desde la parcela de 20 m de radio hasta el cuadrado de 1 m x 1 m.
Différentes échelles de mesure, depuis la parcelle de 20 m de rayon jusqu'au carré de 1 m de côté.

El principio de muestreo que seguimos es el siguiente : a tasa de muestreo idéntica, es mejor trabajar con un gran número de pequeñas parcelas que con algunas grandes. Sin embargo, las parcelas deben ser suficientemente grandes para posibilitar mediciones. Por esa razón, mediremos los grandes árboles sobre parcelas diferentes de los pequeños árboles. Los muestreos destructivos de los pequeños arbustos, las quilas, y otros herbáceos se harán en miniparcelas. Para los muestreos de los residuos o la hojarasca y las raíces se procederá de la misma manera sobre superficies de un metro cuadrado. Para los suelos, las mediciones serán puntuales. Para cada una de las mediciones, hemos determinado una cantidad de muestreos iniciales. La precisión obtenida será evaluada y nos permitirá saber si son necesarios muestreos adicionales.

LA MODELIZACIÓN

Dos tipos de modelización serán implementados en el transcurso del trabajo. El primer tipo es una modelización de acompañamiento. Apuntará a la precisión y a los costos y será una herramienta de orientación del trabajo de terreno.

En base a las mediciones de terreno, el error de estimación de los stocks se determinará para cada uno de los sectores (tronco, corteza, ramas, ramillas, raíces, herbáceos, arbustos, suelos, desechos, hojarasca). Este error se compondrá de un error debido al muestreo y del error inducido por la utilización de regresiones. A partir de los resultados, sabremos si es necesario efectuar nuevas mediciones para algunos sectores o si se necesitan nuevos muestreos destructivos para aumentar el valor estadístico de las regresiones. Igualmente, una comparación con la precisión esperada en cuanto al sector maderero será posible. La modelización de acompañamiento tratará también de los



Foto 7. La aplicación del método sobre el terreno requiere adaptaciones (aquí, en presencia de troncos huecos, se empleó una variante del análisis de tallos).

L'application de la méthode sur le terrain nécessite des adaptations (ici, en présence de troncs creux, une variante de l'analyse des tiges a été utilisée).

costos y los medios requeridos por un balance de carbono. Antes de iniciar el trabajo, no podemos estimar cuánto tiempo y recursos financieros se necesitan para cada operación. Un seguimiento de estos datos será útil para la aplicación de la metodología en otros lugares.

El segundo tipo de modelización concierne los resultados. Ante todo, basándonos en los balances de carbono realizados en las parcelas, trataremos de explicar los resultados. Las diferencias entre las parcelas se deberán a factores naturales y a la historia de la parcela (las fechas y modalidades de explotación anteriores, por ejemplo), así como a la variabilidad natural inevitable del bosque. Al trabajar sobre los diferentes sectores, trataremos de establecer una correlación entre la historia y los factores del lugar con la cantidad de carbono almacenado.

Después, una modelización tratará de representar la evolución de un stock de carbono. Esta modelización utilizará las cantidades de carbono que habremos medido sobre las diferentes parcelas. Para representar la evolución del stock, utilizaremos los datos de crecimiento de los árboles, de descomposición de los desechos, de la respuesta de los árboles a los raleos, y de la variación del carbono en los suelos. Entonces, se procederá a una simulación de diferentes tipos de manejo forestal, como los raleos, evaluando las cantidades de madera exportada del bosque (y su uso) y la respuesta del bosque a la intervención. Este modelo será una síntesis de las informaciones obtenidas a lo largo de este trabajo y constituirá un elemento de exploración de las diferentes posibilidades de manejo.

Como las operaciones de manejo racionalizado del bosque de Mallico se iniciaron hace poco tiempo, aún es muy temprano para medir su impacto en el stock de carbono. La modelización traerá elementos de respuesta.

CONCLUSIÓN

En el contexto científico y político del cambio climático, la necesidad de métodos de medición de la contribución de los bosques se hace presente. En estas reflexiones preliminares, se presentaron los grandes lineamientos de la metodología. La aplicación en terreno permitirá afinar la metodología y proponer respuestas a las numerosas interrogantes planteadas.

► Bruno LOCATELLI
15, rue Jean Coulezou
34080 MONTPELLIER
Francia

► Sylvain LEONARD
Office National des Forêts
Recreo 868
TEMUCO
Chile

BIBLIOGRAFIA

AJTAY G. L., KETNER P., DUVI-GNEAUD P., 1979.

Terrestrial primary production and phyto-mass. *In* : The global carbon cycle. Degens E. T., Kempe S., Ketner P. (ed.), New York, Estados Unidos, John Wiley. SCOPE, vol. 13, 129-181.

BROWN S., 1997.

Estimating biomass and biomass change of tropical forests : a primer. FAO Forestry Paper, vol. 134, 55 p.

BROWN S., LUGO A. E., 1984.

Biomass of tropical forests : a new estimate based on forest volumes. *Science* (223): 1 290-1 293.

BURINGH P., 1984.

Organic carbon in soils in the world. *In* : The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle : measurement by remote sensing. Woodwell G. M. (ed.), New York, Estados Unidos, John Wiley. SCOPE, vol. 23, 91-109.

DIXON R. K., BROWN S., HOUGHTON R. A. *et al.*, 1994.

Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* (263) : 185-190.

GODARD O., 1998.

Le commerce de permis d'émission de gaz à effet de serre et les enjeux de concurrence industrielle internationale : convient-il d'harmoniser les règles ou d'entraver les échanges ? Colloque Réforme fiscale verte et instruments économiques pour une coopération internationale : le contexte post-Kyoto. Toulouse, Francia, 13 mai 1998.

HOUGHTON J. T., MEIRA FILHO L. G., LIM B. *et al.* (ed.), 1996.

Lignes directrices du GIEC pour les inventaires nationaux des gaz à effet de serre. Bracknell, Reino Unido. GIEC, OCDE.

KARSENTY A., 1999.

Le mécanisme pour un développement propre et les forêts. Bois et Forêts des Tropiques (261) : 80-83.

OLSON J. S., WATTS J. A., ALLISON L. J., 1983.

Carbon in live vegetation of major world ecosystems. Tennessee, Estados Unidos, Oak Ridge National Laboratory, report ORNL-5862, 180 p.

POST W. M., EMANUEL W. R., ZINKE P. J., STANGENBERGER A. G., 1982.

Soil carbon pools and world life zones. *Nature* (298) : 156-159.

SCHLESINGER W. H., 1984.

Methods for appraising changes. *In* : The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle : measurement by remote sensing. Woodwell G. M. (ed.), New York, Estados Unidos, John Wiley. SCOPE, vol. 23, 111-127.

R É S U M É

UNE MÉTHODE POUR MESURER LE CARBONE STOCKÉ DANS LES FORÊTS DE MALLECO (CHILI)

Les négociations internationales sur l'intégration des projets forestiers dans les mécanismes (comme le mécanisme de développement propre) définis à la Conférence des parties de Kyoto, en 1997, soulèvent la question de l'évaluation du carbone stocké. Cet article décrit une méthode de mesure qui a été mise au point dans les forêts naturelles tempérées de Malleco (Chili). Une étude préliminaire sur les grandeurs directement mesurables (flux et stocks) a montré l'intérêt de raisonner en termes de stock cumulé pour comparer les scénarios. Une autre réflexion a porté sur les limites du système et sur l'importance des produits exportés de la forêt. Enfin, la réalisation de ce bilan nécessite de mesurer un grand nombre de paramètres et d'assurer un suivi statistique du travail de terrain. Les trois types de méthodes d'évaluation du stock de carbone (évaluation d'après des études antérieures, régressions appliquées à des données d'inventaires forestiers, approche de terrain) diffèrent par leur proximité du terrain, leur précision et leur coût. A Malleco, des tests méthodologiques seront effectués sur les sols et des échantillonnages destructifs d'arbres seront réalisés. Ensuite, des parcelles représentatives seront choisies pour y réaliser des inventaires. Enfin, des modèles permettront d'accompagner statistiquement le travail de terrain et de représenter la dynamique des stocks de carbone.

Mots-clés : carbone, changement climatique, forêt native, aménagement, biomasse aérienne, arbre, racine, sol, Chili.

A B S T R A C T

A METHOD FOR MEASURING CARBON STORED IN THE MALLECO FORESTS (CHILE)

International negotiations concerning the incorporation of forestry projects in mechanisms (such as the self-development mechanism) defined at the Conference of the Parties in Kyoto, in 1997, address the issue of assessing carbon storage. This paper describes a method for measuring stored carbon as developed in the temperate natural forests of Malleco (Chile). A preliminary line of thinking on directly measurable magnitudes (movement and stocks) has shown, on the basis of simple examples, the advantages of arguing in terms of cumulative stocks in order to compare scenarios. Another line of thought has focused on the limits of the system and the importance of the forest's exported products. Lastly, the implementation of this assessment calls for measuring a large number of parameters and, consequently, providing a statistical follow-up of the field work. The three types of carbon stock assessment methods (assessment based on previous studies, regressions applied to forest inventory data, field approach) differ in their closeness to the terrain, their accuracy and their cost. At Malleco, methodological tests will be carried out on soils and tree-destructive samplings will be taken. Next, lots will be selected on the basis of their representativeness and inventories will be drawn up in them. Lastly, models will make it possible to statistically accompany the field work and represent the dynamics of carbon stocks.

Key words: carbon, climate change, native forest, management, aerial biomass, tree, root, soil, Chile.

R E S U M E N

UN MÉTODO PARA MEDIR EL CARBONO ALMACENADO EN LOS BOSQUES DE MALLECO (CHILE)

Las negociaciones internacionales sobre la integración de los proyectos forestales en los mecanismos (como el mecanismo de desarrollo limpio) definidos en la Conferencia de las Partes (Kioto, 1997), plantean el problema de la evaluación del almacenamiento del carbono. Este artículo describe un método de medición del carbono almacenado que ha sido puesto a punto en los bosques naturales templados de Malleco (Chile). Una reflexión preliminar sobre las magnitudes directamente mensurables (flujo y stocks) mostró, a partir de ejemplos simples, el interés de razonar en cuanto a stocks acumulados para comparar los escenarios. También se ha reflexionado sobre los límites del sistema y la importancia de los productos exportados del bosque. Por último, para realizar este balance es preciso medir un gran número de parámetros y, por tanto, garantizar un seguimiento estadístico del trabajo de terreno. Los tres tipos de métodos de evaluación del stock de carbono (evaluación según los estudios anteriores, regresiones aplicadas a datos de inventarios forestales, aproximaciones de terreno) son diferentes en cuanto a su proximidad al terreno, precisión y costo. En Malleco, se efectuarán pruebas metodológicas en los suelos y se realizarán muestreos destructivos de los árboles. Posteriormente, se elegirán las parcelas en función de su representatividad y se efectuarán los inventarios. Por último, unos modelos permitirán acompañar estadísticamente el trabajo de terreno y representar la dinámica de los stocks de carbono.

Palabras claves: carbono, cambio climático, bosque templado, manejo, biomasa aérea, árbol, raíz, suelo, Chile.

SYNOPSIS

UNE MÉTHODE POUR MESURER LE CARBONE STOCKÉ DANS LES FORÊTS DE MALLECO (CHILI)

BRUNO LOCATELLI, SYLVAIN LEONARD

Les forêts jouent un rôle important dans le cycle du carbone sur le plan mondial et, par conséquent, sur l'effet de serre. Les négociations internationales qui ont suivi la Conférence des parties de Kyoto, en 1997, prévoient de prendre en compte la forêt. Les réflexions actuelles sur les activités forestières dans le but de limiter le changement climatique portent essentiellement sur les plantations. Or, certaines formes de gestion de la forêt naturelle peuvent favoriser le stockage du carbone. C'est l'objet du Plan pilote d'aménagement multifonctionnel et durable de la réserve forestière de Malleco, au Chili. La forêt de cette réserve, située dans la précordillère des Andes, dans la IX^e région du Chili, est tempérée humide. Le projet de Malleco prévoit de suivre l'évolution du carbone stocké en fonction du type d'aménagement forestier.

RÉFLEXIONS PRÉLIMINAIRES

Avant de procéder aux mesures du carbone, une réflexion a été engagée sur quelques aspects d'ordre méthodologique.

- Tout d'abord, l'objet de la mesure a dû être précisé. Les mesures de terrain dans une forêt, à un moment donné, fournissent des informations sur les stocks ou les flux instantanés. À partir des données récoltées sur le stock pendant une certaine période, il est possible de calculer les flux moyens entre l'écosystème et l'atmosphère. Cependant, alors que les travaux sur ce sujet s'intéressent plutôt aux stocks et aux flux, il est primordial d'insister sur la notion de stock cumulé, dans la mesure où le changement climatique est fonction d'une quantité de carbone atmo-

sphérique accumulée au cours du temps. Des exemples montrent l'intérêt, en termes de stocks cumulés, d'aménager la forêt naturelle plutôt que de la remplacer par des plantations.

- Ensuite, la réflexion a porté sur les limites du système à étudier et sur l'importance de prendre en compte la filière bois.
- Enfin, un bilan du carbone nécessite de prendre en compte un grand nombre de paramètres et de les hiérarchiser suivant leur pertinence.

Il existe trois types de méthodes pour évaluer un stock de carbone en forêt.

- Le premier utilise les études antérieures et donne des ordres de grandeur par type de végétation, de sol ou de climat. Les résultats présentent une incertitude assez grande.
- Le deuxième applique des régressions existantes à des données déjà collectées (comme des données d'inventaire forestier). Ces méthodes permettent une évaluation plus adaptée au cas étudié mais l'incertitude n'est généralement pas quantifiable.
- Le troisième type est une approche de terrain. Des méthodes existent pour les sols et la végétation aérienne ou souterraine mais des approches qui englobent ces différents compartiments doivent être développées.

UNE MÉTHODE EN TROIS ÉTAPES

La méthode qui a été mise au point comporte trois grandes étapes.

- Des travaux communs pour recenser les données existantes, tester des métho-

dologies applicables aux sols et effectuer des échantillonnages destructifs sur les espèces les plus courantes. L'objectif est d'établir des corrélations entre les dimensions des arbres et le stock de carbone dans les différentes catégories ou compartiments (racines, tronc, grosses branches, petites branches, feuilles).

- Ensuite, les travaux sur les sites pour des inventaires sur des parcelles sélectionnées. Ils comprennent les mesures d'arbres ainsi que les mesures et les prélèvements dans les autres compartiments de stockage (litière, sol, végétation herbacée). Ces travaux seront réalisés sur des sites qui couvrent la diversité du peuplement actuelle et passée dans l'histoire de la réserve. Les mesures seront effectuées à différentes échelles spatiales suivant le compartiment concerné.

- Une troisième étape s'intéressera à la modélisation. Une modélisation statistique d'accompagnement permettra d'orienter le travail de terrain, en fonction de la pertinence statistique des données déjà collectées. Une modélisation rassemblera les données pour simuler l'évolution d'un stock de carbone.

La méthode, dont les grandes lignes sont décrites ici, est en cours de mise en place à Malleco. Les adaptations nécessaires sur le terrain et les données collectées nous permettront de revenir prochainement sur la méthode proposée. Une étude concernera notamment les relations entre la précision et le coût des mesures. Ces relations joueront un rôle important dans les négociations qui portent sur la place de la forêt dans les mécanismes du changement climatique mondial.