

## **CAPÍTULO 2**

---

# **METODOLOGÍAS GENÉRICAS APLICABLES A MÚLTIPLES CATEGORÍAS DE USO DE LA TIERRA**

## **Autores**

Harald Aalde (Noruega), Patrick Gonzalez (Estados Unidos), Michael Gytarsky (Federación Rusa), Thelma Krug (Brasil), Werner A. Kurz (Canadá), Rodel D. Lasco (Filipinas), Daniel L. Martino (Uruguay), Brian G. McConkey (Canadá), Stephen Ogle (Estados Unidos), Keith Paustian (EE.UU.), John Raison (Australia), N.H. Ravindranath (India), Dieter Schoene (FAO), Pete Smith (Reino Unido), Zoltan Somogyi (Comisión Europea/Hungría), Andre van Amstel (Países Bajos) y Louis Verchot (ICRAF/Estados Unidos)

## Índice

2.2.1	Perspectiva general de la estimación de cambios en las existencias de carbono .....	6
2.2.2	Perspectiva general de la estimación de emisiones de no CO <sub>2</sub> .....	10
2.2.3	Conversión de cambios de existencias de C a emisiones de CO <sub>2</sub> .....	11
2.3.1	Cambio en las existencias de carbono de la biomasa (biomasa aérea y subterránea) .....	12
2.3.2	Cambios de las existencias de carbono en materia orgánica muerta.....	23
2.3.3	Cambios en las existencias de carbono de los suelos.....	32
2.5.1	Inventarios de Nivel 3 basados en mediciones .....	56
2.5.2	Inventarios de Nivel 3 basados en modelos.....	58
	Referencias.....	61

## Ecuaciones

Ecuación 2.1	Cambios en las existencias anuales de carbono para todo el sector AFOLU estimadas como la suma de los cambios en todas las categorías de uso de la tierra .....	7
Ecuación 2.2	Cambios en las existencias anuales de carbono para una categoría de uso de la tierra como la suma de los cambios de cada uno de los estratos dentro de la categoría .....	7
Ecuación 2.3	Cambios en las existencias anuales de carbono para un estrato de una categoría de uso de la tierra como la suma de los cambios de todos los depósitos.....	7
Ecuación 2.4	Cambios en las existencias anuales de carbono de un depósito dado en función de las pérdidas y las ganancias (Método de pérdidas y ganancias) .....	10
Ecuación 2.5	Cambios en las existencias de carbono en un depósito dado según la diferencia anual promedio entre estimaciones en dos momentos diferentes (Método de diferencia de existencias).....	10
Ecuación 2.6	Emisiones de no CO <sub>2</sub> a la atmósfera .....	11
Ecuación 2.7	Cambio anual de las existencias de carbono en biomasa en tierras que permanecen en una categoría en particular de uso de la tierra (Método de pérdidas y ganancias).....	12
Ecuación 2.8	Cambio anual de las existencias de carbono de la biomasa en tierras que permanecen en la misma categoría de uso de la tierra (Método de diferencia de existencias).....	13
Ecuación 2.9	Incremento anual de las existencias de carbono en biomasa en tierras que permanecen en la misma categoría de uso de la tierra.....	16
Ecuación 2.10	Incrementos anuales promedio de la biomasa .....	16
Ecuación 2.11	Reducción anual de las existencias de carbono en biomasa en tierras que permanecen en la misma categoría de uso de la tierra (Método de diferencia de existencias).....	17
Ecuación 2.12	Pérdida anual de carbono en la biomasa por remociones de bosques.....	18
Ecuación 2.13	Pérdida anual de carbono en la biomasa por remociones de madera combustible .....	18
Ecuación 2.14	Pérdidas anuales de carbono en la biomasa debidas a perturbaciones.....	19
Ecuación 2.15	Cambio anual en las existencias de carbono en biomasa en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra (Nivel 2) .....	22

Ecuación 2.16 Cambio inicial en las existencias de carbono en la biomasa de tierras convertidas a otra categoría de tierra.....	22
Ecuación 2.17 Cambio anual en los inventarios de carbono de la materia orgánica muerta.....	24
Ecuación 2.18 Cambio anual en los inventarios de carbono de la madera muerta o la hojarasca (Método de pérdidas y ganancias).....	26
Ecuación 2.19 Cambio anual en las existencias de carbono en madera muerta u hojarasca (Método de diferencia de existencias).....	26
Ecuación 2.20 Carbono anual de la biomasa que se transfiere a materia orgánica muerta.....	27
Ecuación 2.21 Pérdidas anuales de carbono en la biomasa debidas a mortalidad.....	28
Ecuación 2.22 Transferencia anual de carbono a broza.....	28
Ecuación 2.23 Cambio anual en las existencias de carbono en madera muerta y hojarasca debido a la conversión en el uso de la tierra.....	29
Ecuación 2.24 Cambio anual en las existencias de carbono de los suelos.....	33
Ecuación 2.25 Cambio anual en las existencias de carbono orgánico en suelos minerales.....	34
Ecuación 2.26 Pérdida anual de carbono de suelos orgánicos drenados (CO <sub>2</sub> ).....	40
Ecuación 2.27 Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero a causa del fuego.....	48

## Figuras

Figura 2.1 Ciclo de carbono generalizado de los ecosistemas terrestres de AFOLU donde se aprecian los flujos de carbono al y del sistema, así como entre los cinco depósitos dentro del sistema.....	8
Figura 2.2 Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en biomasa en una categoría de uso de la tierra.....	15
Figura 2.3 Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en materia orgánica muerta en una categoría de uso de la tierra.....	25
Figura 2.4 Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en suelos minerales por categoría de uso de la tierra.....	37
Figura 2.5 Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en suelos orgánicos por categoría de uso de la tierra.....	38
Figura 2.6 Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por incendios en una categoría de uso de la tierra.....	50
Figura 2.7 Etapas para desarrollar un sistema de estimación de inventario de Nivel 3 basado en modelos.....	59

## Cuadros

Cuadro 2.1 Ejemplo de una matriz simple (Nivel 2) para los impactos de perturbaciones en depósitos de carbono.....	21
Cuadro 2.2 Valores por defecto del Nivel 1 para existencias de carbono en hojarasca y madera muerta.....	31
Cuadro 2.3 Referencia por defecto (en caso de vegetación nativa) de existencias de c orgánico (SOC <sub>REF</sub> ) para suelos minerales (ton C ha <sup>-1</sup> entre 0 y 30 cm de profundidad).....	36

Cuadro 2.4 Valores de consumo de combustible (materia orgánica muerta más biomasa viva) (ton materia seca <sup>-1</sup> ) provocado por incendios en distintos tipos de vegetación.....	51
Cuadro 2.4 (continuación) Valores de consumo de combustible (materia orgánica muerta más biomasa viva) (ton materia seca <sup>-1</sup> ) provocado por incendios en distintos tipos de vegetación.....	52
Cuadro 2.5 Factores de emisión (g kg <sup>-1</sup> de materia seca quemada) para distintos tipos de quemado. Los valores son medias ± SD y se basan en una revisión exhaustiva de Andreae y Merlet (2001).	53
Cuadro 2.6 Valores de los factores de combustión (proporción de la biomasa combustible previa al incendio consumida) para incendios en diferentes tipos de vegetación.....	54
Cuadro 2.6 (continuación) Valores de los factores de combustión (proporción de la biomasa combustib le previa al incendio consumida) para incendios en diferentes tipos de vegetación.....	55

## Recuadros

Recuadro 2.1 Formulaciones alternativas de la Ecuación 2.25 para los datos de la actividad del Método 1 versus los datos de la actividad de los Métodos 2 o 3 con matrices de transición .....	39
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## **2 METODOLOGÍAS GENÉRICAS APLICABLES A MÚLTIPLES CATEGORÍAS DE USO DE LA TIERRA**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Los métodos para estimar las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero en el Sector de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, del inglés *Agriculture, Forestry and Other Land Use*) se pueden dividir en dos categorías generales: 1) métodos que se pueden aplicar de manera similar para todos los tipos de uso de la tierra (es decir, métodos genéricos para tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales, humedales, asentamientos y otras tierras); y 2) métodos que sólo se aplican a un único uso de la tierra y que se aplican a los datos agregados a nivel nacional, sin especificarse el uso de la tierra. En el Capítulo 2 se presentan fundamentalmente descripciones de metodologías genéricas bajo la categoría (1) para la estimación de los cambios en las existencias de carbono del ecosistema, así como para la estimación de flujos de no CO<sub>2</sub> producidos por el fuego. Estos métodos pueden aplicarse a cualquiera de las seis categorías de uso de la tierra. La información genérica sobre los métodos incluye:

- el marco general para aplicar los métodos en categorías específicas de uso de la tierra;
- la elección de los métodos, incluidos las ecuaciones y los valores por defecto para los métodos de Nivel 1 para estimar los cambios en las existencias de C y en las emisiones de no CO<sub>2</sub>;
- orientación general respecto al uso de métodos de Nivel superior;
- el uso de la Base de datos de factores de emisión (EFDB, del inglés *Emission Factor Data Base*) del IPCC; y
- estimación de la incertidumbre.

Los detalles específicos y la orientación sobre cómo aplicar los métodos para cada una de las categorías de uso de la tierra y de conversión del uso de la tierra, incluida la elección de los factores de emisión, la compilación de los datos de la actividad y la determinación de la incertidumbre, se encuentran en los capítulos sobre categorías específicas de uso de la tierra (véanse los Capítulos 4 a 9). En la orientación sobre cálculos de inventario para cada uso específico de la tierra se hace referencia a este capítulo en cuanto a la descripción de los métodos cuando éstos son genéricos.

### **2.2 MARCO DEL INVENTARIO**

En esta sección se describe un método sistemático para estimar los cambios en las existencias de carbono (y en las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub> relacionadas) producidos por biomasa, materia orgánica muerta y suelos, así como para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero no CO<sub>2</sub> producidas por el fuego. Se incluyen ecuaciones generales que representan el nivel de las categorías y estratos de uso de la tierra, seguidas por una breve descripción de los procesos con ecuaciones más detalladas para los cambios de las existencias de carbono en depósitos específicos por categoría de uso de la tierra. A continuación, se presentan los principios para la estimación de las emisiones de no CO<sub>2</sub> y las ecuaciones en común. Las ecuaciones operativas específicas para estimar emisiones y absorciones en procesos dentro de un depósito o por categoría, que se corresponden directamente con los cálculos de hojas de trabajo, se presentan en las Secciones 2.3 y 2.4.

#### **2.2.1 Perspectiva general de la estimación de cambios en las existencias de carbono**

Para el Sector AFOLU, las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub>, basadas en los cambios en las existencias de C en el ecosistema, se estiman para cada una de las categorías de uso de la tierra (incluyendo tanto las tierras que permanecen en una categoría dada de uso de la tierra como las que pasan a otra categoría de uso de la tierra). Los cambios en las existencias de carbono se resumen en la Ecuación 2.1.

**ECUACIÓN 2.1 CAMBIOS EN LAS EXISTENCIAS ANUALES DE CARBONO PARA TODO EL SECTOR AFOLU ESTIMADAS COMO LA SUMA DE LOS CAMBIOS EN TODAS LAS CATEGORÍAS DE USO DE LA TIERRA**

$$\Delta C_{AFOLU} = \Delta C_{FL} + \Delta C_{CL} + \Delta C_{GL} + \Delta C_{WL} + \Delta C_{SL} + \Delta C_{OL}$$

Donde:

$\Delta C$  = cambio en las existencias de carbono

Los índices se refieren a las siguientes categorías de uso de la tierra:

AFOLU = Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra

FL = Tierras forestales

CL = Tierras de cultivo

GL = Pastizales

WL = Humedales

SL = Asentamientos

OL = Otras tierras

Para cada una de las categorías de uso de la tierra, los cambios en las existencias de carbono se estiman respecto a todos los estratos o subdivisiones de la superficie de la tierra (p. ej. zona climática, ecotipo, tipo de suelo, régimen de gestión, etc., véase el Capítulo 3) seleccionados para una categoría de uso de la tierra (Ecuación 2.2). Los cambios en las existencias de carbono dentro de un estrato dado se estiman considerando los procesos del ciclo de carbono entre los cinco depósitos de carbono, tal como se los define en el Cuadro 1.1 del Capítulo 1. El diagrama de flujo general del ciclo de carbono (Figura 2.1) muestra los cinco depósitos y sus flujos, incluidas las entradas y las salidas del sistema, así como todas las posibles transferencias entre los depósitos. En general, los cambios en las existencias de carbono dentro de un estrato se estiman sumando los cambios de todos los depósitos, como se muestra en la Ecuación 2.3. Por otra parte, los cambios en las existencias de carbono del suelo se pueden desagregar en cambios de existencias de C en suelos minerales y emisiones de suelos orgánicos. También se incluyen, como un depósito adicional, los productos de madera recolectada (PMR).

**ECUACIÓN 2.2 CAMBIOS EN LAS EXISTENCIAS ANUALES DE CARBONO PARA UNA CATEGORÍA DE USO DE LA TIERRA COMO LA SUMA DE LOS CAMBIOS DE CADA UNO DE LOS ESTRATOS DENTRO DE LA CATEGORÍA**

$$\Delta C_{LU} = \sum_i \Delta C_{LU_i}$$

Donde:

$\Delta C_{LU}$  = cambios en las existencias de carbono para una categoría de uso de la tierra (LU, del inglés *land use*) según lo definido en la Ecuación 2.1.

$i$  = indica un estrato o una subdivisión específicos dentro de la categoría de uso de la tierra (por combinación de especies, zonas climáticas, ecotipos, regímenes de gestión, etc., véase el Capítulo 3),  $i = 1$  a  $n$ .

**ECUACIÓN 2.3 CAMBIOS EN LAS EXISTENCIAS ANUALES DE CARBONO PARA UN ESTRATO DE UNA CATEGORÍA DE USO DE LA TIERRA COMO LA SUMA DE LOS CAMBIOS DE TODOS LOS DEPÓSITOS**

$$\Delta C_{LU_i} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} + \Delta C_{HWP}$$

Donde:

$\Delta C_{LU_i}$  = cambios en las existencias de carbono para un estrato de una categoría de uso de la tierra

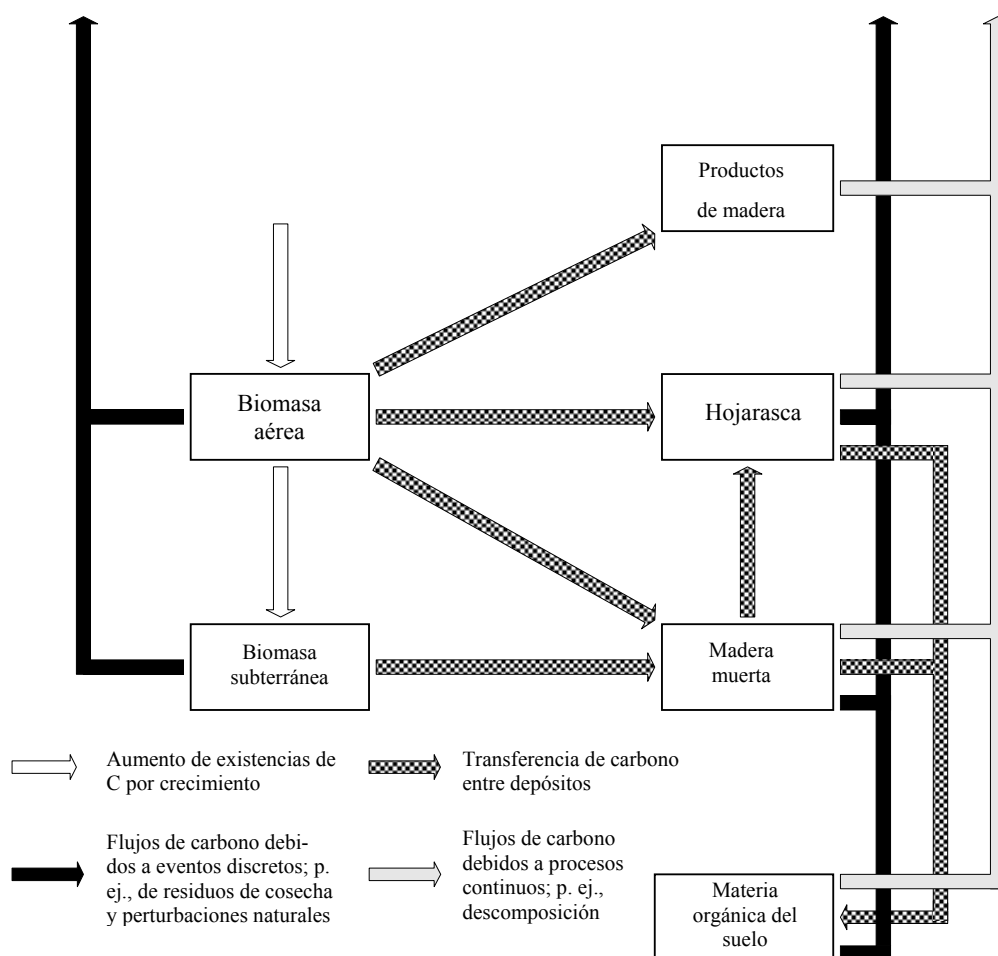
Los subíndices se refieren a los siguientes depósitos de carbono:

AB = biomasa aérea

- BB = biomasa subterránea
- DW = madera muerta
- LI = hojarasca
- SO = suelos
- PMR = productos de madera recolectada

La forma de estimar los cambios en los depósitos y los flujos de carbono depende de la disponibilidad de datos y modelos, así como de los recursos y de la capacidad para recopilar y analizar información adicional (Véase el Capítulo 1, Sección 1.3.3 respecto al análisis de las categorías principales). En el Cuadro 1.1 del Capítulo 1 se esboza cuáles son los depósitos pertinentes para cada categoría de uso de la tierra respecto a los métodos del Nivel 1, incluidas las referencias cruzadas a cuadros de generación de informes. Según las circunstancias del país y de cuáles sean los niveles elegidos, quizá no puedan estimarse los cambios de las existencias de todos los depósitos que se indican en la Ecuación 2.3. Dadas las limitaciones a la hora de derivar conjuntos de datos por defecto que sirvan de base para la estimación de algunos cambios de existencias, los métodos del Nivel 1 incluyen varias hipótesis con propósitos de simplificación:

**Figura 2.1** Ciclo de carbono generalizado de los ecosistemas terrestres de AFOLU donde se aprecian los flujos de carbono al y del sistema, así como entre los cinco depósitos dentro del sistema.





- se supone que los cambios en las existencias de C de la biomasa subterránea equivalen a cero bajo el Nivel 1 (bajo el Nivel 2, pueden usarse datos específicos de proporciones entre biomasa subterránea y aérea para estimar los cambios en las existencias subterráneas);
- a menudo, bajo el Nivel 1, los depósitos de madera muerta y de hojarasca se agrupan como «materia orgánica muerta» (véase lo analizado más adelante); y
- se supone que las existencias de materia orgánica son equivalentes a cero para las categorías de uso de la tierra, a excepción de las forestales, bajo el Nivel 1. Para las tierras forestales convertidas a otros usos, los valores por defecto para estimar las existencias de carbono en la materia orgánica muerta se presentan en el Nivel 1.

El ciclo de carbono incluye cambios en las existencias de carbono debidos a procesos continuos (a saber, crecimiento, desgaste) y a eventos diferenciados (es decir, perturbaciones como cosechas, incendios, ataques de insectos, cambios en el uso de la tierra y otros). Los procesos continuos pueden afectar a las existencias de carbono de todas las áreas año tras año, mientras que los eventos diferenciados (es decir, las perturbaciones) producen emisiones y redistribuyen el carbono del ecosistema en áreas específicas (es decir, donde se produce la perturbación) y en el año en el que se produce el evento.

Las perturbaciones pueden también tener efectos de larga duración, como la desintegración de árboles derribados por el viento o quemados. En pro de la practicidad, en los métodos del Nivel 1 se supone que todas las emisiones post-perturbaciones (a excepción de la remoción de productos de madera recolectada) se estiman como parte del evento de perturbación; es decir, en el año de la perturbación. Por ejemplo, en lugar de estimarse la degradación de la materia orgánica muerta que queda después de una perturbación durante varios años, todas las emisiones post-perturbación se estiman en el año del evento.

Bajo el Nivel 1, se supone que la velocidad promedio de transferencia a materia orgánica muerta (madera muerta y hojarasca) es equivalente a la velocidad promedio de transferencia de materia orgánica muerta, por lo que el cambio neto de las existencias es nulo. Este supuesto significa que no es necesario cuantificar las existencias de carbono en la materia orgánica muerta (madera muerta y hojarasca) para el Nivel 1 en lo referido a tierras que permanecen en una categoría dada de uso de la tierra<sup>1</sup>. La razón que sustenta este método es que las existencias de materia orgánica muerta, en particular la madera muerta, son muy variables y específicas del sitio, según el tipo y la edad del bosque, de los antecedentes en cuanto a perturbaciones y de cómo se lo gestione. Además, los datos de que se dispone sobre descomposición de restos leñosos brutos son escasos y, por ende, se consideró que no se pueden desarrollar factores y estimaciones de incertidumbre por defecto que resulten aplicables a nivel mundial. Se aconseja a los países que experimentan cambios significativos en los tipos de bosques, en perturbaciones o regímenes de gestión de sus bosques que desarrollen datos locales para estimar el impacto de estos cambios empleando las metodologías de Niveles 2 o 3 y que declaren los cambios resultantes en las existencias de carbono y en las emisiones y absorciones de no CO<sub>2</sub>.

Todas las estimaciones de cambios en las existencias de carbono, a saber, crecimiento, transferencias internas y emisiones, son en unidades de carbono para que todos los cálculos resulten coherentes. Inicialmente, los datos sobre existencias, incrementos, cosechas, etc. en la biomasa pueden estar en unidades de materia seca y deberán convertirse en toneladas de carbono para todos los cálculos subsiguientes. Hay dos métodos muy diferentes e igualmente válidos para estimar los cambios de las existencias: 1) el método basado en los procesos, por el que se estiman el balance neto de los agregados a las existencias de carbono y las absorciones de éste; y 2) el método basado en las existencias, por el que se estima la diferencia en existencias de carbono entre dos momentos diferentes.

Los cambios anuales en las existencias de carbono de cualquier depósito pueden estimarse aplicando el método basado en los procesos de la Ecuación 2.4, por la que se establece que se puede aplicar el *Método de pérdidas y ganancias* a todas las pérdidas y ganancias de carbono. Las ganancias pueden atribuirse al crecimiento (aumento de la biomasa) y a la transferencia de carbono de otro depósito (p. ej. transferencia de carbono del depósito de carbono de la biomasa viva al depósito de materia orgánica muerta, debida a la cosecha o a perturbaciones naturales). Las ganancias se marcan siempre con un signo positivo (+). Las pérdidas pueden atribuirse a transferencias de carbono de un depósito a otro (p. ej. el carbono contenido en la broza durante una operación de cosecha es una pérdida del depósito de biomasa aérea), o las emisiones debidas a degradación, cosecha, quemado, etc. Las pérdidas se marcan siempre con un signo negativo (-).

<sup>1</sup> Las emisiones de las existencias de C en la hojarasca se contabilizan bajo el Nivel 1 como conversión de tierras forestales a otros usos de la tierra.

**ECUACIÓN 2.4 CAMBIOS EN LAS EXISTENCIAS ANUALES DE CARBONO DE UN DEPÓSITO DADO EN FUNCIÓN DE LAS PÉRDIDAS Y LAS GANANCIAS (MÉTODO DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS)**

$$\Delta C = \Delta C_G - \Delta C_L$$

Donde:

$\Delta C$  = cambio en las existencias anuales de carbono del depósito, ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_G$  = ganancia anual de carbono, ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_L$  = pérdida anual de carbono, ton C año<sup>-1</sup>

Nótese que las absorciones de CO<sub>2</sub> son transferencias de la atmósfera a un depósito, mientras que las emisiones de CO<sub>2</sub> son transferencias de un depósito a la atmósfera. No todas las transferencias implican emisiones o absorciones, ya que toda transferencia de un depósito a otro es una pérdida del depósito donante, pero también una ganancia de igual cantidad para el depósito que la recibe. Por ejemplo, una transferencia del depósito de biomasa aérea al de madera muerta es una pérdida para el depósito de biomasa aérea y una ganancia de la misma magnitud para el depósito de madera muerta, lo que no va a provocar, necesariamente, una emisión de CO<sub>2</sub> inmediata a la atmósfera (según el Nivel que se utilice).

Al método utilizado en la Ecuación 2.4 se le llama *Método de pérdidas y ganancias* porque incluye todos los procesos que traen aparejados cambios en un depósito. A un método alternativo basado en las existencias se le llama *Método de diferencia de existencias* y se lo puede utilizar cuando las existencias de carbono de depósitos pertinentes se miden en dos momentos diferentes para determinar los cambios en las existencias de carbono, como se representa en la Ecuación 2.5.

**ECUACIÓN 2.5 CAMBIOS EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN UN DEPÓSITO DADO SEGÚN LA DIFERENCIA ANUAL PROMEDIO ENTRE ESTIMACIONES EN DOS MOMENTOS DIFERENTES (MÉTODO DE DIFERENCIA DE EXISTENCIAS)**

$$\Delta C = \frac{(C_{t_2} - C_{t_1})}{(t_2 - t_1)}$$

Donde:

$\Delta C$  = cambio en las existencias anuales de carbono del depósito, ton C año<sup>-1</sup>

$C_{t_1}$  = existencias de carbono del depósito en el momento  $t_1$ , ton de C

$C_{t_2}$  = existencias de carbono del depósito en el momento  $t_2$ , ton de C

Si se estiman los cambios en las existencias de carbono en base a hectáreas, entonces el valor se multiplica por el total de la superficie dentro de cada estrato para obtener la estimación del cambio en las existencias del depósito. En algunos casos, los datos de la actividad pueden estar en forma de totales por país (p. ej. madera recolectada), en cuyo caso las estimaciones de cambios de existencias para ese depósito se obtienen directamente de los datos de la actividad una vez aplicados los factores apropiados para la conversión en unidades de masa de C. Cuando se emplea el Método de diferencia de existencias para una categoría específica de uso de la tierra, es importante asegurarse de que la superficie de tierra de esa categoría sea idéntica en los momentos  $t_1$  y  $t_2$ , a fin de evitar la confusión entre estimaciones de cambios de existencias con los de cambios de superficie.

El método de procesamiento se presta para tácticas de modelización en las que se emplean coeficientes derivados de datos de investigación empírica. Éstos van a suavizar la variabilidad interanual en mayor medida que el método de cambio de existencias que se basa en la diferencia de estimaciones de existencias entre dos momentos diferentes. Ambos métodos son válidos siempre que sirvan para representar las verdaderas perturbaciones y las tendencias que varían continuamente, y se los puede verificar mediante comparaciones con las mediciones reales.

## 2.2.2 Perspectiva general de la estimación de emisiones de no CO<sub>2</sub>

Las emisiones de no CO<sub>2</sub> se derivan de una variedad de fuentes, incluidas las emisiones de suelos, ganado y estiércol, y de la combustión de biomasa, madera muerta y hojarasca. En contraposición a la forma en la que se

estiman las emisiones de CO<sub>2</sub> a partir de los cambios en las existencias de la biomasa, habitualmente, la estimación de los gases de efecto invernadero de no CO<sub>2</sub> implica una velocidad de emisión desde una fuente directamente a la atmósfera. En general, la velocidad (Ecuación 2.6) está determinada por un factor de emisión para un gas (p. ej. CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) y una categoría de fuente específicos, así como por una zona (p. ej. por suelo o superficie quemados), población (p. ej. ganado) o masa (p. ej. biomasa o estiércol) que define a la fuente de emisión.

**ECUACIÓN 2.6 EMISIONES DE NO CO<sub>2</sub> A LA ATMÓSFERA**

$$Emisión = A \bullet EF$$

Donde:

Emisión = emisiones de no CO<sub>2</sub>, ton gas no CO<sub>2</sub>

A = datos de la actividad relacionados con la fuente de emisión (puede ser superficie, cantidades de animales o unidad de masa, según el tipo de fuente)

EF = factor de emisión para un gas y una categoría de fuente específicos, ton por unidad de A

Muchas de las emisiones de gases de efecto invernadero no CO<sub>2</sub> se asocian a un uso específico de la tierra (p. ej. las emisiones de CH<sub>4</sub> del arroz) o es típico que se estimen a partir de datos agregados a nivel nacional (p. ej. las emisiones de CH<sub>4</sub> del ganado y las de N<sub>2</sub>O de suelos gestionados). En los casos en los que la fuente de emisión se asocia con un único uso de la tierra, la metodología para esa emisión se describe en el capítulo destinado a esa categoría específica de uso de la tierra (p. ej. el metano del arroz en el Capítulo 5 sobre tierras de cultivo). Las emisiones que suelen basarse en datos agregados se analizan en capítulos por separado (p. ej. el Capítulo 10 sobre emisiones relacionadas con el ganado y el Capítulo 11 sobre emisiones de suelos gestionados y emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por aplicaciones de enclado y urea). En este capítulo se describen solamente los métodos para estimar las emisiones de no CO<sub>2</sub> (y de CO<sub>2</sub>) procedentes de la combustión de biomasa, lo que puede producirse en varias categorías diferentes de uso de la tierra.

### 2.2.3 Conversión de cambios de existencias de C a emisiones de CO<sub>2</sub>

A los efectos de la declaración, los cambios de las categorías de existencias de C (que impliquen transferencias a la atmósfera) se pueden convertir en unidades de emisión de CO<sub>2</sub> multiplicando el cambio en las existencias de C por -44/12. En los casos en que hay una cantidad significativa de cambios en las existencias de carbono que tiene lugar por emisiones de CO y CH<sub>4</sub>, entonces estas emisiones de carbono no CO<sub>2</sub> deben restarse de las emisiones o absorciones de CO<sub>2</sub> estimadas utilizando los métodos provistos para la estimación de estos gases. Cuando realicen tales estimaciones, los compiladores del inventario deben determinar cada una de las categorías para asegurar que este carbono no esté ya cubierto en las hipótesis y aproximaciones realizados al estimar las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Es de hacer notar que no todos los cambios de existencias se corresponden con una emisión. La conversión de C en CO<sub>2</sub> se basa en la relación de pesos moleculares (44/12). El cambio de signo (-) se debe a la convención de que los aumentos de existencias de C, es decir los cambios de existencias positivos (+), representan una absorción (o emisión «negativa») de la atmósfera, mientras que las reducciones en las existencias de C, es decir los cambios negativos (-) en existencias, representan una emisión positiva a la atmósfera.

## 2.3 MÉTODOS GENÉRICOS PARA EMISIONES Y ABSORCIONES DE CO<sub>2</sub>

Como se señalara en la Sección 2.2, generalmente, las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub> dentro del Sector AFOLU se estiman sobre la base de los cambios en las existencias de carbono del ecosistema. Éstos incluyen la biomasa aérea y subterránea, la materia orgánica muerta (a saber, la madera muerta y la hojarasca), y la materia orgánica del suelo. Las pérdidas netas de las existencias de carbono de todo el ecosistema se utilizan para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, mientras que las ganancias netas de las existencias de carbono de todo el ecosistema se emplean para estimar la absorción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Las transferencias entre depósitos pueden tenerse en cuenta cuando resulte apropiado. Los cambios en las existencias de carbono pueden estimarse mediante métodos de inventario directo o por modelos de proceso. Cada una de las existencias o depósitos de C pueden darse en cualquiera de las categorías de uso de la tierra y de ahí que se describan aquí los atributos

generales de los métodos aplicables a cualquiera de tales categorías. En casos específicos, las pérdidas de existencias o depósitos de carbono pueden llevar implícitas emisiones de gases no CO<sub>2</sub> como metano, monóxido de carbono, carbono orgánico volátil diferente del metano y otros. Los métodos para la estimación de emisiones de estos gases se presentan en la Sección 2.4. Es una *buena práctica* verificar la total cobertura de las emisiones de CO<sub>2</sub> y no CO<sub>2</sub> debidas a pérdidas en las existencias o depósitos de carbono, a fin de evitar omisiones o el cómputo doble. Los detalles específicos respecto a la aplicación de estos métodos dentro de una categoría de uso de la tierra en particular se suministran bajo los respectivos usos de la tierra en los Capítulos 4 a 9.

### 2.3.1 Cambio en las existencias de carbono de la biomasa (biomasa aérea y subterránea)

La biomasa vegetal constituye un volumen significativo en cuanto a existencias de carbono en muchos ecosistemas. La biomasa está presente en las partes aérea y subterránea de las plantas anuales y de las perennes. La biomasa relacionada con las plantas herbáceas anuales y perennes (es decir, no maderera) es relativamente efímera; es decir, decae y se regenera anualmente o cada pocos años. Por lo tanto, las emisiones por descomposición se compensan con las absorciones debidas a la regeneración, lo que hace que, en general, las existencias generales netas de C sean bastante estables en el largo plazo. Es por ello que los métodos se centran en los cambios de existencias de la biomasa relacionados con las plantas y los árboles madereros, en la que se pueden acumular grandes cantidades de carbono (hasta cientos de toneladas por hectárea) durante su vida. Es factible que el cambio en las existencias de carbono en biomasa de las tierras forestales constituya una subcategoría importante, dados los flujos sustanciales debidos a la gestión y la cosecha, a perturbaciones naturales, a la mortalidad natural y a la regeneración de los bosques. Además, a menudo, las conversiones en el uso de la tierra de tierras forestales a otros usos de la tierra traen como resultado una pérdida sustancial de carbono del depósito de biomasa. Los árboles y las plantas madereras pueden darse en cualquiera de las seis categorías de usos de la tierra, aunque las existencias más grandes en la biomasa son generalmente las de las tierras forestales. A los efectos del inventario, los cambios en las existencias de C en la biomasa se estiman para (i) las tierras que permanecen en la misma categoría de uso de la tierra y (ii) la tierra que se convierte a una nueva categoría de uso de la tierra. La convención sobre declaración es que todas las emisiones y absorciones relacionadas con el cambio de uso de la tierra deben hacerse en la nueva categoría de uso.

#### 2.3.1.1 TIERRA QUE PERMANECE EN LA MISMA CATEGORÍA DE USO

La Ecuación 2.3 incluye los cinco depósitos de carbono de los cuales se requieren estimaciones de cambio de existencias. En esta sección se presentan los métodos para estimar las ganancias, las pérdidas y los cambios netos de carbono en biomasa. Las ganancias incluyen el crecimiento de la biomasa en sus componentes aéreos y subterráneos. Las pérdidas están clasificadas en talas o cosechas madereras, recogida de madera combustible y pérdidas por perturbaciones naturales en tierras gestionadas, tales como incendios, ataques de insectos y fenómenos meteorológicos extremos (p. ej. huracanes, inundaciones). Se suministran dos métodos para la estimación de los cambios en las existencias de carbono en biomasa.

**El Método de pérdidas y ganancias** requiere que la pérdida de carbono de la biomasa se reste de la ganancia de carbono (Ecuación 2.7). Esto sustenta el método de Nivel 1, para el cual se suministran, en este Volumen, valores por defecto para el cálculo de incremento y pérdidas para la estimación de los cambios de existencias en la biomasa. Hay métodos de nivel superior que emplean datos específicos del país para estimar los índices de pérdidas y ganancias. Para todos los niveles, estas estimaciones requieren datos de la actividad específicos de cada país, aunque para el Nivel 1, estos datos pueden obtenerse de las bases de datos compiladas a nivel mundial (p. ej. estadísticas de la FAO).

**ECUACIÓN 2.7**  
**CAMBIO ANUAL DE LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN BIOMASA**  
**EN TIERRAS QUE PERMANECEN EN UNA CATEGORÍA EN PARTICULAR DE USO DE LA TIERRA**  
**(MÉTODO DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS)**

$$\Delta C_B = \Delta C_G - \Delta C_L$$

Donde:

$\Delta C_B$  = cambio anual en las existencias de carbono de la biomasa (la suma de los términos de biomasa aérea y subterránea de la Ecuación 2.3) para cada subcategoría de tierra, considerando la superficie total, ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_G$  = aumento anual de las existencias de carbono debido al crecimiento de la biomasa para cada subcategoría de tierra, considerando la superficie total, ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_L$  = reducción anual de las existencias de carbono debida a la pérdida de biomasa para cada subcategoría de tierra, considerando la superficie total, ton C año<sup>-1</sup>

Los cambios en las existencias de C en la biomasa para las tierras que permanecen en la misma categoría de uso de la tierra (p. ej. *Tierras forestales que permanecen como tales*) se basan en estimaciones de las pérdidas y ganancias anuales en las existencias en biomasa. Este método puede ser adoptado por los países que emplean cualquiera de los tres niveles. El método puede aplicarse en los países que no tienen sistemas de inventarios nacionales diseñados para estimar las existencias en la biomasa forestal. Se suministran datos por defecto en los capítulos por categorías de uso de la tierra para los compiladores de inventarios que no tengan acceso a datos específicos del país. También se han desarrollado hojas de trabajo utilizando los métodos y las ecuaciones (Anexo 1).

**El Método de diferencia de existencias** requiere inventarios de las existencias de carbono en biomasa para una superficie de tierra dada, en dos momentos diferentes. El cambio anual en la biomasa es la diferencia entre las existencias de biomasa en el momento  $t_2$  y en el momento  $t_1$ , dividido por la cantidad de años transcurridos entre las existencias (Ecuación 2.8). En algunos casos, los datos fundamentales sobre la biomasa pueden estar en forma de datos sobre volumen de madera, por ejemplo, obtenidos de estudios forestales, en cuyo caso se suministran factores para convertir el volumen de madera en unidades de masa de carbono, como se indica en la Ecuación 2.8.b.

**ECUACIÓN 2.8**

**CAMBIO ANUAL DE LAS EXISTENCIAS DE CARBONO DE LA BIOMASA**  
**EN TIERRAS QUE PERMANECEN EN LA MISMA CATEGORÍA DE USO DE LA TIERRA (MÉTODO DE**  
**DIFERENCIA DE EXISTENCIAS)**

$$\Delta C_B = \frac{(C_{t_2} - C_{t_1})}{(t_2 - t_1)} \quad (a)$$

donde:

$$C = \sum_{i,j} \{A_{i,j} \cdot V_{i,j} \cdot BCEF_{S_{i,j}} \cdot (1 + R_{i,j}) \cdot CF_{i,j}\} \quad (b)$$

Donde:

$\Delta C_B$  = cambio anual en las existencias de carbono de la biomasa (la suma de los términos de biomasa aérea y subterránea de la Ecuación 2.3) en tierras que permanecen en la misma categoría (p. ej. *Tierras forestales que permanecen como tales*), ton C año<sup>-1</sup>

$C_{t_2}$  = total de carbono en biomasa para cada subcategoría de tierra en el momento  $t_2$ , ton de C

$C_{t_1}$  = total de carbono en biomasa para cada subcategoría de tierra en el momento  $t_1$ , ton de C

$C$  = total de carbono en biomasa para el período  $t_1$  a  $t_2$

$A$  = superficie de tierra que permanece en la misma categoría de uso de la tierra, ha (véase la nota a continuación)

$V$  = volumen de las existencias venales en crecimiento, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>

$i$  = zona ecológica  $i$  ( $i = 1$  a  $n$ )

$j$  = dominio climático  $j$  ( $j = 1$  a  $m$ )

$R$  = relación entre biomasa aérea y biomasa subterránea, toneladas d.m. de biomasa subterránea (ton d.m. de biomasa aérea)<sup>-1</sup>

$CF$  = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)<sup>-1</sup>

BCEF<sub>s</sub> = factor de conversión y expansión de biomasa para la expansión del volumen de existencias venales en crecimiento a biomasa aérea, toneladas de crecimiento de biomasa aérea (m<sup>3</sup> de volumen de existencias en crecimiento)<sup>-1</sup>, (véase el Cuadro 4.5 para tierras forestales). El BCEF<sub>s</sub> transforma el volumen venable de existencias en crecimiento directamente en su biomasa aérea. Los valores del BCEF<sub>s</sub> son más convenientes porque se pueden aplicar directamente a datos de inventario de bosques basados en volumen y a registros operativos, sin tener que recurrir a densidades boscosas básicas (D). Dan mejores resultados cuando se los ha derivado localmente y cuando se basan directamente en el volumen venal. No obstante, si no se dispone de los valores del BCEF<sub>s</sub> y si el factor de expansión de la biomasa (BEF<sub>s</sub>) y los valores de D se estiman individualmente, se puede usar la siguiente conversión:

$$\text{BCEF}_s = \text{BEF}_s \bullet D$$

Cuando se aplican los *Métodos de pérdidas y ganancias* o *de diferencia de existencias*, el área respectiva es, claramente, la superficie de tierra que permanece en la categoría en cuestión al final del año para el cual se está estimando el inventario. Todas las demás tierras estarán en una categoría de conversión (véase la Sección 2.3.1.2). El lapso durante el cual esa tierra permanece en una categoría de conversión después del cambio de uso de la tierra es, por defecto, de 20 años (el lapso en el que se supuso que las existencias de carbono llegan al equilibrio a los efectos de calcular coeficientes por defecto en las *Directrices del IPCC de 1996*, y retenidos para la GPG-LULUCF y utilizados en el presente, aunque pueden emplearse otros lapsos en niveles superiores, según las necesidades de cada país). Por lo tanto, según las hipótesis utilizadas por defecto, la tierra se transferirá de una categoría de conversión a una categoría de permanencia después de que haya estado en un uso de la tierra durante 20 años. En el año de la conversión se van a producir algunos cambios en las existencias de carbono, pero de todos modos es importante ser coherentes respecto al período durante el cual la tierra permanece en la categoría de conversión, ya que, de otra manera, los métodos para la estimación de superficies de tierra descritos en el próximo capítulo no funcionan. Los cambios en existencias que se completan dentro de 1 año a partir de la conversión se relacionarán con la superficie convertida anualmente y las superficies de tierra respectivas deben tratarse como subcategoría dentro de la categoría de conversión aunque, de todos modos, deben permanecer en la categoría de conversión hasta que hayan transcurrido los 20 años fijados por defecto u otro lapso de conversión.

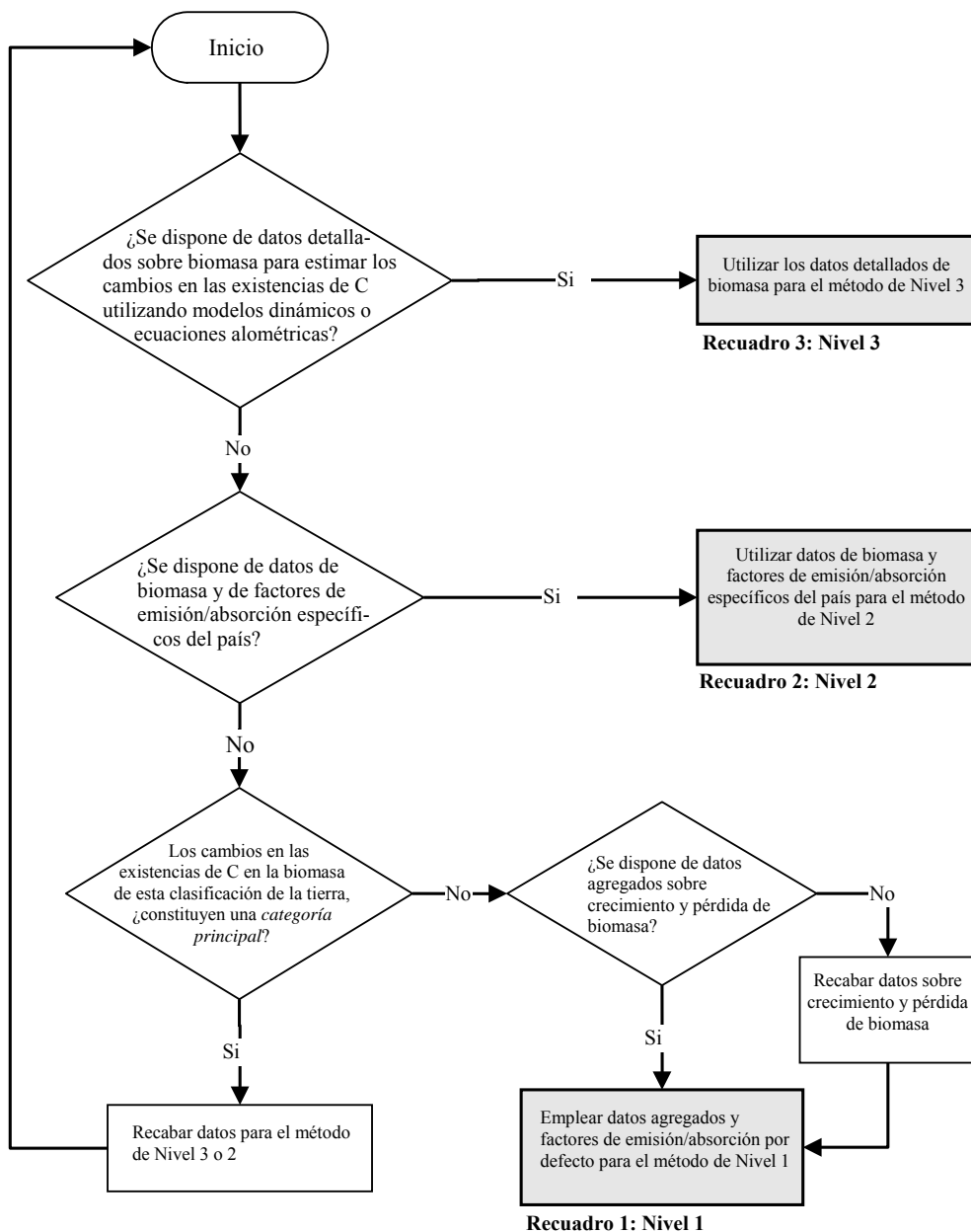
El *Método de diferencia de existencias* se aplica en los países que cuenten con sistemas nacionales de inventario de bosques y de otras categorías de uso de la tierra, donde las existencias de los diferentes depósitos de biomasa se miden a intervalos periódicos. El método de diferencia de existencias exige más recursos y muchos países pueden no contar con sistemas nacionales de inventario de bosques y de otras categorías de uso de la tierra. Este método es apropiado para países que adopten un método del Nivel 3 y, en algunos casos, uno de Nivel 2, pero puede no adecuarse a países que utilicen un método del Nivel 1 debido a las limitaciones en datos. Es importante asegurarse de que el sistema de inventario genere datos sobre pérdidas y ganancias de los depósitos de carbono de la biomasa.

En los lugares en que haya biomasa forestal perenne puede emplearse cualquiera de los dos métodos para estimar los cambios en las existencias de carbono en biomasa de todas las categorías (p. ej. *tierras forestales que permanecen como tales*, *pastizales que permanecen como tales* y *tierras de cultivo que permanecen como tales*). Puede utilizarse la Figura 2.2 para ayudar a los organismos a cargo del inventario a identificar el nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en biomasa.

Nótese que algunas pérdidas en la biomasa pueden conducir a emisiones de C que no sean de CO<sub>2</sub>, como lo son el consumo y la emisión en forma de metano (CH<sub>4</sub>) por parte de las termitas o de mamíferos salvajes.<sup>2</sup> No se han desarrollado métodos de Nivel 1 por defecto para estas fuentes y los países que deseen estimar y declarar estas emisiones deben desarrollar y utilizar un método de Nivel 3.

<sup>2</sup> Las pérdidas de carbono en forma de CO<sub>2</sub> y no CO<sub>2</sub> relacionadas con el quemado de biomasa se estiman de manera que las emisiones de carbono no se computen doblemente.

**Figura 2.2**      **Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en biomasa en una categoría de uso de la tierra.**



Nota:

1: Véase el Volumen 1, Capítulo 4, «Opción metodológica e identificación de categorías principales» (principalmente la sección 4.1.2 relativa a los recursos limitados) para el análisis de las *categorías principales* y el uso de los árboles de decisión.

## A. MÉTODOS PARA ESTIMAR LOS CAMBIOS EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN BIOMASA ( $\Delta C_B$ )

### A.1 Cómo estimar el incremento anual de existencias de carbono en biomasa (Método de pérdidas y ganancias), $\Delta C_G$

Éste es el método de Nivel 1 que, cuando se lo combina con los índices de crecimiento de biomasa obtenidos por defecto, permite calcular, en cualquier país, el incremento anual de biomasa, utilizando estimaciones de superficie e incrementos medios anuales de biomasa, para cada uno de los tipos de uso de la tierra y para cada estrato (p. ej. zona climática, zona ecológica, tipo de vegetación) (Ecuación 2.9).

**ECUACIÓN 2.9**  
**INCREMENTO ANUAL DE LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN BIOMASA**  
**EN TIERRAS QUE PERMANECEN EN LA MISMA CATEGORÍA DE USO DE LA TIERRA**

$$\Delta C_G = \sum_{i,j} (A_{i,j} \cdot G_{TOTAL_{i,j}} \cdot CF_{i,j})$$

Donde:

$\Delta C_G$  = incremento anual de las existencias de carbono en biomasa debido al crecimiento de la biomasa en tierras que permanecen en la misma categoría de uso de la tierra por tipo de vegetación y zona climática, ton C año<sup>-1</sup>

A = superficie de tierra que permanece en la misma categoría de uso de la tierra, ha

$G_{TOTAL}$  = crecimiento medio anual de la biomasa, ton d. m. ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

i = zona ecológica i (i = 1 a n)

j = dominio climático j (j = 1 a m)

CF = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)<sup>-1</sup>

$G_{TOTAL}$  es el crecimiento total de la biomasa ampliado del citado crecimiento de la biomasa aérea ( $G_w$ ) para que incluya el crecimiento de la biomasa subterránea. Aplicando un método de Nivel 1, se puede lograr directamente empleando valores por defecto de  $G_w$  de árboles regenerados naturalmente o de categorías amplias de plantaciones junto con R, la relación entre la biomasa subterránea y la aérea diferenciadas por el tipo de vegetación boscosa. En los Niveles 2 y 3, se puede utilizar el incremento neto anual ( $I_v$ ) con la densidad básica de la madera (D) y el factor de expansión de la biomasa ( $BEF_I$ ), o directamente con el factor de conversión y expansión de la biomasa ( $BCEF_I$ ), para la conversión del incremento neto anual al incremento de la biomasa aérea para cada tipo de vegetación. En la Ecuación 2.10 se muestran las relaciones.

**ECUACIÓN 2.10**  
**INCREMENTOS ANUALES PROMEDIO DE LA BIOMASA**

**Nivel 1**  
 $G_{TOTAL} = \sum \{G_w \cdot (1 + R)\}$  Se emplean directamente los datos de incremento de biomasa (materia seca)

**Niveles 2 y 3**  
 $G_{TOTAL} = \sum \{I_v \cdot BCEF_I \cdot (1 + R)\}$  Se utilizan los datos del incremento anual neto para estimar el  $G_w$  aplicando el factor de conversión y expansión de la biomasa

Donde:

$G_{TOTAL}$  = crecimiento promedio anual de la biomasa aérea y subterránea, ton d. m. ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

$G_w$  = promedio del crecimiento anual de la biomasa aérea para un tipo específico de vegetación boscosa, ton d. m. ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

R = relación entre la biomasa subterránea y la aérea para un tipo específico de vegetación en ton d.m. de biomasa subterránea (ton d.m. de biomasa aérea)<sup>-1</sup>. R debe configurarse en cero si se supone que no hubo cambios en las pautas de atribución de biomasa subterránea (Nivel 1).



$I_v$  = incremento anual neto promedio para un tipo de vegetación específica,  $m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

$BCEF_1$  = factor de conversión y expansión de biomasa para la conversión del incremento anual neto en volumen (incluyendo corteza) a crecimiento de biomasa aérea para un tipo de vegetación específica, toneladas de crecimiento de corteza aérea ( $m^3$  de incremento anual promedio)<sup>-1</sup> (véase el Cuadro 4.5 referido a tierras forestales). Si no se dispone de los valores del  $BCEF_1$  y si el factor de expansión de la biomasa (BEF) y los valores de densidad básica de la madera (D) se estiman individualmente, entonces, se puede usar la siguiente conversión:

$$BCEF_1 = BEF_1 \bullet D$$

Los Factores de expansión de la Biomasa ( $BEF_1$ )<sup>3</sup> amplían el volumen venable al volumen total de biomasa aérea para compensar por los componentes no venables del incremento. El  $BEF_1$  no tiene dimensión.

Las estimaciones del  $BCEF_1$  para biomasa boscosa (perenne) en tierras no forestales, tales como pastizales (sabana), tierras de cultivo (agro-silvicultura), huertos, café, té y caucho, pueden no estar disponibles de inmediato. En este caso, se pueden utilizar valores por defecto del  $BCEF_1$  de uno de los tipos de bosques más similares a la vegetación no-forestal para convertir la biomasa venable en biomasa total. El  $BCEF_1$  se aplica solamente a la biomasa de árboles boscosos perennes para los cuales se dispone de datos de la biomasa venable. En cuanto a los arbustos, las gramíneas y los cultivos, los datos sobre el incremento de biomasa en términos de toneladas de materia seca por hectárea pueden estar disponibles directamente y, en este caso, no va a ser necesario el uso de la Ecuación 2.10.

## A.2 Estimación de la reducción anual de existencias de carbono en biomasa debida a pérdidas (Método de pérdidas y ganancias), $\Delta C_L$

Las estimaciones de pérdidas son necesarias para calcular el cambio en las existencias de carbono en biomasa empleando el *Método de pérdidas y ganancias*. Nótese que la estimación de pérdidas también resulta necesaria cuando se emplea el *Método de diferencia de existencias* para estimar las transferencias de biomasa a materia orgánica muerta utilizando los métodos de estimación de niveles superiores (véase más adelante). La pérdida anual de biomasa es la suma de las pérdidas por remoción de bosques (cosecha), la recogida de madera combustible (sin contar la recolección de detritos) y otras pérdidas producidas por perturbaciones, como incendios, tormentas e insectos y pestes. Se muestra la relación en la Ecuación 2.11.

**ECUACIÓN 2.11**  
**REDUCCIÓN ANUAL DE LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN BIOMASA**  
**EN TIERRAS QUE PERMANECEN EN LA MISMA CATEGORÍA DE USO DE LA TIERRA (MÉTODO DE**  
**DIFERENCIA DE EXISTENCIAS)**

$$\Delta C_L = L_{\text{remoción-bosques}} + L_{\text{madera-combustible}} + L_{\text{perturbación}}$$

Donde:

$\Delta C_L$  = reducción anual de las existencias de carbono debida a la pérdida de biomasa en tierras que permanecen en la misma categoría de uso de la tierra,  $\text{ton C año}^{-1}$

$L_{\text{remoción-bosques}}$  = pérdida anual de carbono debida a remoción de bosques,  $\text{ton C año}^{-1}$  (Véase la Ecuación 2.12)

$L_{\text{madera-combustible}}$  = pérdida anual de carbono en la biomasa debida a remoción de madera combustible,  $\text{ton C año}^{-1}$  (Véase la Ecuación 2.13)

$L_{\text{perturbación}}$  = pérdidas anuales de carbono en la biomasa debidas a perturbaciones,  $\text{ton C año}^{-1}$  (Véase la Ecuación 2.14)

La Ecuación 2.11 y las siguientes Ecuaciones 2.12 a 2.14 se pueden aplicar directamente a tierras forestales. Estas Ecuaciones (2.11 a 2.14) pueden usarse también para estimar las pérdidas de tierras de cultivo y pastizales,

<sup>3</sup> En ciertas aplicaciones, los BEF se emplean para ampliar el peso seco de los componentes venables o la biomasa de los tallos a la biomasa total, excluidas o incluidas las raíces, o para convertir y ampliar el volumen venable o de tallos a biomasa aérea o total (Somogyi *et al.*, 2006). Según se los usa en este documento, los factores de expansión de la biomasa siempre transforman el peso seco de los componentes venables incluidas la corteza a biomasa aérea, a exclusión de las raíces.

si las cantidades de remoción de bosques (cosecha), remoción de madera combustible, y pérdida debida a perturbación están disponibles en cuanto a biomasa forestal perenne. En tierras de cultivo y pastizales bajo gestión intensiva o muy degradados, es factible que la pérdida de biomasa forestal perenne sea pequeña. Los valores por defecto de pérdida de carbono en la biomasa para especies de cultivos madereros se suministran para la metodología de Nivel 1 de tierras de cultivo (véase el Cuadro 5.1). Es importante hacer notar que, para que haya coherencia, la remoción de bosques utilizada en la Ecuación 2.11 debe compararse con el aporte a PMR del Capítulo 12.

Los tres términos del lado derecho de la Ecuación 2.11 se obtienen de la siguiente manera:

***Pérdida de biomasa y de carbono por remoción de bosques (cosecha),  $L_{remoción-bosques}$***

El método para estimar la pérdida anual de carbono de la biomasa debida a remoción de bosques se presenta en la Ecuación 2.12.

**ECUACIÓN 2.12**  
**PÉRDIDA ANUAL DE CARBONO EN LA BIOMASA POR REMOCIONES DE BOSQUES**

$$L_{remoción-bosques} = \{H \cdot BCEF_R \cdot (1 + R) \cdot CF\}$$

Donde:

$L_{remoción-bosques}$  = pérdida anual de carbono debida a remoción de bosques, ton C año<sup>-1</sup>

H = remociones anuales de bosques, rollizos, m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>

R = relación entre la biomasa subterránea y la aérea en ton d.m. de biomasa subterránea (ton d.m. de biomasa aérea)<sup>-1</sup>. R se debe configurar en cero si se supone que no hubo cambios en las pautas de atribución de biomasa subterránea (Nivel 1).

CF = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)<sup>-1</sup>

BCEF<sub>S</sub> = factor de conversión y expansión de biomasa para la conversión de remociones en volumen venable a remociones totales de biomasa (incluida la corteza), toneladas de remoción de biomasa aérea (m<sup>3</sup> de remociones)<sup>-1</sup>, (véase el Cuadro 4.5 para tierras forestales). No obstante, si no se dispone de los valores del BCEF<sub>R</sub> y si el factor de expansión de la biomasa para remociones forestales (BEF<sub>R</sub>) y los valores de densidad básica de la madera (D) se estiman individualmente, entonces, se puede usar la siguiente conversión:

$$BCEF_R = BEF_R \cdot D$$

Si no se dispone de los datos específicos del país respecto a remociones de rollizos, los expertos que trabajan en el inventario deben utilizar las estadísticas de la FAO sobre cosecha de madera. Los datos estadísticos de la FAO sobre cosecha de madera no incluyen la corteza. Para convertir los datos estadísticos de la FAO sobre cosecha de madera en remociones de madera venable incluyendo la corteza, se los debe multiplicar por el factor de expansión por defecto de 1,15.

***Pérdida de biomasa y de carbono por remoción de madera combustible,  $L_{madera-combustible}$***

A menudo, la remoción de madera combustible incluye dos componentes. En primer lugar, la remoción de madera combustible de árboles vivos y de partes de árboles, tales como copas y ramas, por las que el árbol en sí permanece en el bosque, reduce el carbono en la biomasa de las existencias en crecimiento y se debe considerar como pérdida de carbono de la biomasa. El segundo componente es la recogida de madera muerta y corte de rollizos. Esto reduce el depósito de carbono de la materia orgánica muerta. Si resulta posible, es una *buena práctica* estimar ambos componentes por separado. La pérdida de carbono de la biomasa debido a remoción de madera combustible de árboles vivos se estima utilizando la Ecuación 2.13.

**ECUACIÓN 2.13**  
**PÉRDIDA ANUAL DE CARBONO EN LA BIOMASA POR REMOCIONES DE MADERA COMBUSTIBLE**

$$L_{madera-combustible} = [\{FG_{árboles} \cdot BCEF_R \cdot (1 + R)\} + FG_{parte} \cdot D] \cdot CF$$

Donde:

$L_{madera-combustible}$  = pérdida anual de carbono debida a la remoción de madera combustible, ton C año<sup>-1</sup>

$FG_{\text{árboles}}$  = volumen anual de remoción de madera combustible de árboles enteros,  $m^3 \text{ año}^{-1}$

$FG_{\text{parte}}$  = volumen anual de remoción de madera combustible como parte de árboles,  $m^3 \text{ año}^{-1}$

$R$  = relación entre la biomasa subterránea y la aérea, en ton d.m. de biomasa subterránea (ton d.m. de biomasa aérea)<sup>-1</sup>;  $R$  se debe configurar en cero si se supone que no hubo cambios en las pautas de atribución de biomasa subterránea. (Nivel 1)

$CF$  = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)<sup>-1</sup>

$D$  = densidad básica de la madera, ton d.m.  $m^{-3}$

$BCEF_S$  = factor de conversión y expansión de biomasa para la conversión de remociones en volumen venable a remociones totales de biomasa (incluida la corteza), toneladas de remoción de biomasa ( $m^3$  de remociones)<sup>-1</sup>, (véase el Cuadro 4.5 para tierras forestales). Si no se dispone de los valores del  $BCEF_R$  y si el factor de expansión de la biomasa para remociones forestales ( $BEF_R$ ) y los valores de densidad básica de la madera ( $D$ ) se estiman por separado, entonces, se puede usar la siguiente conversión:

$$BCEF_R = BEF_R \bullet D$$

Los Factores de expansión de biomasa ( $BEF_R$ ) expanden las remociones de madera venable a volumen total de biomasa aérea para compensar los componentes no venables del árbol, la arboleda y el bosque. El  $BEF_R$  no tiene dimensión.

Si no se dispone de los datos específicos del país respecto a remociones de rollizos, los expertos que trabajan en el inventario deben utilizar las estadísticas de la FAO sobre cosecha de madera. Es de hacer notar que los datos estadísticos de la FAO sobre cosecha de madera no incluyen la corteza. Para convertir los datos estadísticos de la FAO sobre cosecha de madera en remociones de madera venable incluyendo la corteza, se los debe multiplicar por el factor de expansión por defecto de 1,15.

La cosecha de madera puede incluir remociones de madera y de madera combustible (es decir, las remociones de madera de la Ecuación 2.12 pueden incluir remoción tanto de madera como de madera combustible), o las remociones de madera combustible pueden declararse por separado utilizando las dos fórmulas: 2.12 y 2.13. Para evitar el cómputo doble, es una *buena práctica* verificar cómo se representan los datos de una entrada para la madera combustible en el país y emplear la ecuación que resulte más apropiada a las condiciones nacionales. Es más, la cosecha de madera de bosques se convierte en un valor ingresado en PMR (Capítulo 12). Por lo tanto, es una *buena práctica* verificar que la representación de los datos sobre cosecha de madera en las Ecuaciones 2.12 y 2.13 sea coherente con las del Capítulo 12.

### ***Pérdida de biomasa y de carbono por perturbaciones, $L_{\text{perturbación}}$***

En la Ecuación 2.14 se ofrece un método genérico para estimar la cantidad de carbono perdida a causa de perturbaciones. En el caso específico de pérdidas por incendios de tierras gestionadas, incluidos los incendios naturales y los controlados, debe emplearse este método para ingresar información a la metodología para estimar las emisiones de  $CO_2$  y no  $CO_2$  provocadas por incendios.

#### **ECUACIÓN 2.14**

#### **PÉRDIDAS ANUALES DE CARBONO EN LA BIOMASA DEBIDAS A PERTURBACIONES**

$$L_{\text{perturbación}} = \{A_{\text{perturbación}} \bullet B_W \bullet (1 + R) \bullet CF \bullet fd\}$$

Donde:

$L_{\text{perturbación}}$  = otras pérdidas anuales de carbono, ton C  $\text{año}^{-1}$  (Nótese que se trata de la cantidad de biomasa que se pierde del total de la biomasa. La diferenciación entre la biomasa que se transfiere a materia orgánica muerta y la que se oxida y libera a la atmósfera se explica en las Ecuaciones 2.15 y 2.16).

$A_{\text{perturbación}}$  = superficie afectada por perturbaciones, ha  $\text{año}^{-1}$

$B_W$  = biomasa aérea promedio de superficies de tierra afectadas por perturbaciones, ton d.m. ha<sup>-1</sup>

$R$  = relación entre la biomasa subterránea y la aérea, en ton d.m. de biomasa subterránea (ton d.m. de biomasa aérea)<sup>-1</sup>.  $R$  debe configurarse en cero si se supone que no hubo cambios en la biomasa subterránea (Nivel 1).

$CF$  = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)<sup>-1</sup>

$fd$  = fracción de biomasa perdida por perturbaciones (véase la siguiente nota).

**Nota:** El parámetro  $fd$  define la proporción de biomasa que se pierde del depósito de biomasa: una perturbación que reemplaza a una arboleda eliminará toda la biomasa ( $fd = 1$ ), mientras que una perturbación provocada por insectos puede remover sólo una porción (p. ej.  $fd = 0,3$ ) de la densidad promedio de C en la biomasa. La Ecuación 2.14 no especifica el destino del carbono removido de las existencias de carbono de la biomasa. El supuesto del Nivel 1 es que todas las  $L_{\text{perturbaciones}}$  se emiten en el año de la perturbación. En los métodos de nivel superior, se supone que parte de este carbono se emite inmediatamente y que otra parte se agrega a los depósitos de materia orgánica muerta (madera muerta, hojarasca) o a los PMR.

Las cantidades de carbono de la biomasa que se transfieren a diferentes destinos se pueden definir utilizando una matriz de perturbaciones que se puede parametrizar para definir los impactos de los diferentes tipos de perturbaciones (Kurz *et al.*, 1992). Si es posible, una *buena práctica* es desarrollar y utilizar una matriz de perturbación (Cuadro 2.1) para cada depósito de carbono en la biomasa, en materia orgánica muerta o en el suelo, la proporción de carbono que permanece en ese depósito, y las proporciones que se transfieren a otros depósitos, a productos de madera recolectada y a la atmósfera, durante el evento de perturbación. Las proporciones de cada fila suman siempre 1 a fin de garantizar la conservación del carbono. El valor que se ingresa en la celda A es la proporción de biomasa aérea que permanece después de una perturbación (o  $1 - fd$ , donde  $fd$  se define como en la Ecuación 2.14). La hipótesis del Nivel 1 es que todas las  $fd$  se emiten en el año de la perturbación. Por lo tanto, el valor ingresado en la celda F es  $fd$ . Para los niveles superiores, se ingresa en la celda F sólo la proporción emitida en el año y el resto se agrega a las celdas B y C en caso de incendio, y en las B, C y E en caso de cosecha. Constituye una *buena práctica* desarrollar una matriz de perturbación incluso bajo el Nivel 1 a fin de asegurar que se consideren todas las transferencias de depósitos de carbono, aunque se suponga que todo el carbono de la biomasa se emitió en el año de la conversión de la tierra. Es importante destacar que algunas de las transferencias podrían ser pequeñas o insignificantes.

CUADRO 2.1 EJEMPLO DE UNA MATRIZ SIMPLE (NIVEL 2) PARA LOS IMPACTOS DE PERTURBACIONES EN DEPÓSITOS DE CARBONO								
	Biomasa aérea	Biomasa subterránea	Madera muerta	Hoja-rasca	Materia orgánica del suelo	Productos de madera recolectada	Atmós-fera	La suma de la fila (debe dar 1)
Biomasa aérea	A		B	C	D	E	F	1
Biomasa subterránea								1
Madera muerta								1
Hojarasca								1
Materia orgánica del suelo								1

Ingrese la proporción de cada depósito del lado izquierdo de la matriz que se transfiere al depósito de la parte superior de cada columna. Todos los depósitos del lado izquierdo de la matriz deben contener datos y los valores de cada fila deben sumar 1.

Las transiciones que no corresponden están marcadas en negro.

Nota: Las letras A a F son los nombres de las celdas a los que se hace referencia en el texto.

### 2.3.1.2 TIERRA QUE SE CONVIERTE A UNA NUEVA CATEGORÍA DE USO

En esta sección se presentan los métodos para la estimación de emisiones y absorciones de carbono que se producen a resultas de la conversión de una categoría de uso de la tierra a otra. Las conversiones posibles incluyen la conversión de tierras no forestales a forestales, de tierras de cultivo y forestales a pastizales, y de pastizales y forestales a tierras de cultivo.

Las emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub> en tierras convertidas a una nueva categoría de uso de la tierra incluyen los cambios anuales en las existencias de carbono en la biomasa aérea y en la subterránea. Los cambios anuales en las existencias de carbono para cada uno de estos depósitos se pueden estimar aplicando la Ecuación 2.4 ( $\dot{A}C_B = \Delta C_G - \Delta C_L$ ), donde  $\Delta C_G$  es la ganancia anual de carbono, y  $\Delta C_L$  es la pérdida anual de carbono.  $\dot{A}C_B$  se puede estimar por separado para cada uso de la tierra (p. ej. tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales) y para cada categoría de gestión (p. ej. bosque natural, plantación), por estratos específicos (p. ej. tipo de clima o de bosque).

#### MÉTODOS PARA ESTIMAR LOS CAMBIOS EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN BIOMASA ( $\Delta C_B$ )

##### i) Incremento anual de las existencias de carbono en la biomasa, $\Delta C_G$

**Nivel 1:** el incremento anual en las existencias de carbono de la biomasa debido a tierras convertidas en otras categorías de uso de la tierra se puede estimar aplicando la Ecuación 2.9 descrita precedentemente para tierras que permanecen en una categoría. En el Nivel 1, se aplica, por defecto, la hipótesis de que no hay cambios en las existencias iniciales de carbono en la biomasa debidos a conversión. Esta hipótesis puede aplicarse si no se dispone de datos relativos a los usos previos de la tierra, lo que puede ser el caso cuando los totales de superficie de la tierra se estiman empleando los Métodos 1 o 2 descritos en el Capítulo 3 (datos sobre superficies de tierra espacialmente no explícitos). Este método implica el uso de los parámetros por defecto de la Sección 4.5 (Capítulo 4). La superficie de tierra convertida se puede categorizar sobre la base de las prácticas de gestión, p. ej. plantaciones y pastizales bajo gestión intensiva o plantaciones, pastizales o tierras de cultivo abandonadas bajo gestión extensiva (bajo aporte) que se revierten a forestales y que deberían mantenerse en la categoría de conversión durante 20 años u otro lapso. Si se conoce el uso previo de la tierra en una superficie convertida, entonces se puede usar el método de Nivel 2 descrito a continuación.

## ii) Reducción anual de las existencias de carbono en la biomasa debida a pérdidas, $\Delta C_L$

**Nivel 1:** la reducción anual de existencias de carbono en la biomasa debida a pérdidas en tierras convertidas (remociones de bosques o talas, recogida de madera combustible y perturbaciones) puede estimarse empleando las Ecuaciones 2.11 a 2.14. Como sucede con los incrementos en las existencias de carbono, en el Nivel 1 se sigue la hipótesis por defecto de que no hay cambios en las existencias iniciales de carbono en la biomasa, y se la puede aplicar para superficies que se estiman utilizando los Métodos 1 o 2 del Capítulo 3, y los parámetros por defecto de la Sección 4.5.

## iii) Niveles superiores para estimar cambios en las existencias de carbono en biomasa, ( $\Delta C_B$ )

**Niveles 2 y 3:** Los métodos del Nivel 2 (y 3) emplean datos derivados a nivel nacional y métodos más desagregados y (o) modelos de proceso, los que permiten realizar estimaciones más precisas de los cambios en las existencias de carbono en la biomasa. En el Nivel 2, la Ecuación 2.4 se reemplaza por la Ecuación 2.15, donde los cambios en las existencias de carbono se calculan como la suma del incremento de las existencias de carbono debidas al crecimiento de la biomasa, más los cambios debidos a conversión real (diferencia entre inventarios de biomasa antes y después de la conversión), y la reducción de existencias de carbono debida a pérdidas.

<p><b>ECUACIÓN 2.15</b></p> <p><b>CAMBIO ANUAL EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN BIOMASAS EN TIERRAS CONVERTIDAS A OTRA CATEGORÍA DE USO DE LA TIERRA (NIVEL 2)</b></p> $\Delta C_B = \Delta C_G + \Delta C_{CONVERSIÓN} - \Delta C_L$
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Donde:

$\Delta C_B$  = cambio anual en las existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra, en ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_G$  = incremento anual en las existencias de carbono de la biomasa debido a crecimiento en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra, en ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_{CONVERSIÓN}$  = cambio inicial en las existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra, en ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_L$  = reducción anual en las existencias de carbono de la biomasa debida a pérdidas producidas por cosechas, recogida de madera combustible y perturbaciones en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra, en ton C año<sup>-1</sup>

La conversión a otra categoría de tierra puede estar relacionada con un cambio en las existencias de biomasa; p. ej. parte de la biomasa puede ser retirada mediante desbroce de tierras, repoblación u otras actividades inducidas por el hombre. Estos cambios iniciales de las existencias de carbono en la biomasa ( $\Delta C_{CONVERSIÓN}$ ) se calculan empleando la Ecuación 2.16, de la siguiente manera:

<p><b>ECUACIÓN 2.16</b></p> <p><b>CAMBIO INICIAL EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN LA BIOMASA DE TIERRAS CONVERTIDAS A OTRA CATEGORÍA DE TIERRA</b></p> $\Delta C_{CONVERSIÓN} = \sum_i \{ (B_{DESPUÉS_i} - B_{ANTES_i}) \cdot \Delta A_{A\_OTRAS_i} \} \cdot CF$
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Donde:

$\Delta C_{CONVERSIÓN}$  = cambio inicial en las existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas a otra categoría de tierra, ton C año<sup>-1</sup>

$B_{DESPUÉS_i}$  = existencias de biomasa en el tipo de tierra  $i$  inmediatamente después de la conversión, ton d.m. ha<sup>-1</sup>

$B_{ANTES_i}$  = existencias de biomasa en el tipo de tierra  $i$  antes de la conversión, ton d.m. ha<sup>-1</sup>

$\Delta A_{A\_OTRAS_i}$  = superficie de uso de la tierra  $i$  convertida a otra categoría de uso de la tierra en un año dado, ha año<sup>-1</sup>

CF = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)<sup>-1</sup>

$i$  = tipo de uso de la tierra convertido a otra categoría de uso de la tierra.

El cálculo de  $\Delta C_{CONVERSIÓN}$  se puede aplicar separadamente para estimar las existencias de carbono en tipos específicos de tierras (ecosistemas, tipos de lugares, etc.) antes de la conversión. El término  $\Delta A_{A\_OTRAS_i}$  se refiere a un año de inventario en particular para el cual se realizan los cálculos, pero la tierra afectada por la conversión debe permanecer en la categoría de la conversión durante 20 años u otro período que se utilice en el inventario. En los inventarios en los que se utilizan métodos de nivel superior se puede definir una matriz de perturbación (Cuadro 2.1) para conversión de uso de la tierra a fin de cuantificar la proporción de cada depósito de carbono anterior a la conversión que se transfiere a otros depósitos, se emite a la atmósfera (p. ej. quemado de broza) o se extrae de alguna manera durante la cosecha o el desbroce.

Debido al uso de datos específicos del país y de métodos más desagregados, las Ecuaciones 2.15 y 2.16 permiten realizar estimaciones más exactas que los métodos de Nivel 1, en los que se emplean datos por defecto. Se lograría una mejora o una exactitud adicional si usaran datos nacionales referidos a zonas de transición en el uso de la tierra y valores de existencias de carbono específicos del país. Por lo tanto, los métodos de los Niveles 2 y 3 deben incluir estimaciones que empleen datos detallados por zona y valores de existencias de carbono específicos del país.

## 2.3.2 Cambios de las existencias de carbono en materia orgánica muerta

La materia orgánica muerta (DOM) incluye madera muerta y hojarasca (Véase el Cuadro 1.1). La estimación de la dinámica del carbono de los depósitos de materia orgánica muerta permite lograr una mayor exactitud en la generación de informes sobre dónde y cuándo se producen las emisiones y las absorciones de carbono. Por ejemplo, sólo parte del carbono contenido en la biomasa que muere durante un quemado de biomasa se libera a la atmósfera en el año del incendio. La mayor parte de la biomasa se agrega a madera muerta, hojarasca y depósitos del suelo (las raíces finas muertas están incluidas en el suelo) desde donde el C se libera con el correr de años a décadas, a medida que se descomponga la materia orgánica. Los índices de descomposición difieren significativamente entre las regiones, y oscilan entre altas en ambientes cálidos y húmedos, y bajas en ambientes fríos y secos. Aunque la dinámica del carbono en los depósitos de materia orgánica muerta es bien conocida cualitativamente, los países pueden tener dificultades en la obtención de datos reales de cobertura nacional en cuanto a existencias de materia orgánica muerta y su dinámica.

En los ecosistemas boscosos, los depósitos de DOM tienden a ser los más grandes después de las perturbaciones que producen el reemplazo de arboledas debido al agregado de biomasa residual (raíces) residual aérea y subterránea. Durante los años posteriores a la perturbación, los depósitos de DOM declinan puesto que la pérdida de carbono producida por la descomposición excede la tasa de agregado de carbono proveniente de la caída de hojarasca, la mortalidad y la renovación de la biomasa. Posteriormente, con el desarrollo de la arboleda, los depósitos de DOM vuelven a aumentar. La representación de esta dinámica exige una estimación por separado de entradas y salidas dependientes de la edad relativas a la dinámica de la arboleda y de los aportes y las pérdidas relacionados con las perturbaciones. Estos procedimientos de estimación más complejos requieren métodos de niveles superiores.

### 2.3.2.1 TIERRA QUE PERMANECE EN LA MISMA CATEGORÍA DE USO

Para los depósitos de madera muerta y de hojarasca de todas las categorías de uso de la tierra, en el Nivel 1 se supone que sus existencias no cambian con el transcurso del tiempo si la tierra permanece en la misma categoría de uso de la tierra. Por consiguiente, se supone que el carbono de la biomasa que muere durante una perturbación o por un evento de gestión (excepto la remoción de productos de madera cosechados) se libera totalmente a la atmósfera en el año del evento. Esto equivale a suponer que el carbono de los componentes no venables y no comerciales que se transfieren a la materia orgánica muerta equivale a la cantidad de carbono que se libera de la materia orgánica muerta a la atmósfera mediante descomposición y oxidación. Los países pueden aplicar métodos de nivel superior para estimar la dinámica del carbono de la materia orgánica muerta. En esta sección se describen métodos de estimación para cuando se empleen métodos de Nivel 2 (o 3).

Los países que utilizan métodos de Nivel 1 para estimar los depósitos de DOM en las tierras que permanecen en la misma categoría de usos de la tierra declaran que equivalen a cero los cambios en las existencias de carbono y en las emisiones de carbono de esos depósitos. Siguiendo esta regla, las emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes de la combustión de materia orgánica muerta durante un incendio no se declaran, como tampoco se declara de los aumentos de las existencias de carbono en la materia orgánica muerta de los años posteriores al incendio. Sin embargo, sí se declaran las emisiones de gases no CO<sub>2</sub> originadas por el quemado de depósitos de DOM. Mediante los métodos de Nivel 2 para la estimación de cambios de existencias de carbono en depósito de DOM se calculan los cambios de los depósitos carbono de madera muerta y hojarasca (Ecuación 2.17). Se pueden emplear dos métodos: efectuando un seguimiento de las entradas y salidas (el *Método de pérdidas y ganancias*, Ecuación 2.18) o estimando la diferencia entre depósitos de DOM en dos momentos diferentes (*Método de la diferencia de existencias*, Ecuación 2.19). Estas estimaciones requieren ya sea inventarios detallados que incluyan mediciones periódicas de los depósitos de madera muerta y hojarasca o modelos que simulen la dinámica de la madera muerta y la hojarasca. Es una *buena práctica* asegurarse de que tales modelos se verifiquen contra mediciones de campo y se documenten. La Figura 2.3 muestra el árbol de decisiones para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en los inventarios de carbono de la materia orgánica muerta.

En la Ecuación 2.17 se resume el cálculo para estimar los cambios anuales de las existencias de carbono en depósitos de DOM:

<p><b>ECUACIÓN 2.17</b></p> <p><b>CAMBIO ANUAL EN LOS INVENTARIOS DE CARBONO DE LA MATERIA ORGÁNICA MUERTA</b></p> $\Delta C_{DOM} = \Delta C_{DW} + \Delta C_{LT}$
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Donde:

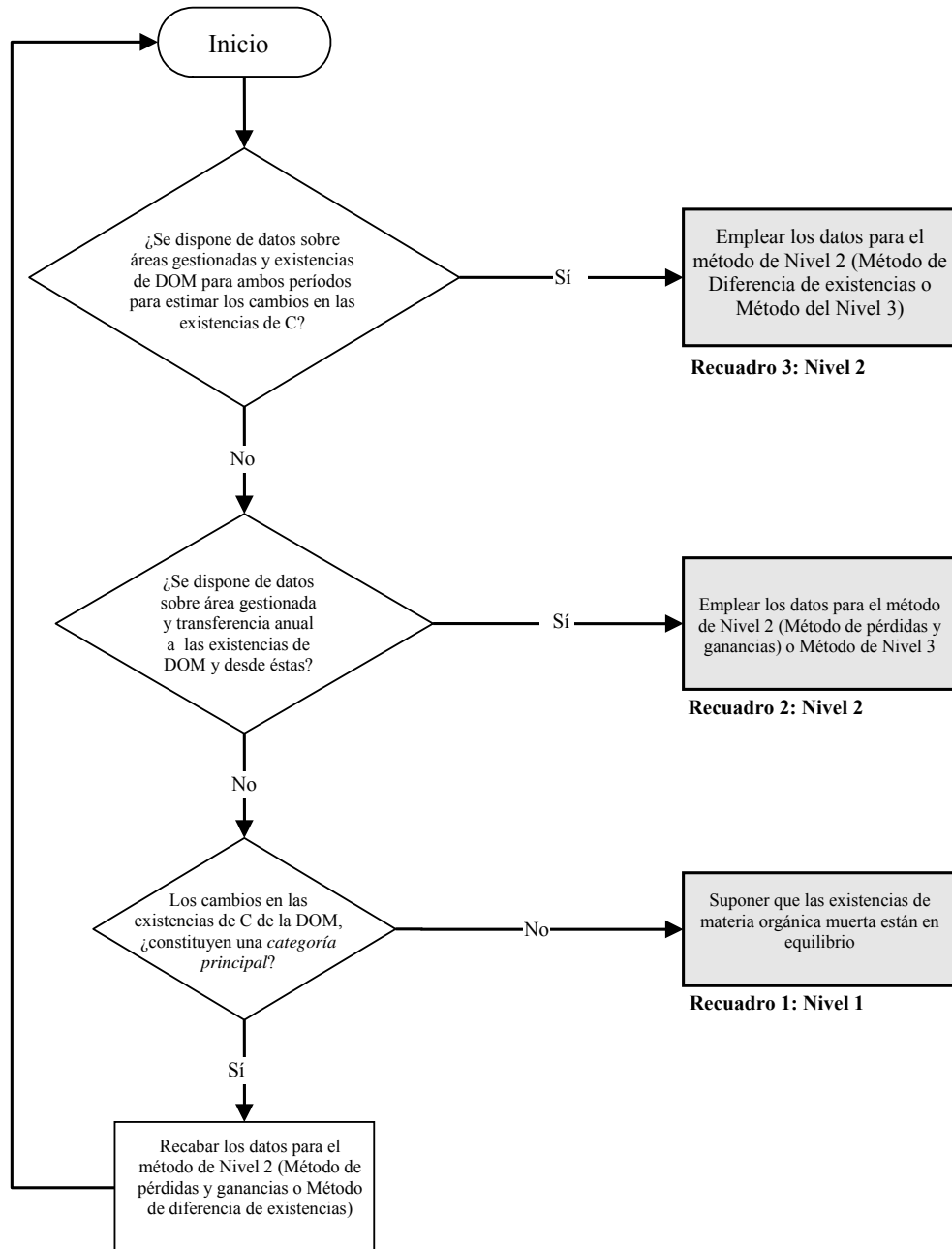
$\Delta C_{DOM}$  = cambio anual en las existencias de carbono de la materia orgánica muerta (incluye madera muerta y hojarasca), ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_{DW}$  = cambio en las existencias de carbono de la madera muerta, ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_{LT}$  = cambio en las existencias de carbono de la hojarasca, ton C año<sup>-1</sup>



**Figura 2.3**      **Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en materia orgánica muerta en una categoría de uso de la tierra.**



Nota:

1 Véase el Volumen 1, Capítulo 4, «Opción metodológica e identificación de categorías principales» (principalmente la sección 4.1.2 relativa a los recursos limitados) para el análisis de las *categorías principales* y el uso de los árboles de decisión.

2: Los dos métodos se definen en las Ecuaciones 2.18 y 2.19, respectivamente.

Los cambios en las existencias de carbono de los depósitos de madera muerta y hojarasca en una zona que permanece en una categoría de uso de la tierra entre un inventario y otro se pueden estimar aplicando dos métodos descritos en las Ecuaciones 2.18 y 2.19. Se utiliza la misma ecuación para depósitos de madera muerta y de hojarasca, pero los valores se calculan por separado.

**ECUACIÓN 2.18**  
**CAMBIO ANUAL EN LOS INVENTARIOS DE CARBONO DE LA MADERA MUERTA O LA HOJARASCA**  
**(MÉTODO DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS)**  

$$\Delta C_{DOM} = A \cdot \{(DOM_{in} - DOM_{out}) \cdot CF\}$$

Donde:

$\Delta C_{DOM}$  = cambio anual en las existencias de carbono de los depósitos de madera muerta/hojarasca, ton C año<sup>-1</sup>

A = superficie de tierra gestionada, ha

DOM<sub>in</sub> = transferencia anual promedio de biomasa al depósito de madera muerta/hojarasca debido a procesos y perturbaciones anuales, ton d.m. ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (para mayores detalles, véase la siguiente Sección).

DOM<sub>out</sub> = pérdida de carbono promedio anual por descomposición y perturbaciones procedente de depósitos de madera muerta o de hojarasca, ton d.m. ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

CF = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)<sup>-1</sup>

El balance neto de depósitos de DOM especificado en la Ecuación 2.18 requiere la estimación de las entradas y salidas de procesos anuales (caída y descomposición de hojarasca) y de aportes y pérdidas relacionados con las perturbaciones. Por lo tanto, en la práctica, los métodos de los Niveles 2 y 3 requieren estimaciones de los índices de transferencia y de descomposición, así como datos sobre la actividad de cosecha y sobre las perturbaciones, y sus impactos sobre la dinámica de los depósitos de DOM. Nótese que los aportes de biomasa a los depósitos de DOM que se utilizan en la Ecuación 2.18 constituyen un subconjunto de las pérdidas de biomasa estimadas en la Ecuación 2.7. Las pérdidas de biomasa de la Ecuación 2.7 contienen biomasa adicional que se extrae del sitio mediante la cosecha o por pérdida a la atmósfera, en caso de incendio.

El método elegido depende de los datos disponibles y es factible que se lo coordine con el método elegido para las existencias de carbono en la biomasa. Las transferencias del y al depósito de madera muerta u hojarasca a utilizar en la Ecuación 2.18 pueden resultar difíciles de estimar. El método para estimar la diferencia en las existencias descrito en la Ecuación 2.19 puede emplearse en países con datos de inventario forestal que incluyan información sobre depósitos de DOM, otros datos de relevamiento obtenidos por muestreo según los principios establecidos en el Anexo 3A.3 (Muestreo) del Capítulo 3, y/o de modelos con los que se simule la dinámica de la madera muerta y la hojarasca.

**ECUACIÓN 2.19**  
**CAMBIO ANUAL EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN MADERA MUERTA U HOJARASCA**  
**(MÉTODO DE DIFERENCIA DE EXISTENCIAS)**  

$$\Delta C_{DOM} = \left[ A \cdot \frac{(DOM_{t_2} - DOM_{t_1})}{T} \right] \cdot CF$$

Donde:

$\Delta C_{DOM}$  = cambio anual en las existencias de carbono en madera muerta u hojarasca, ton C año<sup>-1</sup>

A = superficie de tierra gestionada, ha

DOM<sub>t1</sub> = existencias de madera muerta/hojarasca en el momento t<sub>1</sub> en tierra gestionada, ton d.m. ha<sup>-1</sup>

DOM<sub>t2</sub> = existencias de madera muerta/hojarasca en el momento t<sub>2</sub> en tierra gestionada, ton d.m. ha<sup>-1</sup>

T = (t<sub>2</sub> - t<sub>1</sub>) = lapso transcurrido entre el momento de la segunda estimación de existencias y la primera, año

CF = fracción de carbono de materia seca (por defecto = 0,37 para hojarasca), ton C (ton d.m.)<sup>-1</sup>

Nótese que siempre que se utilice el método de cambio de existencias (p. ej. en la Ecuación 2.19), las superficies de tierra utilizadas en los cálculos en los momentos t<sub>1</sub> y t<sub>2</sub> deben ser idénticas. Si las superficies no son idénticas,

entonces, los cambios de superficie provocan confusión en las estimaciones de existencias de carbono y cambios de existencia. Una *buena práctica* es utilizar la superficie del final del período de inventario ( $t_2$ ) para definir la superficie de tierra que permanece en la categoría de uso de la tierra. Los cambios de inventario en todas las superficies que cambian de categoría de uso de la tierra entre  $t_1$  y  $t_2$  se estiman en la nueva categoría de uso de la tierra, como se describe en las secciones referidas a tierras convertidas a una nueva categoría de uso de la tierra.

## APORTE DE BIOMASA A LA MATERIA ORGÁNICA MUERTA

Cada vez que se tala un árbol, hay componentes venables y no venables (como copas, ramas, hojas, raíces y árboles no comerciales) que se dejan en el suelo y se transfieren a los depósitos de materia orgánica muerta. Además, la mortalidad anual puede significar un agregado sustancial de madera muerta a ese depósito. Para los métodos del Nivel 1, la hipótesis es que el carbono contenido en todos los componentes de la biomasa que se transfieren a los depósitos de materia orgánica muerta se van a liberar durante el año de la transferencia, ya sea a partir de procesos anuales (caída de hojarasca y mortalidad de árboles), de actividades de gestión de la tierra, de la recogida de madera combustible o de perturbaciones. Para aplicar los procedimientos de estimación basados en niveles superiores, es necesario estimar la cantidad de carbono de la biomasa que se transfiere a materia orgánica muerta. La cantidad de biomasa que se transfiere a DOM se estima aplicando la Ecuación 2.20.

### ECUACIÓN 2.20 CARBONO ANUAL DE LA BIOMASA QUE SE TRANSFIERE A MATERIA ORGÁNICA MUERTA

$$DOM_{in} = \{L_{mortalidad} + L_{broza} + (L_{perturbación} \cdot f_{BLol})\}$$

Donde:

$DOM_{in}$  = total de carbono de la biomasa transferido a materia orgánica muerta, ton C año<sup>-1</sup>

$L_{mortalidad}$  = transferencia anual de carbono de la biomasa a DOM debida a mortalidad, ton C año<sup>-1</sup>  
(Véase la Ecuación 2.21)

$L_{broza}$  = transferencia anual de carbono de la biomasa a DOM en forma de broza, ton C año<sup>-1</sup> (Véase la Ecuación 2.22)

$L_{perturbación}$  = pérdidas anuales de carbono en la biomasa debida a perturbaciones, ton C año<sup>-1</sup> (Véase la Ecuación 2.14)

$f_{BLol}$  = fracción de biomasa que se deja descomponer en el suelo (transferida a materia orgánica muerta) por pérdidas debidas a perturbaciones. Como se muestra en el Cuadro 2.1, las pérdidas por perturbaciones del depósito de biomasa se subdividen en las fracciones que se agregan a madera muerta (celda B del Cuadro 2.1) y a hojarasca (celda C), que se liberan a la atmósfera en caso de incendios (celda F) y, si hay salvamento después de la perturbación, las que se transfieren a PMR (celda E).

**Nota:** si los incrementos en biomasa de raíces se tienen en cuenta en la Ecuación 2.10, entonces también deberá considerarse las pérdidas de biomasa de raíces en las Ecuaciones 2.20 y 2.22.

Los ejemplos de los términos del lado derecho de la Ecuación 2.20 se obtienen de la siguiente manera:

#### *Transferencias a materia orgánica muerta por mortalidad, $L_{mortalidad}$*

La mortalidad está provocada por la competencia durante el desarrollo de arboledas, así como por la edad, las enfermedades y otros procesos que no se incluyen como perturbaciones. No se puede ignorar la mortalidad cuando se emplean métodos de estimación de nivel superior. En arboledas de gestión extensiva sin talas parciales periódicas, la mortalidad producida por competencia durante la fase de exclusión de tallos puede representar entre un 30 y un 50% del total de la productividad de una arboleda durante toda su vida. En las arboledas que reciben atención con regularidad, los agregados al depósito de materia orgánica muerta por mortalidad pueden ser insignificantes porque las talas parciales extraen biomasa forestal que de otra manera se perdería por mortalidad y se transferiría a los depósitos de materia orgánica muerta. Normalmente, los datos de que se dispone en cuanto a incremento declaran el incremento anual neto, lo que se define como el neto de pérdidas por mortalidad. Dado que, en este texto, el crecimiento anual neto se utiliza como base para estimar las ganancias de biomasa, la mortalidad no debe restarse nuevamente como pérdida de los depósitos de biomasa. No obstante, la mortalidad debe contabilizarse como agregado al depósito de madera muerta cuando se aplican los métodos de Niveles 2 y 3.

La ecuación para estimar la mortalidad se presenta en la Ecuación 2.21:

**ECUACIÓN 2.21**  
**PÉRDIDAS ANUALES DE CARBONO EN LA BIOMASA DEBIDAS A MORTALIDAD**

$$L_{mortalidad} = \sum (A \cdot G_w \cdot CF \cdot m)$$

Donde:

$L_{mortalidad}$  = pérdida anual de carbono debida a mortalidad, ton C año<sup>-1</sup>

A = superficie de tierra que permanece en la misma categoría de uso de la tierra, ha

$G_w$  = crecimiento de la biomasa aérea, ton d.m. ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (véase la Ecuación 2.10)

CF = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)<sup>-1</sup>

m = tasa de mortalidad expresada como fracción del crecimiento de la biomasa aérea

Cuando los datos sobre tasas de mortalidad están expresados como proporción del mayor volumen de existencias, entonces el término  $G_w$  de la Ecuación 2.21 se debe reemplazar por el mayor volumen de existencias para estimar la transferencia anual a los depósitos de DOM resultante de la mortalidad.

Las tasas de mortalidad difieren entre las diversas etapas de desarrollo de las arboledas y son más altas durante la fase de exclusión de tallos del desarrollo de arboledas. También difieren según el nivel de existencias, el tipo de bosque, la intensidad de la gestión y la historia de perturbaciones. Por ende, no se justifica la provisión de valores por defecto para una zona climática en su totalidad porque la variación dentro de la zona va a ser mucho mayor que la variación entre zonas.

**Transferencia anual de carbono a broza,  $L_{broza}$**

Implica estimar la cantidad de broza que queda después de la recogida de la madera o de la madera combustible y la transferencia de biomasa producida por la pérdida anual total de carbono debida a la cosecha de madera (Ecuación 2.12). La estimación para la tala de broza se presenta en la Ecuación 2.22 y se deriva de la Ecuación 2.12, como se explica a continuación:

**ECUACIÓN 2.22**  
**TRANSFERENCIA ANUAL DE CARBONO A BROZA**

$$L_{broza} = [\{H \cdot BCEF_R \cdot (1 + R)\} - \{H \cdot D\}] \cdot CF$$

Donde:

$L_{broza}$  = transferencia anual de carbono de biomasa aérea a broza, incluidas raíces muertas, ton C año<sup>-1</sup>

H = cosecha anual de bosques (recogida de madera o de madera combustible), m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>

$BCEF_R$  = factores de conversión y expansión de biomasa aplicables a recogidas de madera, por los que se transforma el volumen venable de remoción de madera en remociones de biomasa aérea, ton remoción de biomasa (m<sup>3</sup> de remociones)<sup>-1</sup>. Si no se dispone de los valores de  $BCEF_R$  y los valores de Densidad se estiman por separado, entonces puede usar la siguiente conversión:

$$BCEF_R = BEF_R \cdot D$$

- D = densidad básica de la madera, ton d.m. m<sup>-3</sup>
- Los Factores de expansión de biomasa ( $BEF_R$ ) expanden las remociones de madera venable a volumen total de biomasa aérea para compensar los componentes no venables del árbol, la arboleda y el bosque. El  $BEF_R$  no tiene dimensión.

R = relación entre la biomasa subterránea y la aérea, en ton d.m. de biomasa subterránea (ton d.m. de biomasa aérea)<sup>-1</sup>. R se debe configurar en cero si el incremento de biomasa en raíces no está incluido en la Ecuación 2.10 (Nivel 1).

CF = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton d.m.)<sup>-1</sup>

La recogida de madera combustible que incluya la remoción de partes vivas de los árboles no genera ningún aporte adicional de biomasa a los depósitos de materia orgánica muerta y ya no se considera en el presente.

En los inventarios en los que se emplean métodos de nivel superior, se puede estimar también la cantidad de tala de broza que queda después de la cosecha definiendo la proporción de biomasa aérea que queda después de la cosecha (ingresar estas proporciones en las celdas B y C del Cuadro 2.1 sobre perturbaciones por cosecha) y empleando el método definido en la Ecuación 2.14. En este método, también sería necesario contar con los datos de la actividad de la superficie cosechada.

### 2.3.2.2 CONVERSIÓN DE TIERRA A UNA NUEVA CATEGORÍA DE USO

La convención para declaración es que todos los cambios en las existencias de carbono y las emisiones de gases de efecto invernadero no CO<sub>2</sub> relacionados con un cambio de uso de la tierra deben declararse en la nueva categoría de uso de la tierra. Por ejemplo, en el caso de la conversión de tierras forestales en tierras de cultivo, tanto los cambios en las existencias de carbono relacionadas con el desmonte forestal, así como todo cambio subsiguiente en las existencias de carbono que resulte de la conversión, se declaren bajo la categoría tierras de cultivo.

En el Nivel 1 se supone que los depósitos de DOM en las categorías no forestales de uso de la tierra tras la conversión equivalen a cero; es decir, que no contienen carbono. En el Nivel 1 se supone que, en la tierra que se convierte de forestal a otra categoría de uso de la tierra, todas las pérdidas de carbono de la DOM se producen en el año de la conversión en el uso de la tierra. Por el contrario, la conversión a tierras forestales trae como resultado un aumento de los depósitos de hojarasca y madera muerta que se inicia en ausencia de carbono en tales depósitos. Las ganancias de carbono en la DOM de las tierras convertidas en forestales se producen de manera lineal, comenzando en cero, durante un período de transición (supuesto, por defecto, en 20 años). Este período por defecto puede ser adecuado para existencias de carbono en hojarasca; sin embargo, en las regiones templadas y boreales quizá sea demasiado escaso para las existencias de carbono en madera muerta. Los países que utilizan métodos de nivel superior, pueden considerar períodos de transición más prolongados subdividiendo la categoría restante para darle cabida a estratos que se encuentran en etapas más tardías de transición.

La estimación de los cambios en las existencias de carbono durante los períodos de transición que suceden a la conversión en el uso de la tierra requiere que a los cohortes anuales de la zona sujeta al cambio en el uso de la tierra se les haga un seguimiento durante el transcurso del período de transición. Por ejemplo, se supone que las existencias de DOM aumentan durante 20 años a partir de la conversión a tierras forestales. Después de los 20 años, la zona convertida ingresa en la categoría de *Tierras forestales que permanecen como tales* y se supone que ya no hay más cambios de DOM, si se aplica un método de Nivel 1. En el caso de los niveles 2 y 3, el período de conversión puede variar según la vegetación y otros factores que determinan el tiempo que demoran los depósitos de hojarasca y de madera muerta en alcanzar un estado estacionario.

En los métodos para estimación de nivel superior, se pueden emplear estimaciones de depósitos de hojarasca y madera muerta diferentes de cero en las categorías o subcategorías que corresponda de uso de la tierra. Por ejemplo, los asentamientos y los sistemas agro-forestales pueden contener algunos depósitos de hojarasca y de madera muerta; no obstante, dado que la gestión, las condiciones de los sitios y muchos otros factores influyen sobre los tamaños de los depósitos, no se pueden ofrecer aquí valores globales por defecto. Con los métodos de nivel superior, también se pueden estimar los detalles de aportes y salidas de materia orgánica muerta relacionados con los cambios en el uso de la tierra.

El método conceptual para estimar los cambios en los inventarios de carbono de los depósitos de madera muerta y hojarasca consiste en estimar la diferencia en existencias de carbono entre la vieja y la nueva categoría y aplicar este cambio en el año de la conversión (pérdidas de carbono) o distribuirla uniformemente a lo largo del período de transición (ganancias de carbono) Ecuación 2.23:

**ECUACIÓN 2.23**

**CAMBIO ANUAL EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO EN MADERA MUERTA Y HOJARASCA DEBIDO A LA CONVERSIÓN EN EL USO DE LA TIERRA**

$$\Delta C_{DOM} = \frac{(C_n - C_o) \cdot A_{on}}{T_{on}}$$

Donde:

$\Delta C_{DOM}$  = cambio en las existencias anuales de carbono en madera muerta u hojarasca, ton C año<sup>-1</sup>

$C_o$  = existencias de madera muerta/hojarasca, bajo la categoría anterior de uso de la tierra, ton C ha<sup>-1</sup>

$C_n$  = existencias de madera muerta/hojarasca, bajo la nueva categoría de uso de la tierra, ton C ha<sup>-1</sup>

$A_{on}$  = superficie sometida a la conversión de la vieja a la nueva categoría de uso de la tierra, ha

$T_{on}$  = lapso en el que se produce la transición de la vieja a la nueva categoría de uso de la tierra, año. El valor por defecto del Nivel 1 es de 20 años para los incrementos de existencias de carbono y de 1 año para las pérdidas de carbono.

En los inventarios en los que se utiliza un método del Nivel 1 se supone que todo el contenido de carbono contenido en la biomasa que muere durante el evento de conversión del uso de la tierra (menos los productos de madera recolectada que se extraen) se emite directamente a la atmósfera y que no hay parte que se agregue a los depósitos de madera muerta y de hojarasca. En los métodos de Nivel 1 se supone también que las pérdidas de carbono de los depósitos de madera muerta y de hojarasca se producen en su totalidad durante el año de la transición.

En los países donde se emplean métodos de nivel superior, se puede modificar el término  $C_0$  de la Ecuación 2.23 contabilizando en primer lugar los efectos inmediatos de la conversión en el uso de la tierra durante el año del evento. En este caso, se le sumaría al  $C_0$  el carbono de la biomasa muerta y transferida a los depósitos de madera muerta y de hojarasca, y se le restaría al  $C_0$  todo el carbono liberado por los depósitos de madera muerta y hojarasca, p. ej. durante el quemado de broza. En ese caso, el  $C_0$  de la Ecuación 2.23 representaría los inventarios de madera muerta y de hojarasca inmediatamente después de la conversión en el uso de la tierra. El  $C_0$  se va a convertir en  $C_n$  durante el período de transición, utilizando una dinámica lineal o más compleja. Se puede definir una matriz de perturbación (Cuadro 2.1) para contabilizar las transiciones y liberaciones de los depósitos durante la conversión en el uso de la tierra, incluyendo los agregados y las remociones de  $C_0$ .

Los países que aplican un método de Nivel 1 pueden aplicar las estimaciones de existencias de carbono por defecto del Nivel 1 para los depósitos de hojarasca y, si están disponibles, para los de madera muerta, provistos en el Cuadro 2.2, aunque se deben tener presente que son estimaciones a gran escala con un nivel considerable de incertidumbre cuando se las aplica a nivel nacional. El Cuadro 2.2 está incompleto debido a la escasez de datos publicados. Una revisión de la bibliografía ha llevado a identificar varios problemas. Las definiciones del IPCC de inventarios de carbono en la materia orgánica muerta incluyen la hojarasca y la madera muerta. El depósito de hojarasca contiene toda la hojarasca más los restos leñosos finos de hasta un diámetro de 10 cm (Véase el Capítulo 1, Cuadro 1.1). Por lo general, los datos de la hojarasca no incluyen como componente los restos leñosos finos, de manera que los valores de la hojarasca del Cuadro 2.2 son incompletos.

Se han publicado numerosos estudios sobre restos leñosos brutos (Harmon y Hua, 1991; Karjalainen y Kuuhuvainen, 2002) y algunos documentos de revisión (p. ej. Harmon *et al.*, 1986) pero, hasta la fecha, sólo se identifican dos estudios que suministran estimaciones de depósitos regionales de carbono en madera muerta basados en datos de parcelas de muestreo. Krankina *et al.* (2002) incluyeron varias regiones de Rusia y declararon estimaciones de restos leñosos brutos (>10 cm de diámetro) de 2 a 7 Mg C ha<sup>-1</sup>. Cooms *et al.* (2002) declararon depósitos regionales de carbono sobre la base de un diseño de muestras estadísticas para una pequeña región de Nueva Zelanda. Compilaciones regionales realizadas para Canadá (Shaw *et al.*, 2005) presentan estimaciones para depósitos de carbono en hojarasca que se basan en una compilación de parcelas de muestreo no representativas, pero no incluyen estimaciones de depósitos de madera muerta. En documentos de revisión, como el de Harmon *et al.* (1986) se compila una cierta cantidad de estimaciones de la bibliografía. Por ejemplo, en el Cuadro 5, se presenta un listado con toda una gama de valores de restos leñosos brutos de bosques deciduos de zonas templadas de entre 11 y 38 Mg de materia seca ha<sup>-1</sup> y para bosques de coníferas de zonas templadas de entre 10 y 511 Mg de materia seca ha<sup>-1</sup>. Sin embargo, estadísticamente, no es válido calcular una media a partir de estas compilaciones, ya que no son representativas de los depósitos de madera muerta de la región.

A pesar de que la intención de estas Directrices del IPCC es brindar valores por defecto para todas las variables que se emplean en las metodologías del Nivel 1, actualmente resulta imposible ofrecer estimaciones de los valores regionales por defecto para los depósitos de carbono en hojarasca (incluyendo restos leñosos finos < 10 cm de diámetro) y en madera muerta (> 10 cm de diámetro). Las estimaciones para depósitos de hojarasca (exceptuando los restos leñosos finos) se muestran en el Cuadro 2.2. La metodología del Nivel 1 sólo requiere las estimaciones del Cuadro 2.2 para tierras convertidas de Tierras Forestales a cualquiera de las demás categorías de uso de la tierra (pérdidas de carbono) y para tierras convertidas a Tierras Forestales (ganancias de carbono). En los métodos del Nivel 1 se supone que los depósitos de hojarasca y de madera muerta equivalen a cero en todas las categorías no forestales y, por lo tanto, las transiciones entre las categorías no forestales no implican cambios en las existencias de carbono de estos dos depósitos.

<b>CUADRO 2.2</b>				
<b>VALORES POR DEFECTO DEL NIVEL 1 PARA EXISTENCIAS DE CARBONO EN HOJARASCA Y MADERA MUERTA</b>				
<b>Clima</b>	<b>Tipo de bosque</b>			
	<b>Deciduo latifoliado</b>	<b>Perenne acicular</b>	<b>Deciduo latifoliado</b>	<b>Perenne acicular</b>
	<b>Depósitos de carbono en hojarasca de bosques maduros</b>		<b>Depósitos de carbono en madera muerta de bosques maduros</b>	
	<b>(ton C ha<sup>-1</sup>)</b>		<b>(ton C ha<sup>-1</sup>)</b>	
Boreal, seco	25 (10 - 58)	31 (6 - 86)	n.d <sup>b</sup>	n.d
Boreal, húmedo	39 (11 - 117)	55 (7 - 123)	n.d	n.d
Templado frío, seco	28 (23 - 33) <sup>a</sup>	27 (17 - 42) <sup>a</sup>	n.d	n.d
Templado frío, húmedo	16 (5 - 31) <sup>a</sup>	26 (10 - 48) <sup>a</sup>	n.d	n.d
Templado cálido, seco	28,2 (23,4 - 33,0) <sup>a</sup>	20,3 (17,3 - 21,1) <sup>a</sup>	n.d	n.d
Templado cálido, húmedo	13 (2 - 31) <sup>a</sup>	22 (6 - 42) <sup>a</sup>	n.d	n.d
Subtropical	2,8 (2 - 3)	4,1	n.d	n.d
Tropical	2,1 (1 - 3)	5,2	n.d	n.d
Fuente:				
Hojarasca: Nótese que estos valores no incluyen restos leñosos finos. Siltanen <i>et al.</i> , 1997; Smith y Heath, 2001; Tremblay <i>et al.</i> , 2002; y Vogt <i>et al.</i> , 1996, convirtieron masa a carbono multiplicando por el factor de conversión 0,37 (Smith y Heath, 2001).				
Madera muerta: no se dispone actualmente de estimaciones regionales sobre depósitos de madera muerta – para mayores comentarios véase el texto.				
<sup>a</sup> Los valores entre paréntesis con el superíndice “a” son los percentiles 5º y 95º de simulaciones de parcelas de inventario, mientras que los que no llevan el superíndice “a” indican toda la gama.				
<sup>b</sup> n.d significa “no disponible”				

### 2.3.3 Cambios en las existencias de carbono de los suelos

Aunque en los suelos se encuentran tanto las formas orgánicas como las inorgánicas del C, lo habitual es que el uso y la gestión de la tierra tengan un impacto mayor sobre los depósitos de C orgánico. En consecuencia, los métodos que se suministran en estas directrices se concentran, en su mayor parte, al C orgánico de los suelos. En general, la influencia del uso y la gestión del suelo sobre el C orgánico del suelo es extremadamente diferente en un suelo de tipo mineral de aquella que se produce en un suelo de tipo orgánico. Los suelos orgánicos (p. ej. turba y estiércol) tienen, como mínimo, entre un 12 y un 20 por ciento de materia orgánica por masa (véase el Capítulo 3, Anexo 3A.5, en cuanto a los criterios específicos de clasificación de suelos orgánicos) y se desarrollan bajo condiciones de mal drenaje en humedales (Brady y Weil, 1999). Todos los demás suelos se clasifican como de tipo mineral y es típico que tengan cantidades relativamente bajas de materia orgánica, y existen en condiciones de drenaje entre moderadas y buenas, y predominando en la mayoría de los ecosistemas a excepción de los humedales. En las dos secciones que siguen se analizan las influencias del uso y la gestión de la tierra sobre estos contrastantes tipos de suelos.

#### SUELOS MINERALES

Los suelos minerales constituyen un depósito de carbono que se ve influenciado por las actividades de uso y gestión de la tierra. El uso de la tierra puede tener un efecto de magnitud sobre el tamaño de este depósito mediante actividades tales como la conversión de pastizales y tierras forestales en tierras de cultivo, por la que se pueden perder entre un 20 y un 40% de las existencias originales de C del suelo (Mann, 1986; Davidson y Ackerman, 1993; Ogle *et al.*, 2005). Dentro de un tipo de uso de la tierra, hay una diversidad de prácticas de gestión que también tienen un impacto significativo sobre el almacenamiento de C en el suelo orgánico, en particular en las tierras de cultivo y en los pastizales (p. ej. Paustian *et al.*, 1997; Conant *et al.*, 2001; Ogle *et al.*, 2004 y 2005). En principio, las existencias de C en el suelo orgánico pueden cambiar sin que haya gestión o perturbaciones si se altera el balance neto entre los aportes y las pérdidas de C del suelo. Las actividades de gestión tienen incidencia en los aportes de C orgánico a través de los cambios en la producción vegetal (como la fertilización o la irrigación utilizadas para mejorar el crecimiento de los cultivos), los agregados directos de C de los abonos orgánicos, y la cantidad de carbono restante después de actividades de remoción de biomasa, como la cosecha de cultivos, de madera, los incendios o el pastoreo. La descomposición controla en gran parte las salidas de carbono y se puede ver influenciada por los cambios en los regímenes de humedad y temperatura, así como por el nivel de perturbaciones del suelo resultante de la actividad de gestión. Hay otros factores que también repercuten sobre la descomposición, como el clima y las características edáficas. Los efectos específicos de las diferentes conversiones del uso de la tierra y regímenes de gestión se analizan en los capítulos específicos de uso de la tierra (Capítulos 4 a 9).

La actividad de cambios y gestión del uso de la tierra también puede tener su influencia sobre el almacenamiento de C orgánico en el suelo al modificarse las tasas de erosión y la subsiguiente pérdida de C de un sitio; parte del C erosionado se descompone durante el transporte y se devuelve CO<sub>2</sub> a la atmósfera, mientras que el resto se deposita en otro lugar. Sin embargo, el efecto neto de la cambiante erosión del suelo a través de la gestión de la tierra es muy incierto porque hay una porción desconocida de C erosionado que se almacena en sedimentos enterrados de humedales, lagos, deltas de ríos y zonas costeras (Smith *et al.*, 2001).

#### SUELOS ORGÁNICOS

Los aportes de materia orgánica pueden exceder a las pérdidas por descomposición bajo condiciones anaeróbicas, las que son comunes en suelos orgánicos sin drenaje, y se pueden acumular cantidades considerables de materia orgánica con el correr del tiempo. La dinámica del carbono de estos suelos está íntimamente relacionada con las condiciones hidrológicas, incluida la humedad reinante, la profundidad del nivel freático, y las condiciones de reducción-oxidación (Clymo, 1984; Thormann *et al.*, 1999). También la composición de las especies y la química de la hojarasca pueden tener influencia sobre esta dinámica (Yavitt *et al.*, 1997).

El carbono almacenado en los suelos orgánicos se descompone rápidamente cuando las condiciones se tornan aeróbicas después del drenaje del suelo (Armentano y Menges, 1986; Kasimir-Klemedtsson *et al.*, 1997). El drenaje es una práctica que se emplea en agricultura y silvicultura para mejorar las condiciones del terreno para el crecimiento vegetal. Los índices de pérdida varían según el clima y el drenaje bajo condiciones más cálidas conduce a tasas de descomposición más rápidas. Las pérdidas de CO<sub>2</sub> también se ven influenciadas por la profundidad del drenaje; el encalado; la fertilidad y la consistencia del sustrato orgánico; y la temperatura (Martikainen *et al.*, 1995). En los inventarios de gases de efecto invernadero se tiene en cuenta este efecto de la gestión.

Aunque lo típico es que el drenaje de suelos orgánicos libere CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Armentano and Menges, 1986), también puede haber una reducción en las emisiones de CH<sub>4</sub> que se produzca en suelos orgánicos no



drenados (Nykänen *et al.*, 1995). Sin embargo, en las directrices para inventarios no se hace referencia a las emisiones de CH<sub>4</sub> de los suelos orgánicos no drenados, a excepción de unos pocos casos en los que se hace referencia a humedales gestionados (Véase el Capítulo 7, Humedales). De manera similar, es típico que en los inventarios nacionales no se estime la acumulación de C en el depósito del suelo que se produce por la acumulación de detritos vegetales en suelos orgánicos no drenados. En general, las tasas de ganancia de C son relativamente lentas en los ambientes de los humedales con suelos orgánicos (Gorham, 1991), y todo intento por estimar las ganancias de C, incluidas las creadas por restauración de humedales, tendría que incluir la consideración del incremento en las emisiones de CH<sub>4</sub>. Véase la orientación adicional en el Capítulo 7, Humedales.

### 2.3.3.1 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE C EN EL SUELO (TIERRAS QUE PERMANECEN EN LA MISMA CATEGORÍA DE USO DE LA TIERRA Y CONVERSIÓN DE TIERRAS A OTROS USOS DE LA TIERRA)

Los inventarios de C en el suelo incluyen estimaciones de los cambios en las existencias de C orgánico del suelo en suelos minerales y emisiones de CO<sub>2</sub> de suelos orgánicos por descomposición microbiana mejorada producida por el drenaje y por la respectiva actividad de gestión. Además, en los inventarios se pueden considerar los cambios de existencias de carbono de los depósitos de C inorgánico en el suelo (p. ej. pastizales calcáreos que se acidifican con el tiempo) si se dispone de información suficiente como para emplear un método de Nivel 3. La Ecuación 2.24 es la que se utiliza para estimar el cambio total en los inventarios de carbono del suelo:

**ECUACIÓN 2.24**  
**CAMBIO ANUAL EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO DE LOS SUELOS**

$$\Delta C_{\text{Suelos}} = \Delta C_{\text{Minerales}} - L_{\text{Orgánicos}} + \Delta C_{\text{Inorgánicos}}$$

Donde:

$\Delta C_{\text{Suelos}}$  = cambio anual en las existencias de carbono de los suelos, ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_{\text{Minerales}}$  = cambio anual en las existencias de carbono orgánico de los suelos minerales, ton C año<sup>-1</sup>

$L_{\text{Orgánicos}}$  = pérdida anual de carbono de suelos orgánicos drenados, ton C año<sup>-1</sup>

$\Delta C_{\text{Inorgánicos}}$  = cambio anual en las existencias de carbono inorgánico de los suelos, ton C año<sup>-1</sup> (se supone como 0 a menos que se emplee un método de Nivel 3).

Para los métodos de los niveles 1 y 2, las existencias de C orgánico del suelo para suelos minerales se calculan a una profundidad por defecto de 30 cm. Se puede seleccionar y utilizar una profundidad mayor a Nivel 2 si se dispone de los datos, pero los factores del Nivel 1 se basan en una profundidad de 30 cm. Las existencias de C en residuos/hojarasca no se incluyen porque se los considera al estimar las existencias de materia orgánica muerta. Los cambios en los inventarios de los suelos orgánicos se basan en factores de emisión que representan la pérdida anual de C orgánico de todo el perfil debida al drenaje. No se suministran métodos de niveles 1 o 2 para estimar el cambio en los inventarios de C inorgánico del suelo debido a la limitada información científica de que se dispone para derivar factores de cambio de inventario; por ende, se supone que el flujo neto de existencias de C inorgánico equivale a cero. Se pueden usar los métodos del Nivel 3 para refinar las estimaciones de los cambios en existencias de C en suelos minerales y orgánicos y para los depósitos de C inorgánico del suelo.

Es posible que haya países que utilicen otros niveles para preparar estimaciones para suelos minerales, orgánicos y C inorgánico del suelo, según la disponibilidad de recursos. Es así que los cambios de existencias para suelos minerales y orgánicos y para depósitos de C inorgánico (sólo Nivel 3) se analizan por separado. Se puede utilizar el árbol de decisiones generalizado de las Figuras 2.4 y 2.5 para ayudar a los compiladores del inventario a determinar el nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de C en suelos minerales y orgánicos, respectivamente.

#### Método de Nivel 1: método por defecto

##### *Suelos minerales*

Para suelos minerales, el método por defecto se basa en los cambios de las existencias de C en el suelo durante un período finito. El cambio se calcula sobre la base de las existencias de C después del cambio de gestión con respecto a las existencias de carbono en una condición de referencia (a saber, vegetación nativa no degradada ni mejorada). Se consideran las siguientes hipótesis:

- (i) Con el transcurso del tiempo, el C orgánico del suelo alcanza un valor estable que se promedia en el espacio y que es específico para el suelo, el clima, el uso de la tierra y las prácticas de gestión; y
- (ii) Los cambios en las existencias de C orgánico del suelo durante la transición a un nuevo carbono orgánico del suelo (SOC, del inglés *soil organic carbon*) en equilibrio se producen de manera lineal.

El supuesto (i), de que, bajo un conjunto dado de condiciones climáticas y de gestión, los suelos tienden a un contenido de carbono en equilibrio, está ampliamente aceptado. Aunque, a menudo, los cambios en el carbono del suelo como respuesta a cambios en la gestión se pueden describir mejor mediante una función curvilínea, el supuesto (ii) simplifica en gran medida la metodología del Nivel 1 y nos brinda una buena aproximación durante un inventario de varios años, mientras están produciéndose cambios en la gestión y conversiones en el uso de la tierra a lo largo del período del inventario.

Empleando el método por defecto, los cambios en las existencias de C del suelo se calculan durante el período que cubre el inventario. Es factible que los períodos de inventario de establezcan sobre la base de los años en los cuales se recopile los datos de la actividad, como 1990, 1995, 2000, 2005 y 2010, lo que correspondería a los períodos de inventario de 1990-1995, 1995-2000, 2000-2005, 2005-2010. Para cada período de inventario, las existencias de C orgánico del suelo se estiman para el primer ( $SOC_{(0-T)}$ ) y segundo año ( $SOC_0$ ) basándose en la multiplicación de las existencias de C de referencia por los factores de cambio de existencias. Los índices anuales de cambio en las existencias de carbono se estiman como la diferencia entre las existencias de dos momentos dados dividida por la dependencia temporal de los factores de cambio de existencias.

**ECUACIÓN 2.25**  
**CAMBIO ANUAL EN LAS EXISTENCIAS DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS MINERALES**

$$\Delta C_{\text{Minerales}} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D}$$

$$SOC = \sum_{c,s,i} (SOC_{REF_{c,s,i}} \cdot F_{LU_{c,s,i}} \cdot F_{MG_{c,s,i}} \cdot F_{I_{c,s,i}} \cdot A_{c,s,i})$$

(Nota: En esta ecuación, se utiliza T en lugar de D cuando T es  $\geq 20$  años, véase la nota al pie)

Donde:

$\Delta C_{\text{Minerales}}$  = cambio anual en las existencias de carbono de los suelos minerales, ton C año<sup>-1</sup>

$SOC_0$  = existencias de carbono orgánico en el suelo en el último año de un período de inventario, ton C

$SOC_{(0-T)}$  = existencias de carbono orgánico en el suelo al comienzo de un período de inventario, ton C

$SOC_0$  y  $SOC_{(0-T)}$  se calculan utilizando la ecuación del SOC del recuadro donde se asignan los factores de referencia para existencias y cambios de existencias de carbono según las actividades de uso y gestión de la tierra y las superficies respectivas en cada uno de los momentos (momento = 0 y momento = 0-T)

T = cantidad de años de un período de inventario dado, año

D = Dependencia temporal de los factores de cambio de existencias, que es el lapso por defecto para la transición entre los valores de equilibrio del SOC, año. Habitualmente 20 años, pero depende de las hipótesis que se apliquen en el cálculo de los factores  $F_{LU}$ ,  $F_{MG}$  y  $F_I$ . Si T es mayor que D, úsese el valor de T para obtener la tasa anual de cambio durante el tiempo de inventario (0 – T años).

c = representa las zonas climáticas, s los tipos de suelo, e i el conjunto de sistemas de gestión que se dan en un país dado.

$SOC_{REF}$  = las existencias de carbono de referencia, ton C ha<sup>-1</sup> (Cuadro 2.3)

$F_{LU}$  = factor de cambio de existencias para sistemas de uso de la tierra o subsistemas de un uso de la tierra en particular, sin dimensión

[Nota:  $F_{ND}$  se sustituye por  $F_{LU}$  en el cálculo del C en suelos forestales para estimar la influencia de los regímenes de perturbaciones naturales.

$F_{MG}$  = factor de cambio de existencias para el régimen de gestión, sin dimensión

$F_I$  = factor de cambio de existencias para el aporte de materia orgánica, sin dimensión

- A = superficie de tierra del estrato que se estima, ha. Toda la tierra del estrato debe tener condiciones biofísicas (es decir, clima y tipo de suelo) y una historia de gestión durante el período de inventario en común para que se la pueda considerar en su conjunto con fines analíticos.

Los cálculos de inventario se basan en superficies de tierra que están estratificadas por regiones climáticas (véase el Capítulo 3, Anexo 3A.5), en cuanto a clasificación de climas por defecto) y en tipos de suelo por defecto, como se indica en el Cuadro 2.3 (véase el Capítulo 3, Anexo 3A.5, en cuanto a clasificación de suelos por defecto). Los factores de cambio de las existencias se definen a grandes rasgos e incluyen: 1) un factor de uso de la tierra ( $F_{LU}$ ) que refleja los cambios en las existencias de carbono relacionados con el tipo de uso de la tierra, 2) un factor de gestión ( $F_{MG}$ ) que representa la principal práctica de gestión específica del sector de uso de la tierra (p. ej. diferentes prácticas de labores en tierras de cultivo), y 3) un factor de aporte ( $F_1$ ) que representa los distintos niveles de aporte de C al suelo. Como se mencionara precedentemente,  $F_{ND}$  se sustituye por  $F_{LU}$  en las tierras forestales a fin de compensar la influencia de los regímenes de perturbaciones naturales (véase un análisis más detallado en el Capítulo 4, Sección 4.2.3). Los factores de cambio de existencias se incluyen en las secciones de C del suelo de los capítulos referidos a cada uso de la tierra en particular. Cada uno de estos factores representa el cambio que se produce durante un número dado de años ( $D$ ), lo que puede variar para los distintos sectores, aunque es típico que sea invariable dentro de los sectores (p. ej. 20 años para los sistemas de tierras de cultivo). En ciertos inventarios, el tiempo requerido para el inventario ( $T$  años) puede exceder a  $D$  y, bajo tales circunstancias, se puede obtener una tasa anual de cambio en el inventario de C dividiendo el producto de  $[(SOC_0 - SOC_{(0-T)}) \bullet A]$  por  $T$ , en lugar de  $D$ . Véanse las secciones de C del suelo en los capítulos sobre cada uso de la tierra por orientación detallada y paso a paso sobre la aplicación de este método.

<b>CUADRO 2.3</b> <b>REFERENCIA POR DEFECTO (EN CASO DE VEGETACIÓN NATIVA) DE EXISTENCIAS DE C ORGÁNICO (SOC<sub>REF</sub>) PARA SUELOS MINERALES (TON C HA<sup>-1</sup> ENTRE 0 Y 30 CM DE PROFUNDIDAD)</b>						
Región climática	Suelos HAC <sup>1</sup>	Suelos LAC <sup>2</sup>	Suelos arenosos <sup>3</sup>	Suelos espódicos <sup>4</sup>	Suelos volcánicos <sup>5</sup>	Humedales <sup>6</sup>
Boreal	68	NA	10 <sup>#</sup>	117	20 <sup>#</sup>	146
Templado frío, seco	50	33	34	NA	20 <sup>#</sup>	87
Templado frío, húmedo	95	85	71	115	130	
Templado cálido, seco	38	24	19	NA	70 <sup>#</sup>	88
Templado cálido, húmedo	88	63	34	NA	80	
Boreal, seco	38	35	31	NA	50 <sup>#</sup>	86
Tropical, húmedo	65	47	39	NA	70 <sup>#</sup>	
Tropical, muy húmedo	44	60	66	NA	130 <sup>#</sup>	
Tropical montano	88*	63*	34*	NA	80*	

Nota: Los datos se derivaron de bases de datos sobre suelos descritas por Jobbagy y Jackson (2000) y por Bernoux *et al.* (2002). Se indican las existencias medias. Se supone una estimación de error nominal de ±90% (expresado como desviaciones estándar 2x como porcentaje de la media) para los tipos de suelo por clima. NA significa 'no aplicable' porque, normalmente, estos suelos no se encuentran en ciertas zonas climáticas.

<sup>#</sup> Indica donde no hay datos disponibles y se mantuvieron los datos por defecto de las *Directrices del IPCC de 1996*.

\* No se dispuso de datos para estimar directamente las existencias de C de referencia para estos tipos de suelo en el clima tropical montano por lo que las existencias se basaron en estimaciones derivadas de la región templada cálida húmeda en las que las temperaturas y las precipitaciones anuales medias son similares.

<sup>1</sup> Los suelos con minerales arcillosos de alta actividad (HAC, del inglés *high activity clay*) son entre leve y moderadamente erosionados, dominados por minerales silicato-arcillosos 2:1 en la clasificación de la Base Mundial de Referencia para los Recursos de Suelos (WRB, del inglés *World Reference Base for Soil Resources*): Leptosoles, Vertisoles, Kastanozems, Chernozems, Phaeozems, Luvisoles, Alisoles, Albeluvisoles, Solonetz, Calcisoles, Gypsisoles, Umbrisoles, Cambisoles, Regosoles; en la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, del inglés *United States Department of Agriculture*): Mollisoles, Vertisoles, Alfisoles con alta saturación de bases, Aridisoles, Inceptisoles).

<sup>2</sup> Los suelos con minerales de arcilla de baja intensidad (LAC, del inglés *low activity clay*) son muy erosionados, con predominio de minerales arcillosos 1:1, hierro amorfo y óxidos de aluminio (en la clasificación de la WRB: Acrisoles, Lixisoles, Nitisoles, Ferralsoles, Durisoles; en la clasificación del USDA: Ultisoles, Oxisoles, Alfisoles ácidos).

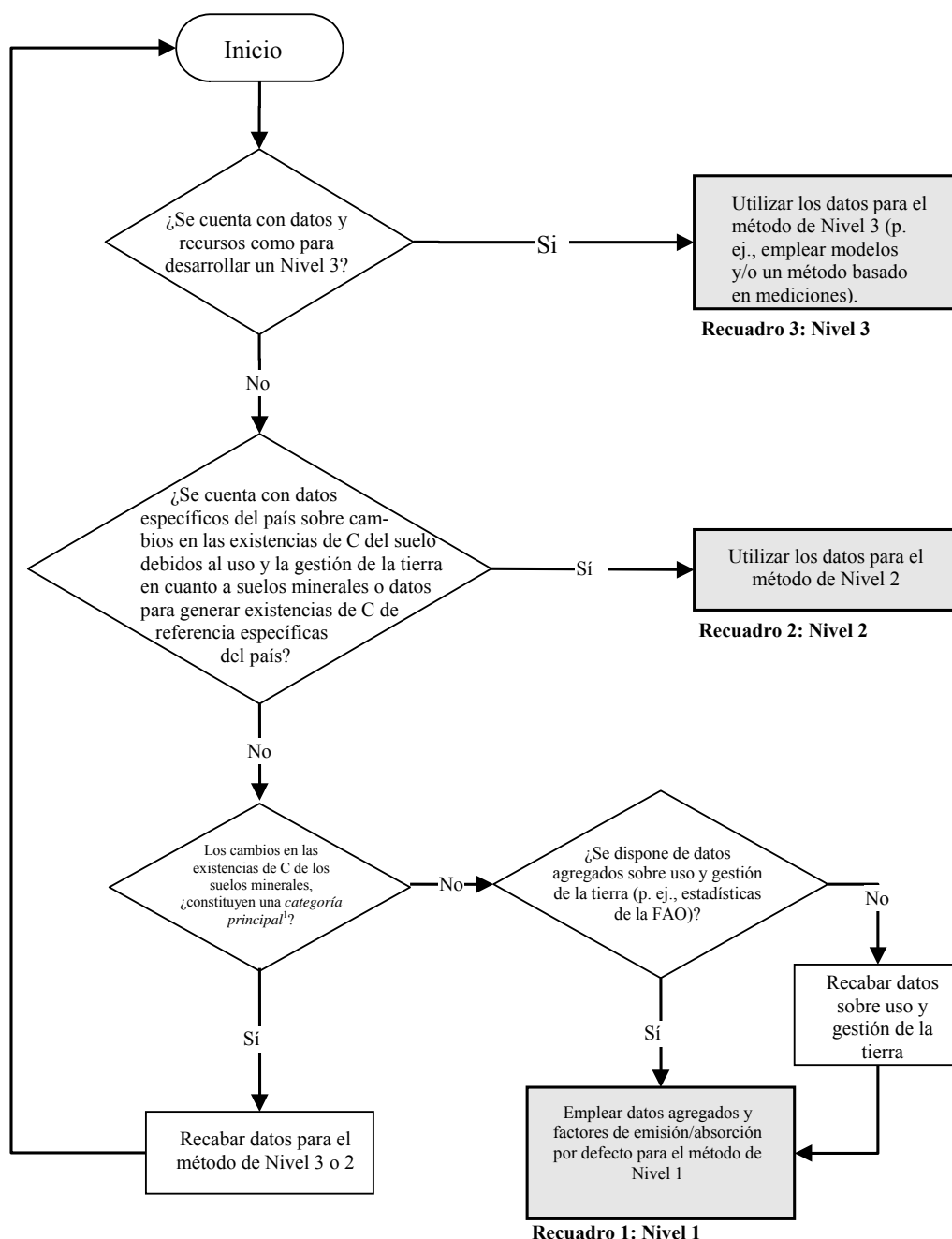
<sup>3</sup> Incluye todos los suelos (independientemente de su clasificación taxonómica) que tienen >70% de arena y <8% de arcilla, en base a análisis de textura estándar (en la clasificación de la WRB: Arenosoles; en la clasificación del USDA: Psamments).

<sup>4</sup> Suelos que muestran una fuerte podzolización (en la clasificación de la WRB: los Podzoles; en la clasificación del USDA: los Spodosoles).

<sup>5</sup> Los suelos derivados de cenizas volcánicas con mineralogía alofánica (en la clasificación de la WRB: Andosoles; en la clasificación del USDA: Andisoles).

<sup>6</sup> Suelos con drenaje limitado, lo que trae acarreadas periódicas inundaciones y condiciones anaeróbicas (en la clasificación de la WRB: Gleysoles; en la clasificación del USDA: subórdenes Aquic).

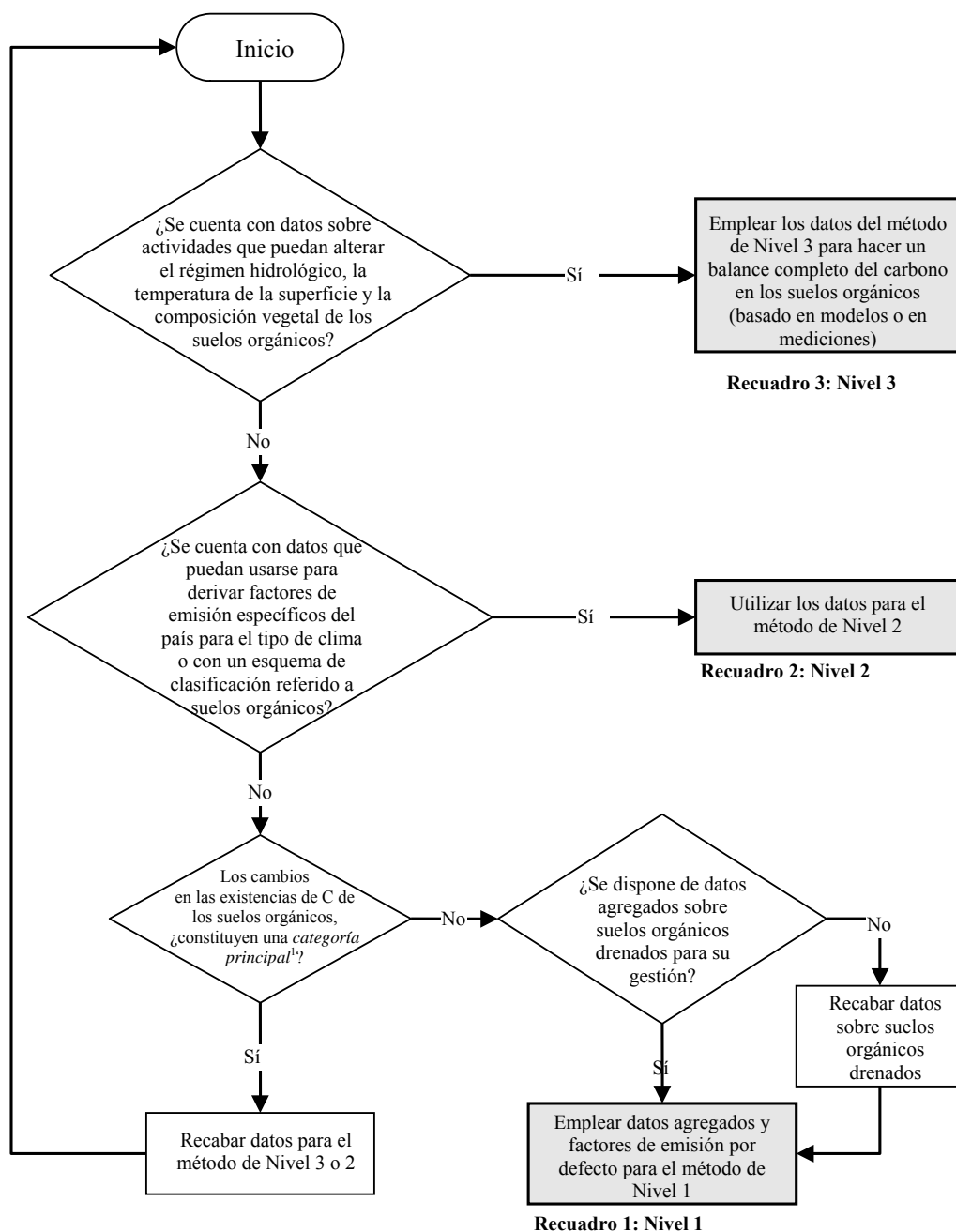
**Figura 2.4**      **Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en suelos minerales por categoría de uso de la tierra.**



Nota:

1: Véase el Volumen 1, Capítulo 4, «Opción metodológica e identificación de categorías principales» (principalmente la sección 4.1.2 relativa a los recursos limitados) para el análisis de las *categorías principales* y el uso de los árboles de decisión.

**Figura 2.5** Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar los cambios en las existencias de carbono en suelos orgánicos por categoría de uso de la tierra.



Nota:

1: Véase el Volumen 1, Capítulo 4, «Opción metodológica e identificación de categorías principales» (principalmente la sección 4.1.2 relativa a los recursos limitados) para el análisis de las *categorías principales* y el uso de los árboles de decisión.

Cuando se aplica el método de Nivel 1, e incluso el de Nivel 2, empleando la Ecuación 2.25, los datos de la actividad del tipo de uso y de gestión de la tierra tienen una influencia directa en la formulación de la ecuación (véase el Recuadro 2.1). Los datos de actividad recopilados con el Método 1 concuerdan con la Fórmula A, mientras que los datos de la actividad recopilados con el Método 2 o 3 concorderán con la Fórmula B (Véase el Capítulo 3 por un análisis adicional sobre los Métodos para la recolección de datos de la actividad).

#### RECUADRO 2.1

##### FORMULACIONES ALTERNATIVAS DE LA ECUACIÓN 2.25 PARA LOS DATOS DE LA ACTIVIDAD DEL MÉTODO 1 VERSUS LOS DATOS DE LA ACTIVIDAD DE LOS MÉTODOS 2 O 3 CON MATRICES DE TRANSICIÓN

Hay dos formulaciones alternativas posibles para la Ecuación, según el Método que se utilice para recopilar los datos de la actividad, incluyendo:

##### Fórmula A (Método 1 para recolección de datos de la actividad)

$$\Delta C_{\text{Minerales}} = \frac{\left[ \sum_{c,s,i} \left( SOC_{REF_{c,s,i}} \cdot F_{LU_{c,s,i}} \cdot F_{MG_{c,s,i}} \cdot F_{I_{c,s,i}} \cdot A_{c,s,i} \right) \right]_0 - \left[ \sum_{c,s,i} \left( SOC_{REF_{c,s,i}} \cdot F_{LU_{c,s,i}} \cdot F_{MG_{c,s,i}} \cdot F_{I_{c,s,i}} \cdot A_{c,s,i} \right) \right]_{(0-T)}}{D}$$

##### Fórmula B (Métodos 2 y 3 para recolección de datos de la actividad)

$$\Delta C_{\text{Minerales}} = \frac{\sum_{c,s,p} \left[ \left\{ \left( SOC_{REF_{c,s,p}} \cdot F_{LU_{c,s,p}} \cdot F_{MG_{c,s,p}} \cdot F_{I_{c,s,p}} \right)_0 - \left( SOC_{REF_{c,s,p}} \cdot F_{LU_{c,s,p}} \cdot F_{MG_{c,s,p}} \cdot F_{I_{c,s,p}} \right)_{(0-T)} \right\} \cdot A_{c,s,p} \right]}{D}$$

Donde:

$p$  = parcela de tierra

Véase la descripción de otros términos bajo la Ecuación 2.25.

Puede que los datos de la actividad sólo estén disponibles aplicando el Método 1 para la recolección de datos (Capítulo 3). Estos datos incluyen el total de la superficie en dos momentos dados para los sistemas climáticos, de suelos y de uso/gestión de la tierra, sin cuantificación de las transiciones específicas en el uso y la gestión de la tierra durante el lapso que duró el inventario (es decir, sólo se conoce el cambio acumulado o neto, pero no los cambios brutos de actividad). Con los datos de la actividad del Método 1, los cambios en las existencias de C mineral se computan empleando la fórmula A de la Ecuación 2.25. Contratando con lo anterior, los datos de la actividad se pueden recopilar sobre la base de sondeos, de imágenes de detección remota o de otros datos que suministran no sólo las superficies totales para cada sistema de gestión de la tierra, sino también las transiciones específicas en el uso y la gestión de la tierra con el correr del tiempo en parcelas individuales de tierra. Se los considera datos de la actividad de los Métodos 2 y 3 en el Capítulo 3, y los cambios en las existencias de C del suelo se calculan utilizando la fórmula B de la Ecuación 2.25. La Fórmula B contiene los valores acumulados por parcela de tierra (es decir, “ $p$ ” representa las parcelas de la fórmula B y no el conjunto de sistemas de gestión “ $i$ ”), lo que le permite al compilador del inventario calcular los cambios de las existencias de C parcela por parcela.

Se requiere atención especial si se emplean los datos de la actividad del Método 1 (Véase el Capítulo 3) como base para estimar los efectos del uso y la gestión de la tierra sobre las existencias de C en el suelo, empleando la Ecuación 2.25. Los datos del Método 1 no registran las transiciones de parcelas individuales y, por lo tanto, los

cambios de las existencias del SOC se calculan para períodos de inventario equivalentes a D años, o lo más cercanos posible a D, lo que significa 20 años en el método del Nivel 1. Por ejemplo, las tierras de cultivo se pueden convertir de laboreo total a ninguna gestión de laboreo entre 1990 y 1995, y por la Fórmula A (véase el Recuadro 2.1) se estimaría una ganancia de C del suelo para ese período del inventario. En cambio, suponiendo que esa misma parcela permanece sin laboreo alguno entre 1995 y 2000, no se computaría ganancia adicional de C (es decir, las existencias para 1995 se basarían en gestión sin laboreo y no diferirían de las existencias del año 2000 ( $SOC_0$ ), que también están basadas en gestión sin laboreo). Si se emplea el método por defecto, habría un error en esta estimación porque el cambio en las existencias de C del suelo se produce durante el transcurso de 20 años (es decir,  $D = 20$  años). Por lo tanto,  $SOC_{(0-T)}$  se estima para el momento más distante que se emplee en los cálculos del inventario de hasta D años previos al último año de los períodos de inventario ( $SOC_0$ ). Por ejemplo, suponiendo que D es 20 y que el inventario se basa en datos de la actividad de los años 1990, 1995, 2000, 2005 y 2010,  $SOC_{(0-T)}$  se calculará para 1990 para estimar el cambio en C orgánico del suelo para cada uno de los demás años, (es decir, 1995, 2000, 2005 y 2010). El año para la estimación del  $SOC_{(0-T)}$  en este ejemplo no va a cambiar hasta que se recopilen los datos de la actividad del año 2011 o posteriores (p. ej. el cálculo del cambio en las existencias de C para 2011 se basaría en el año más distante, que no exceda a D, lo que en este ejemplo sería 1995).

Si se dispone de matrices de transición (es decir, datos de la actividad de los Métodos 2 o 3), los cambios pueden estimarse entre cada uno de los años sucesivos. Partiendo del ejemplo anterior, ciertas tierras sin laboreo pueden volver a una gestión de laboreo total entre 1995 y 2000. En este caso, la ganancia en reservas de C entre 1990 y 1995 para las tierras vueltas a laboreo total debe descontarse entre 1995 y 2000. Es más: no sería necesario ningún cambio adicional en las existencias de C para las tierras vueltas a laboreo total después de 2000 (suponiendo que la gestión de laboreo siguió siendo la misma). Sólo las tierras que permanecieran sin laboreo continuarían ganando C hasta 2010 (es decir, considerando que D es 20 años). Por ende, en los inventarios en los que se empleen matrices de transición de los datos de la actividad de los Métodos 2 y 3 se deberá tener más cuidado al manejar los períodos para los cuales se calculan pérdidas o ganancias de SOC. Véase el Recuadro 2.2 para mayores detalles. La aplicación del método de estimación de C del suelo es mucho más simple si se utilizan solamente estadística agregadas con los datos de actividad del Método 1. No obstante, constituye una *buena práctica* que los países utilicen matrices de transición de los datos de la actividad de los Métodos 1 y 2 si esa información está disponible, porque los datos estadísticos más detallados van a proporcionar una estimación mejorada de los cambios anuales en las existencias de C orgánico de los suelos.

Puede haber algunos casos en los que los datos de la actividad se recopilan durante lapsos más prolongados que el tiempo del que dependen los factores de cambio de existencias (D), como cada 30 años con un D de 20. En esos casos, los cambios anuales de existencias pueden estimarse directamente entre los sucesivos años de recolección de datos de la actividad (p. ej. 1990, 2020 y 2050) sin que se sobreestime o se subestime la tasa de cambio anual, siempre que se sustituya T por D en la Ecuación 2.25.

### **Suelos orgánicos**

La metodología básica para estimar las emisiones de C de suelos orgánicos (p. ej. derivados de turba) es asignar un factor de emisión anual por el que se estiman las pérdidas de C que siguen al drenaje. El drenaje estimula la oxidación de la materia orgánica previamente acumulada en un ambiente mayormente anóxico. Específicamente la superficie de los suelos orgánicos drenados y gestionados bajo cada tipo de clima se multiplica por el factor de emisión asociado para derivar una estimación de las emisiones anuales de  $CO_2$  (fuente), según se presenta en la Ecuación 2.26:

**ECUACIÓN 2.26**  
**PÉRDIDA ANUAL DE CARBONO DE SUELOS ORGÁNICOS DRENADOS ( $CO_2$ )**

$$L_{Orgánicos} = \sum_c (A \cdot EF)_c$$

Donde:

$L_{orgánicos}$  = pérdida anual de carbono de suelos orgánicos drenados, ton C año<sup>-1</sup>

A = superficie de los suelos orgánicos drenados en el tipo de clima  $c$ , ha

Nota: La A es la misma superficie ( $F_{os}$ ) que se utiliza para estimar las emisiones de  $N_2O$  en el Capítulo 11, Ecuaciones 11.1 y 11.2.

EF = factor de emisión para el tipo de clima  $c$ , ton C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

Véanse las secciones sobre C del suelo en los capítulos de cada uso de la tierra por orientación paso a paso, respecto a la aplicación de este método.



**RECUADRO 2.2**  
**COMPARACIÓN ENTRE EL USO DE LAS ESTADÍSTICAS AGREGADAS DEL MÉTODO 1 Y LOS DATOS DE LA**  
**ACTIVIDAD DE LOS MÉTODOS 2 O 3 CON MATRICES DE TRANSICIÓN**

Suponer un país en el que la fracción de tierra esté sujeta a cambios en el uso de la tierra, como se indica en el cuadro siguiente, donde cada línea representa a una unidad de territorio con una superficie de 1 Mha (F = tierras forestales; C = tierras de cultivo; G = Pastizales).

Ident. unidad territorial	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
1	F	C	C	C	C	C	C
2	F	C	C	C	G	G	G
3	G	C	C	C	C	G	G
4	G	G	F	F	F	F	F
5	C	C	C	C	G	G	G
6	C	C	G	G	G	C	C

Para simplificar, se asume que el país tiene un único tipo de suelo, con un valor de  $SOC_{Ref}$  (0-30 cm) de  $77 \text{ ton C há}^{-1}$ , correspondiente a vegetación boscosa. Los valores de  $F_{LU}$  son 1,00, 1,05 y 0,92 para F, G y C, respectivamente. Se asume que  $F_{MG}$  y  $F_I$  equivalente a 1. La dependencia temporal de los factores de cambio de existencias (D) es de 20 años. Por último, se supone que el uso de la tierra está en equilibrio en 1990 (es decir, que no se produjeron cambios en el uso de la tierra durante los 20 años previos a 1990). Cuando se emplean los datos de la actividad del Método 1 (es decir, datos estadísticos agregados), los cambios anuales en las existencias de carbono se calculan para cada año de inventario siguiendo la Ecuación 2.25 precedente. En la tabla siguiente se presentan los resultados de los cálculos:

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
F (Mha)	2	0	1	1	1	1	1
G (Mha)	2	1	1	1	3	3	3
C (Mha)	2	5	4	4	2	2	2
<b><math>SOC_0</math> (Mt C)</b>	<b>458</b>	<b>436</b>	<b>442</b>	<b>442</b>	<b>462</b>	<b>462</b>	<b>462</b>
$SOC_{(0-T)}$ (Mt C)	458	458	458	458	458	436	442
<b><math>\Delta C_{Mineral}</math> (Mt C año<sup>-1</sup>)</b>	<b>0</b>	<b>-1.1</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	<b>0.2</b>	<b>1.3</b>	<b>1.0</b>

Si se utilizan datos de los Métodos 2 o 3, en lo que se conocen explícitamente los cambios en el uso de la tierra, las existencias de carbono se pueden contabilizar teniendo en cuenta los cambios históricos de cada unidad territorial en particular. El total de las existencias de carbono de la suma de todas las unidades se compara con el año de inventario anterior más próximo, y no con el inventario de 20 años atrás, para estimar los cambios anuales en las existencias de carbono.

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
$SOC_0$ (Mt C) p/la unidad 1	77.0	75.5	74.0	72.5	71.0	71.0	71.0
$SOC_0$ (Mt C) p/la unidad 2	77.0	75.5	74.0	72.5	75.0	77.5	80.0
$SOC_0$ (Mt C) p/la unidad 3	81.0	78.5	76.0	73.5	71.0	73.5	76.0
$SOC_0$ (Mt C) p/la unidad 4	81.0	81.0	80.0	79.0	78.0	77.0	77.0
$SOC_0$ (Mt C) p/la unidad 5	71.0	71.0	71.0	71.0	73.5	76.0	78.5
$SOC_0$ (Mt C) p/la unidad 6	71.0	71.0	73.5	76.0	78.5	76.0	73.5
<b><math>SOC_0</math> (Mt C)</b>	<b>458</b>	<b>453</b>	<b>449</b>	<b>445</b>	<b>447</b>	<b>451</b>	<b>456</b>
$SOC_{(0-T)}$ (Mt C)	458	458	453	449	445	447	451
<b><math>\Delta C_{Mineral}</math> (Mt C año<sup>-1</sup>)</b>	<b>0</b>	<b>-1.1</b>	<b>-0.8</b>	<b>-0.8</b>	<b>0.5</b>	<b>0.8</b>	<b>1.0</b>

Los dos métodos dan como resultado estimaciones diferentes de las existencias de carbono, y el uso de los datos de los Métodos 2 o 3 con matrices de transición sería más exacto que el uso de las estadísticas agregadas del Método 1. No obstante, generalmente, las estimaciones de los cambios anuales de las existencias de carbono no serían muy diferentes, como se muestra en este ejemplo. El efecto de la forma de abordar los datos subyacentes en las estimaciones difiere más cuando hay múltiples cambios en el uso de la tierra en el mismo terreno (como en las unidades territoriales 2, 3 y 6 del ejemplo anterior). Es de hacer notar que los datos de la actividad de los Métodos 1, 2 y 3 producen los mismos cambios en las existencias de C si los sistemas alcanzan un nuevo equilibrio, lo que sucede cuando no hay cambios en el uso y la gestión de la tierra durante un período de 20 años empleando el método de Nivel 1. Por lo tanto, no se pierden inadvertidamente incrementos o pérdidas en las existencias de C cuando se aplican los métodos respecto de los datos de la actividad de los Métodos 1, 2 o 3, aunque la dinámica temporal sí varía en cierto grado como se demostró anteriormente.

### ***C inorgánico del suelo***

Los efectos de las actividades de uso y gestión de la tierra sobre las existencias y los flujos de C en suelos inorgánicos tienen relación con la hidrología del lugar y dependen de la mineralogía específica del suelo. Es más: la estimación correcta de los efectos requiere seguirle el rastro al carbono inorgánico disuelto que se descarga y a los cationes de base de la tierra gestionada, por lo menos hasta que hayan sido capturados por completo en el ciclo de C inorgánico oceánico. Por ende, se requiere un análisis hidrogeoquímico exhaustivo que rastree el destino de especies disueltas de CO<sub>2</sub>, carbonato y bicarbonato y de cationes de base (p. ej. Ca y Mg) aplicados a, que se encuentran en o descargados de tierras gestionadas en el largo plazo, para poder estimar correctamente los cambios en las existencias netas. Un análisis de este carácter requiere un método del Nivel 3.

### **Método de Nivel 2: incorporación de datos específicos del país**

Un método del Nivel 2 es una extensión natural del método de Nivel 1 que permite que, en un inventario, se incorporen datos específicos del país, a la vez que se utilizan ecuaciones por defecto proporcionadas para suelos minerales y orgánicos. Constituye una *buena práctica* que los países utilicen un método de Nivel 2 –de ser posible–, incluso si sólo pueden especificar mejor ciertos componentes del método por defecto del Nivel 1. Por ejemplo, un país puede contar solamente con datos para derivar existencias de C de referencia que son específicas del país, las que, entonces, se utilizarían con factores por defecto de cambio de existencias para estimar los cambios en las existencias de C orgánico del suelo para suelos minerales.

### ***Suelos minerales***

Los datos específicos del país pueden usarse para mejorar cuatro componentes del método de inventario de Nivel 1 en la estimación de cambios de existencias en suelos minerales, incluida la derivación de factores de cambio de existencias específicas de la región o del país y/o existencias de C de referencia, además de mejorar las especificaciones de los sistemas de gestión, el clima o las categorías de suelos (p. ej. Ogle *et al.*, 2003; Vanden Bygaart *et al.*, 2004; Tate *et al.*, 2005). Los compiladores del inventario pueden decidir derivar valores específicos para todos estos componentes, o para cualquier subconjunto, los que se combinarían con valores por defecto provistos en el método del Nivel 1 para completar los cálculos de inventario empleando la Ecuación 2.25. Asimismo, en el Nivel 2 se utiliza un procedimiento con los mismos pasos para los cálculos que el Nivel 1.

**1) Cómo definir sistemas de gestión** Aunque se pueden utilizar los mismos sistemas de gestión en un inventario de Nivel 2 que los que se encuentran en el Nivel 1, los sistemas por defecto pueden desagregarse a una categorización más exacta que represente mejor los impactos de la gestión sobre las existencias de C orgánico en el suelo en un país dado, sobre la base de los datos empíricos (es decir, que los factores de cambio de existencias varíen significativamente para los sistemas de gestión propuestos). Sin embargo, semejante tarea sólo es posible si hay suficiente detalle en los datos que sustentan la clasificación de la superficie de tierra en el conjunto más exacto y más detallado de sistemas de gestión.

**2) Regiones climáticas y tipos de suelos.** Los países que cuentan con clasificaciones detalladas de los suelos y con datos climáticos tienen la opción de desarrollar clasificaciones específicas del país. Más aun: se considera una *buena práctica* especificar mejor las regiones climáticas y los tipos de suelos durante el desarrollo de un inventario de Nivel 2 si la nueva clasificación mejora las especificaciones de las existencias de C de referencia y/o los factores de cambio de existencias. En la práctica, las existencias de carbono de referencia y/o los factores de cambio de existencias deben diferir significativamente entre las regiones climáticas y los tipos de suelo propuestos, sobre la base de un análisis empírico. Nótese que especificar nuevas regiones climáticas y/o tipos de suelos exige derivar las existencias de C de referencia y los factores de cambio de existencias que sean específicos del país. Las existencias de C de referencia y los factores de cambio de existencias por defecto sólo son apropiados para inventarios en los que se emplean tipos de clima y de suelos por defecto.

**3) Existencias de C de referencia** Derivar existencias de C de referencia específicas para el país (SOC<sub>Ref</sub>) es otra posibilidad para mejorar un inventario cuando se usa un método de Nivel 2 (Bernoux *et al.*, 2002). Es factible que el uso de datos específicos del país para estimar las existencias de referencia produzca valores más exactos y representativos. La derivación de existencias de C del suelo de referencia específicas para un país se puede lograr a partir de las mediciones de suelos, por ejemplo, como parte de un relevamiento de suelos del país. Es importante que se utilicen descripciones taxonómicas fiables para agrupar los suelos en categorías. Hay otros tres aspectos a considerar al derivar valores específicos del país, incluidas las posibles especificaciones de categorías de suelos y regiones climáticas específicas del país (es decir, en lugar de utilizar la clasificación por defecto del IPCC), la elección de la condición de referencia, y el incremento de la profundidad en base al cual se estiman las existencias. Las existencias se calculan multiplicando la proporción de carbono orgánico (es decir, %C dividido por 100) por el incremento de profundidad (por defecto es de 30 cm), la densidad aparente, y la proporción de suelo libre de fragmentos gruesos (es decir, fragmentos de < 2 mm) en el incremento de la profundidad (Ogle *et al.*, 2003). La proporción de libre de fragmentos gruesos se basa en la masa (es decir, masa de suelo libre de fragmentos gruesos/masa total del suelo).

La condición de referencia es la categoría de uso de la tierra/cubierta que se utiliza para evaluar el efecto relativo de los cambios en el uso de la tierra sobre la cantidad de reserva de C en el suelo (p. ej. diferencia relativa en reservas de C entre una condición de referencia, como la de las tierras nativas, y otros usos de la tierra, como en las tierras de cultivo, que brindan la base para  $F_{LU}$  en la Ecuación 2.25). El método del Nivel 1, la condición de referencia es la de las tierras nativas (es decir, tierras no degradadas ni mejoradas con vegetación natural) y es factible que muchos países utilicen esta misma referencia en un método de Nivel 2. No obstante, se puede seleccionar otro uso de la tierra para la referencia y esto se consideraría una *buena práctica* si permite realizar una evaluación más sólida de los valores de existencias de referencia específicos de un país. Las existencias de referencia deben ser coherentes para todos los usos de la tierra (es decir, tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales, asentamientos y otras tierras), lo que requiere coordinación entre los distintos equipos a cargo de los inventarios de C del suelo para el Sector AFOLU.

Otro aspecto a considerar en la derivación de existencias de C de referencia específicas para un país es la posibilidad de estimar las reservas de C a mayor profundidad en el suelo (es decir, a un perfil más bajo). En las existencias por defecto que se proporcionan en el Cuadro 2.3 se contabiliza el C orgánico presente en los 30 cm superiores del perfil del suelo. Es una *buena práctica* derivar las existencias de C de referencia a una mayor profundidad si hay datos suficientes y si queda claro que los cambios en el uso del suelo y su gestión tienen un impacto significativo sobre el incremento de profundidad propuesto. Todo cambio en la profundidad respecto a las existencias de C de referencia exige la derivación de nuevos factores de cambio de existencias, dado que los valores por defecto también están basados en impactos a una profundidad de 30 cm.

**4) Factores de cambio de existencias** Un avance importante para un método del Nivel 2 es la estimación de los factores de cambio de existencias específicos para un país ( $F_{LU}$ ,  $F_{MG}$  and  $F_I$ ). La derivación de los factores específicos del país se puede lograr utilizando datos experimentales/de mediciones y la simulación de modelos por ordenador. En la práctica, derivar los factores de cambio de existencias implica estimar una relación de respuesta para cada estudio u observación (es decir, las existencias de C en diferentes clases de aportes o de gestión se dividen por el valor para la práctica nominal, respectivamente).

Lo óptimo es que los factores de cambio de existencias se basan en datos experimentales/de medición en el país o en la región circundante, mediante la estimación de las relaciones de respuesta de cada estudio y, después, analizando esos valores empleando una técnica estadística apropiada (p. ej. Ogle *et al.*, 2003 y 2004; Vanden Bygaart *et al.*, 2004). Se puede encontrar estudios en la bibliografía, informes y otras fuentes, o los compiladores del inventario pueden decidir realizar nuevos experimentos. Independientemente de la fuente de datos, constituye una *buena práctica* que las parcelas que se comparen tengan antecedentes y gestión similares, así como una posición topográfica y propiedades físicas del suelo similares, y que estén ubicadas con bastante proximidad. Los estudios deben suministrar las existencias de C (es decir, masa por unidad de superficie a una profundidad dada) o la información necesaria para estimar las existencias de SOC (es decir, porcentaje de materia orgánica junto con densidad aparente, proporción de roca en el suelo, que a menudo se mide como aquella mayor de una fracción de 2 mm y que, por definición, no contiene C en suelo orgánico). Si se dispone del porcentaje de materia orgánica en lugar del de carbono orgánico, se puede utilizar un factor de conversión de 0,58 para estimar el contenido de C. Más aun: es una *buena práctica* que las mediciones de existencias de C en el suelo se tomen en base a una masa equivalente (p. ej. Ellert *et al.*, 2001; Gifford y Roderick, 2003). A fin de utilizar este método, el compilador del inventario debe determinar una profundidad para medir las existencias de C para el uso de la tierra o la práctica nominales, tales como tierras nativas o laboreo convencional. Esta profundidad debe ser coherente con la empleada para las existencias de C de referencia. Entonces, las existencias de C del suelo para los cambios en uso y gestión de la tierra se miden a una profundidad con la masa de suelo equivalente.

Otra opción para derivar valores específicos del país es simular factores de cambio de existencias a partir de modelos avanzados (Bhatti *et al.*, 2001). Para demostrar el uso de modelos avanzados, los factores simulados de cambio de existencias se pueden comparar con los cambios de existencias de C medidos en experimentos. Una buena práctica es proporcionar los resultados de la evaluación del modelo, citando los documentos publicados en la bibliografía y/o incluir los resultados en el informe del inventario. Este método se considera de Nivel 2 porque se basa en el concepto del factor de cambio de existencias y en el método de estimación de C elaborado en el método de Nivel 1.

La derivación de factores de gestión específicos de un país ( $F_{MG}$ ) y de factores de aporte ( $F_I$ ), ya sea mediante datos empíricos o con modelos avanzados, requerirá ser coherente con la clasificación de sistemas de gestión. Si se especifican más sistemas para el inventario, se deberán derivar factores exclusivos que representen a las categorías más exactas para un uso de la tierra en particular.

Otro aspecto a considerar al derivar factores de cambio de existencias específicos de un país es la dependencia temporal que lleven asociada (D en la Ecuación 2.25), la que determina la cantidad de años durante los cuales se produce la mayoría de los cambios en las existencias de C orgánico en el suelo, después de un cambio en la gestión. Es posible emplear una dependencia temporal (D) por defecto para el sector de uso de la tierra (p. ej. 20

años para tierras de cultivo), pero la dependencia puede cambiarse si se dispone de datos suficientes para justificar un lapso diferente. Además, el método está diseñado para utilizar la misma dependencia temporal ( $D$ ) para todos los factores de cambio de existencias como se presenta en la Ecuación 2.25. Si se seleccionan diferentes períodos para  $F_{LU}$ ,  $F_{MG}$  y  $F_I$ , va a ser necesario calcular la influencia del uso de la tierra, de la gestión y de los aportes por separado, y dividir la dependencia asociada con los cambios de existencias. Esto puede lograrse modificando la Ecuación 2.25 de manera que el SOC en los momentos  $T$  y  $0-T$  se calcule individualmente para cada uno de los factores de cambio de existencias (es decir, el SOC se calcula sólo con  $F_{LU}$ , después con  $F_{MG}$  y, por último, con  $F_I$ ). Las diferencias se calculan para las existencias asociadas con uso de la tierra, gestión y aporte, dividiendo por sus respectivos valores  $D$ , y recién entonces se suman los cambios.

Normalmente, los cambios en las existencias de  $C$  tienen lugar de manera no lineal e, incluso, es posible desarrollar la dependencia temporal de los factores de cambio de existencias para reflejar esta pauta. Respecto a los cambios en el uso o la gestión de la tierra que provoquen una reducción en el contenido de  $C$  del suelo, la tasa de cambio es más alta durante los primeros años y declina progresivamente con el transcurso del tiempo. Por el contrario, cuando el  $C$  del suelo está en aumento debido a cambios en el uso o la gestión de la tierra, la tasa de acumulación tiende a seguir una curva sigmoidea, con tasas de cambio más lentas al principio, que luego se incrementan, y posteriormente se reducen con el tiempo. Si se hace un seguimiento explícito de los cambios históricos en las prácticas de uso y gestión de la tierra mediante sondeo de los mismos lugares (es decir, datos de la actividad de los Métodos 2 o 3, véase el Capítulo 3), es posible que se pueda aplicar un método de Nivel 2 que incorpore la no linealidad de los cambios en las existencias de  $C$  del suelo.

De manera similar a la dependencia temporal, la profundidad respecto a la cual se miden los impactos puede diferenciarse de la del método por defecto. Sin embargo, es importante que las existencias de  $C$  de referencia ( $SOC_{Ref}$ ) y los factores de cambio de existencias ( $F_{LU}$ ,  $F_{MG}$ ,  $F_I$ ) se determinen para una profundidad en común y que sean coherentes para todo el sector de uso de la tierra, a fin de que se manejen conversiones entre usos sin inflar ni desinflar artificialmente las estimaciones de cambios en las existencias de  $C$  del suelo. Constituye una *buena práctica* documentar la fuente de información y la información básica que subyace a los nuevos factores del proceso de generación de informes.

### **Suelos orgánicos**

Un método de Nivel 2 para emisiones de  $CO_2$  relacionadas con el drenaje de suelos orgánicos incluye información específica del país al inventario, para estimar las emisiones aplicando la Ecuación 2.26 (véase la sección previa del Nivel 1 en cuanto a un análisis adicional sobre las ecuaciones y la aplicación generales de este método). Asimismo, en el Nivel 2 se utiliza un procedimiento con los mismos pasos para los cálculos que se proporcionarían para el Nivel 1. Las potenciales mejoras al método del Nivel 1 pueden incluir: 1) una derivación de los factores de emisión específicos del país, 2) especificaciones de las regiones climáticas consideradas más adecuadas para el país, o 3) una clasificación más pormenorizada y más detallada de los sistemas de gestión atribuidos a la categoría de uso de la tierra.

La derivación de los factores de emisión específicos del país constituye una *buena práctica* si se dispone de datos experimentales. Asimismo: es una *buena práctica* utilizar una clasificación más pormenorizada para el clima y los sistemas de gestión, si existen diferencias significativas en las tasas de pérdida de  $C$  medidas entre las clases propuestas. Nótese que toda derivación debe ir acompañada de una cantidad suficiente de datos de la actividad de uso/gestión de la tierra y ambientales que representen las regiones climáticas y los sistemas de gestión propuestos a escala nacional. El desarrollo del inventario de Nivel 2 para los suelos orgánicos merece las mismas consideraciones que el de suelos minerales que se analizara en la sección anterior.

Los factores de emisión específicos del país para los suelos orgánicos pueden basarse en mediciones de las reducciones anuales en existencias de  $C$  para todo el perfil del suelo. Otra alternativa es emplear el hundimiento de la tierra como medida sustituto para la pérdida de  $C$  que sucede al drenaje (p. ej. Armentano y Menges, 1986). La pérdida de  $C$  se calcula como fracción del hundimiento anual atribuido a la oxidación de la materia orgánica, al contenido de  $C$  de la materia orgánica mineralizada, y a la densidad aparente del suelo (Ogle *et al.*, 2003).

### ***C inorgánico del suelo***

Véase lo analizado para esta subcategoría bajo el Nivel 1.

### **Nivel 3: sistemas de estimación avanzados**

Es típico que los métodos de Nivel 3 para estimar el  $C$  del suelo impliquen el desarrollo de un sistema de estimación de avanzada que va a capturar mejor la variabilidad anual de los flujos, a diferencia de los métodos de los Niveles 1 y 2 en los que, en su mayor parte, se supone un cambio anual constante en las existencias de  $C$  dentro de un período de inventario basado en un factor de cambio de existencias. Básicamente, los Niveles 1 y 2 representan los impactos del uso y la gestión de la tierra sobre las existencias de  $C$  del suelo como traspaso lineal de un estado de equilibrio a otro. Para comprender mejor lo que esto implica, es importante señalar que, normalmente, las existencias de  $C$  del suelo no están en un estado de equilibrio absoluto ni cambian de una manera lineal a lo largo del período de transición, ya que muchas de las variables motrices que afectan a las

existencias son dinámicas y cambian periódicamente a escalas temporales más breves antes de que se alcance un nuevo «casi» equilibrio. Con los métodos de Nivel 3 se puede manejar esta no linealidad utilizando modelos más avanzados que los de los métodos de Niveles 1 y 2, y/o desarrollando un inventario basado en mediciones con una red de monitorización. Además, con los inventarios de Nivel 3 se pueden capturar efectos hereditarios de uso y gestión de la tierra de más largo plazo. Contrariamente, es típico que los métodos de los Niveles 1 y 2 sólo consideren la influencia más reciente del uso y la gestión de la tierra, como sucede con los últimos 20 años para las existencias de C mineral. Véase la Sección 2.5 (Orientación genérica para los métodos de Nivel 3) para conocer un análisis adicional sobre los métodos de Nivel 3 que va más allá que el texto que se presenta a continuación.

### ***Suelos minerales***

Los enfoques basados en modelos pueden emplear modelos de simulación mecanicista que capturan los procesos subyacentes que generan las ganancias y pérdidas de carbono de los suelos dentro de un marco cuantitativo, como lo es la influencia del uso y la gestión de la tierra sobre los procesos que controlan el aporte de carbono resultante de la producción vegetal y de la caída de hojarasca, así como de la descomposición microbiana (p. ej. McGill, 1996; Smith *et al.*, 1997b; Smith *et al.*, 2000; Falloon y Smith, 2002; and Tate *et al.*, 2005). Nótese que los métodos de Nivel 3 proporcionan la única oportunidad que existe hoy día de estimar explícitamente el impacto de la erosión del suelo sobre los flujos de C. Además, los enfoques basados en modelos del Nivel 3 permiten representar las transferencias de C entre biomasa, biomasa muerta y suelos, lo que resulta ventajoso para garantizar la conservación de la masa en las predicciones de cambios en las existencias de C de estos depósitos, con respecto a las absorciones y emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

Los enfoques de modelización de Nivel 3 permiten considerar la influencia del uso y la gestión de la tierra con una representación dinámica de las condiciones ambientales que afectan a los procesos que controlan las existencias de C en el suelo, como lo son las condiciones meteorológicas, las características edáficas y otras variables. El impacto del uso y la gestión de la tierra sobre las existencias de C en el suelo puede variar a medida que cambian las condiciones ambientales, cambios que no son capturados por los niveles más bajos, lo que puede crear sesgo en esos resultados. En consecuencia, los métodos de Nivel 3 tienen la capacidad de proporcionar una estimación más exacta de los cambios en las existencias de C relacionadas con las actividades de uso y gestión de la tierra.

Para los métodos de Nivel 3, se va a requerir un conjunto de sitios de referencia para poder evaluar los resultados del modelo. Lo ideal sería establecer una serie de sitios de monitorización de referencia permanentes con diseño reiterado estadísticamente, que capturara las regiones climáticas, tipos de suelos y sistemas de gestión principales, así como los cambios de sistemas, lo que permitiría efectuar repetidas mediciones de existencias de C orgánico en el suelo con el correr del tiempo (Smith, 2004a). La monitorización se basa en un remuestreo de parcelas cada 3 a 5 años o cada década; es factible que las frecuencias de muestreo menores no produzcan diferencias significativas, dada la poca magnitud de los cambios anuales de las existencias de C con relación a la gran cantidad total de C en el suelo (IPCC, 2000; Smith, 2004b).

Además de los enfoques basados en modelos, los métodos de Nivel 3 brindan la oportunidad de desarrollar un inventario basado en mediciones, empleando una red de monitorización similar a la que se utiliza para la evaluación de modelos. No obstante, las redes de medición, que sirven de base para un inventario completo, tendrán una densidad de muestreo considerablemente mayor, a fin de minimizar la incertidumbre, y para representar a todos los sistemas de gestión y los asociados cambios en el uso de la tierra, en todas las regiones climáticas y en todos los principales tipos de suelos (Sleutel *et al.*, 2003; Lettens *et al.*, 2004). Las redes de medición pueden basarse en el muestreo de suelos en sitios de referencia o en redes de torres de flujo. Las torres de flujo, como las que emplean los sistemas de covarianza por remolinos (Baldocchi *et al.*, 2001), constituyen un caso exclusivo por el hecho de que miden el intercambio *neto* de CO<sub>2</sub> entre la atmósfera y la superficie terrestre. Es así que, en lo que respecta a los cambios de existencias de C del depósito terrestre, las redes de mediciones por torres de remolinos están sujetas a las siguientes salvedades: 1) las torres deben existir a una densidad suficiente que represente los flujos de todo el país; 2) las estimaciones de flujo deben atribuirse a sectores individuales de uso de la tierra y a actividades específicas de uso y gestión de la tierra; y 3) los flujos de CO<sub>2</sub> se deben atribuir, además, a depósitos individuales que incluyan cambios de existencias en los suelos (además de los de biomasa y materia orgánica muerta). Hay comentarios adicionales respecto a mediciones en suelos en la sección anterior sobre métodos del Nivel 2 para suelos minerales (Véase el análisis sobre factores de cambio de existencias).

Es importante destacar que los inventarios basados en mediciones representan métodos de estimación del total de C, y cubren todas las factores que repercuten sobre las existencias de C en el suelo. Puede resultar difícil realizar estimaciones parciales que sólo consideren los efectos del uso y la gestión de la tierra.

### ***Suelos orgánicos***

De manera similar a lo que sucede con los suelos minerales, las emisiones de CO<sub>2</sub> atribuidas al uso y la gestión de la tierra en suelos orgánicos pueden estimarse mediante un método basado en modelos o en mediciones. Lo

típico será que se utilicen modelos dinámicos, de base mecanicista para simular los procesos subyacentes, a la vez que se captura la influencia del uso y la gestión de la tierra, en particular el efecto de los niveles variables de drenaje por descomposición. Las mismas consideraciones que se hicieran para suelos minerales son también importantes para los métodos basados en modelos y en mediciones que se aplican a los cambios de las existencias de C en el suelo atribuidos a la gestión de los suelos orgánicos.

### ***C inorgánico del suelo***

Se puede desarrollar aun más un método del Nivel 3 para estimar los flujos relacionados con los impactos de la gestión en los depósitos de carbono inorgánico en el suelo. Por ejemplo, la irrigación puede afectar las existencias y los flujos de C inorgánico en el suelo, pero la dirección y la magnitud dependen de la fuente y la naturaleza del agua de irrigación y de la fuente, la cantidad y el destino del C inorgánico disuelto que se descargue. En regiones áridas y semiáridas, las correcciones con yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) pueden llevar a un incremento de las existencias de C orgánico en el suelo, según la cantidad de  $\text{Ca}^{2+}$  que reemplace al  $\text{Na}^+$  en los coloides del suelo, relativo a la reacción con el bicarbonato y a la precipitación de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Hay otras actividades de uso y gestión del suelo, como la deforestación/aforestación y las prácticas de gestión acidificante del suelo, que también pueden afectar las existencias de C inorgánico del suelo. No obstante, estos cambios pueden provocar ganancias o pérdidas de C en este depósito según las condiciones específicas del lugar y la cantidad atribuible a la actividad puede ser pequeña.

Actualmente, hay pocos modelos para la estimación de los cambios en el carbono orgánico del suelo debidos al uso y la gestión de la tierra, por lo que la aplicación de un método de Nivel 3 puede exigir una cantidad considerable de tiempo y de recursos. En los casos en los que los datos y el conocimiento son suficientes y en los que prevalecen las actividades que producen un cambio significativo en las existencias de C inorgánico del suelo, una *buena práctica* para los países es la realización de un análisis hidrogeoquímico exhaustivo que incluya todas las actividades importantes de uso y gestión de la tierra a fin de estimar su efecto sobre las existencias de C inorgánico en el suelo. Un método de modelización requeriría aislar las actividades de uso y gestión de la tierra de los efectos no antropogénicos. Alternativamente, se puede emplear un método basado en mediciones tomando muestras periódicamente en lugares de referencia de tierras gestionadas para determinar las existencias de C orgánico *in situ* o, quizá, los flujos de  $\text{CO}_2$ , en combinación con una red de monitorización para C orgánico del suelo como se analizara antes para los suelos minerales. No obstante, la cantidad y el destino del C inorgánico disuelto exigiría la realización de otras mediciones, modelización o hipótesis simplificadoras, tales como suponer que todas las pérdidas de C inorgánico por lixiviación se emiten como  $\text{CO}_2$  a la atmósfera.

## **2.4 EMISIONES DE NO $\text{CO}_2$**

Hay emisiones significativas de gases que no son de efecto invernadero producidas a partir del quemado de biomasa, de la gestión del ganado y su estiércol, o de los suelos. De las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  de los suelos se ocupa el Capítulo 11, donde se proporciona orientación sobre métodos que pueden aplicarse a nivel nacional (es decir, independientemente de los tipos de uso de la tierra) si un país decide utilizar datos de la actividad a escala nacional. La orientación sobre emisiones de  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  producidas por el ganado y el estiércol se consideran solamente en el Capítulo 10, ya que estas emisiones no dependen de las características de la tierra. A continuación, se describe un método genérico para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por el fuego (tanto para gases  $\text{CO}_2$  como distintos del  $\text{CO}_2$ ), mientras que se proporcionan mejoras específicas relacionadas con el uso de la tierra en los capítulos referidos a tierras forestales, pastizales y tierras de cultivo. Es una buena práctica verificar la total cobertura de las emisiones de  $\text{CO}_2$  y no  $\text{CO}_2$  debidas a pérdidas en las existencias y depósitos de carbono, a fin de evitar omisiones o un cómputo doble.

Las emisiones producidas por el fuego no incluyen solamente  $\text{CO}_2$ , sino también otros gases de efecto invernadero o precursores de éstos que se originan de la combustión incompleta del combustible. Entre estos se incluyen el monóxido de carbono (CO), el metano ( $\text{CH}_4$ ), los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM) y especies de nitrógeno (p. ej.  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ) (Levine, 1994). En las *Directrices del IPCC de 1996 y GPG2000*, las emisiones de gases de efecto invernadero distintos del  $\text{CO}_2$  producidas por el fuego en sabanas y por el quemado de residuos de cultivos se trataban conjuntamente con las emisiones resultantes de la conversión de tierras forestales y pastizales. La metodología difería un tanto por tipo de vegetación y no se incluían los incendios de tierras forestales. En la *GPG-LULUCF*, se consideraron las emisiones (de  $\text{CO}_2$  y no  $\text{CO}_2$ ) producidas por incendios, en particular en el capítulo referido a tierras forestales (pérdidas de carbono resultantes de las perturbaciones). En los capítulos referidos a tierras de cultivo y pastizales, se consideraban solamente las emisiones de gases distintos al  $\text{CO}_2$ , bajo la hipótesis de que las emisiones de  $\text{CO}_2$  se compensarían con las absorciones de  $\text{CO}_2$  producidas por la subsiguiente regeneración de la vegetación dentro del lapso de un año. Esta hipótesis implica el mantenimiento de la fertilidad del suelo —una hipótesis que los países pueden desconocer si cuentan con pruebas de que hay una reducción de la fertilidad debida al fuego. Por lo general, en las tierras forestales hay una falta de sincronía (no equivalencia entre las emisiones y las absorciones de  $\text{CO}_2$  en el año de la declaración).

En estas Directrices se proporciona un método más genérico para estimar las emisiones producidas por el fuego. Se considera al fuego una perturbación que afecta no sólo la biomasa (en particular la aérea) sino también la materia orgánica muerta (hojarasca y madera muerta). La expresión “quemado de biomasa” se utiliza ampliamente y se mantiene en estas Directrices, aunque se reconoce que, a menudo, los componentes combustibles que no son parte de la biomasa viva son significativos, especialmente en los sistemas forestales. En cuanto a las Tierras de Cultivo y los Pastizales, que tienen poca vegetación boscosa, suele hacerse referencia al quemado de biomasa, dado que el de la biomasa es el principal depósito afectado por el fuego.

Los países deberán aplicar los siguientes principios para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de incendios en tierras forestales, tierras de cultivo y pastizales:

- Cobertura de la declaración: deben declararse todas las emisiones (CO<sub>2</sub> y no CO<sub>2</sub>) de todo tipo de fuego (fuegos controlados y naturales) en las tierras gestionadas (la excepción es del CO<sub>2</sub> de pastizales, como se analiza más adelante). Cuando hay un cambio en el uso de la tierra, toda emisión de gases de efecto invernadero producida por el fuego debe declararse bajo la nueva categoría de uso de la tierra (categoría de transición). No es necesario declarar las emisiones de los incendios naturales (y las que se escapen de fuegos controlados) que se produzcan en tierras no gestionadas, a menos que esas tierras sufran, a continuación, un cambio de uso (es decir, se conviertan en tierras gestionadas).
- El fuego como herramienta de gestión (quemado controlado): se declaran las emisiones de gases de efecto invernadero de la superficie quemada y, si el fuego afecta las tierras no gestionadas, se debe declarar también las emisiones de gases de efecto invernadero si al fuego le sucede un cambio en el uso de la tierra.
- Equivalencia (sincronía) de emisiones y absorciones de CO<sub>2</sub>: Deben declararse las emisiones netas de CO<sub>2</sub> donde las emisiones y las absorciones de CO<sub>2</sub> del depósito de biomasa no son equivalentes en el año del inventario. En cuanto al quemado de biomasa de pastizales o de residuos agrícolas, generalmente es razonable suponer que hay equivalencia. Sin embargo, también se puede quemar vegetación boscosa en estas categorías de tierras y las emisiones de gases de efecto invernadero de esas fuentes deben declararse aplicando un método de nivel superior. Más aun: en muchas partes del mundo, el pastoreo es el uso de la tierra predominante en las tierras forestales que se queman con regularidad (p. ej. tierras boscosas y sabanas de pastoreo) y se debe tener cuidado antes de suponer que hay sincronía en tales sistemas. En las tierras forestales, es poco factible que haya sincronía si se mata una cantidad significativa de biomasa boscosa (es decir, cuando las pérdidas representan varios años de crecimiento y de acumulación de C) y debe declararse las emisiones netas. Como ejemplos, se incluyen: el desmonte de bosques nativos y la conversión a la agricultura y/o a plantaciones e incendios naturales de tierras forestales.
- Combustibles disponibles para la combustión: se deben tener presentes los factores que reducen la cantidad de combustibles disponibles para la combustión (p. ej. por pastoreo, descomposición, absorción de biocombustibles, alimento del ganado, etc.). Se debe adoptar un enfoque de equilibrio de masa para contabilizar los residuos, a fin de evitar subestimarlos o realizar un cómputo doble (véase la Sección 2.3.2).
- Declaración anual: a pesar de la gran variabilidad espacial y temporal inherente al fuego (y particularmente la de los incendios naturales), los países deben estimar y declarar las emisiones de gases de efecto invernadero por fuego con periodicidad anual.

En estas Directrices se proporciona un enfoque exhaustivo para estimar los cambios en las existencias de carbono y las emisiones de no CO<sub>2</sub> provocados por el fuego en tierras forestales (incluso los provocados por conversión de bosques), así como de las emisiones de no CO<sub>2</sub> en tierras de cultivo y pastizales. Se consideran las emisiones de CO<sub>2</sub> para los siguientes cinco tipos de quemado: (1) quemado de pastizales (que incluye el quemado de arbustos leñosos perennes y sabana); (2) quemado de residuos agrícolas; (3) quemado de hojarasca, sotobosque y residuos de cosechas en tierras forestales; (4) quemado posterior al desmonte forestal y la conversión a la agricultura; y (5) otros tipos de quemado (incluso los provocados por incendios naturales). Las emisiones directas de CO<sub>2</sub> también se consideran para los ítems (3), (4) y (5). Dado que la estimación de las emisiones en estas distintas categorías tiene muchos elementos en común, en esta sección se presenta un método genérico para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> y no CO<sub>2</sub> provocadas por el fuego, a fin de evitar su repetición en secciones específicas de uso de la tierra de estas Directrices que se ocupan de las emisiones provocadas por el fuego.

El quemado controlado de sabanas se incluye en la sección de quemado de biomasa en pastizales (Capítulo 6, Pastizales, Sección 6.3.4). Es importante evitar el cómputo doble cuando se estiman las emisiones de gases de efecto invernadero de sabanas cuya vegetación tenga una fisonomía característica de las tierras forestales. Un ejemplo de esto es la formación llamada *cerradão* (bosque denso) de Brasil que, aunque se trate de un tipo de sabana, se incluye bajo tierras forestales debido a sus características biofísicas.

Además las emisiones de gases de efecto invernadero resultantes de la combustión, los incendios pueden llevar a la creación de una existencia de carbono inerte (carbón vegetal). Los residuos producidos por el fuego incluyen

componentes no quemados y parcialmente quemados, así como una pequeña cantidad de carbón vegetal que, debido a su naturaleza química, es muy resistente a la descomposición. Actualmente, el conocimiento es muy limitado en cuanto a las tasas de formación de carbón vegetal bajo condiciones contrastantes de quemado y a las subsiguientes tasas de renovación (Forbes *et al.*, 2006; Preston y Schmidt, 2006) como para permitir el desarrollo de una metodología fiable a los efectos del inventario y, por ende, no se la incluye en estas Directrices. En el Apéndice 1 se incluye una base técnica para un ulterior desarrollo metodológico.

Por otra parte, aunque las emisiones de CO<sub>2</sub> se producen también como consecuencia del fuego, no se las considera en estas Directrices dada la escasez de datos y la magnitud de las incertidumbres respecto a muchos de los parámetros clave necesarios para la estimación, lo que impide el desarrollo de estimaciones de emisión confiables.

## DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Cada una de las secciones pertinentes de estas Directrices incluye un método de tres niveles para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub> (donde corresponde) y no CO<sub>2</sub> producidas por el fuego. La elección del Nivel se puede realizar siguiendo los pasos del árbol de decisiones que se presenta en la Figura 2.6. Bajo el método de Nivel 1, se puede aplicar la fórmula presentada en la Ecuación 2.27 para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> y de no CO<sub>2</sub> producidas por el fuego, empleando los datos por defecto que se proporcionan en este capítulo y en las secciones referidas a cada uso de la tierra de estas Directrices. Los niveles superiores implican una aplicación más refinada de la Ecuación 2.27.

Dado que la metodología del Nivel 1 adopta un método simplificado para estimar el depósito de materia orgánica muerta (véase la Sección 2.3.2), es necesario utilizar ciertas hipótesis cuando se estiman las emisiones netas de gases de efecto invernadero producidas por el fuego en esos sistemas (p. ej. tierras forestales y tierras forestales convertidas a otros usos de la tierra), en los casos en que la materia orgánica muerta puede constituir un componente importante del combustible quemado. Se supone que las emisiones de CO<sub>2</sub> de la materia orgánica muerta equivalen a cero en los bosques que se queman, pero que no mueren a causa del fuego. Si el fuego tiene suficiente intensidad para matar a una parte de la arboleda del bosque, bajo la metodología de Nivel 1, se supone que el C contenido en la biomasa muerta se libera de inmediato a la atmósfera. Esta simplificación del Nivel 1 puede provocar una sobreestimación de las verdaderas emisiones del año del incendio, si la cantidad de carbono de la biomasa destruida por el fuego es mayor que la cantidad de carbono de la madera muerta y hojarasca consumidas por el fuego.

Las emisiones de gases de efecto invernadero de no CO<sub>2</sub> se estiman para todas las situaciones de fuego. Bajo el Nivel 1, las emisiones de no CO<sub>2</sub> se estiman mejor empleando el consumo real de combustible que se indica en el Cuadro 2.4 y los factores de emisión adecuados (Cuadro 2.5) (es decir, sin incluir la biomasa recién destruida como componente del combustible consumido). Evidentemente, si el fuego de los bosques contribuye de forma significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero, se alienta a los países para que desarrollen una metodología más completa (niveles superiores) que incluya la dinámica de la materia orgánica muerta y mejore las estimaciones de las emisiones directas y posteriores al incendio.

En cuanto a las tierras forestales convertidas a otros usos de la tierra, la materia orgánica quemada se deriva tanto de la vegetación recién talada como de la materia orgánica muerta ya existente, y se debe declarar las emisiones de CO<sub>2</sub>. En esta situación, las estimaciones del total de combustible consumido (Cuadro 2.4) se pueden utilizar para estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> y no gases de efecto invernadero empleando la Ecuación 2.27. No obstante, se debe tener cuidado de garantizar que las pérdidas de carbono de la materia orgánica muerta durante la conversión del uso de la tierra no se computen doblemente en las Ecuaciones 2.27 (como pérdidas del quemado) y 2.23 (como pérdidas por descomposición).

En la Ecuación 2.27 se resume una metodología genérica para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero individuales para cualquiera de los tipos de fuego.

### ECUACIÓN 2.27 ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO A CAUSA DEL FUEGO

$$L_{\text{fuego}} = A \cdot M_B \cdot C_f \cdot G_{ef} \cdot 10^{-3}$$

Donde:

$L_{\text{fuego}}$  = cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero provocada por el fuego, ton de cada gas de efecto invernadero (GEI) (p. ej., CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc.)

A = superficie quemada, ha

$M_B$  = masa de combustible disponible para la combustión, ton ha<sup>-1</sup>. Incluye biomasa, hojarasca molida y madera muerta. Cuando se aplican métodos de Nivel 1, entonces se supone que los depósitos de



hojarasca y de madera muerta equivalen a cero, a excepción de los casos en los que hay un cambio en el uso de la tierra (véase la Sección 2.3.2.2).

$C_f$  = factor de combustión, sin dimensión (valores por defecto del Cuadro 2.6)

$G_{ef}$  = Factor de emisión,  $g\ kg^{-1}$  de materia seca quemada (valores por defecto del Cuadro 2.5).

Nota: Cuando no se dispone de datos para  $M_B$  y  $C_f$ , se puede utilizar un valor por defecto para la cantidad de combustible realmente quemado (el producto de  $M_B$  por  $C_f$ ) (Cuadro 2.4), según la metodología de Nivel 1.

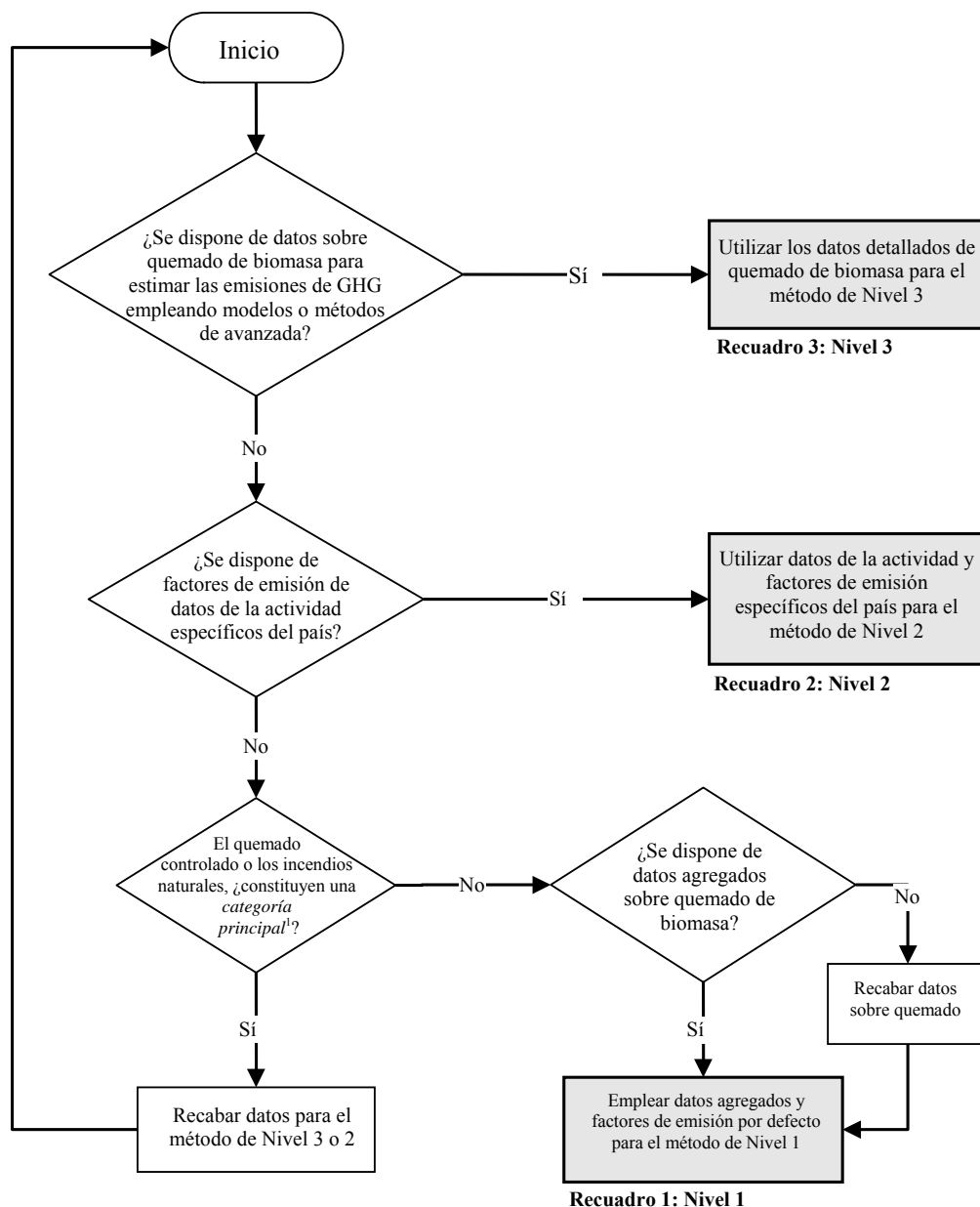
En cuanto a las emisiones de  $CO_2$ , la Ecuación 2.27 se relaciona con la 2.14, en la que se estima la cantidad anual de pérdida de biomasa viva por todo tipo de perturbaciones.

La cantidad de combustible que se puede quemar está dada por la superficie quemada y la densidad de combustible presente en esa superficie. La densidad de combustible puede incluir biomasa, madera muerta y hojarasca, las que varían en función del tipo, la edad y las condiciones de la vegetación. El tipo de fuego también afecta la cantidad de combustible disponible para la combustión. Por ejemplo, el combustible disponible para incendios de suelo de baja intensidad en bosques va a estar mayormente restringido a hojarasca y materia orgánica muerta que haya sobre la superficie, mientras que los incendios «de copa» de mayor intensidad pueden consumir también sustanciales cantidades de biomasa arbórea.

El factor de combustión es una medida de la proporción del combustible que realmente se quema, que varía en función del tamaño y la arquitectura de la carga de combustible (es decir, se va a quemar una proporción más pequeña del combustible grande y grueso, como los tallos de los árboles, en comparación con los combustibles finos, como las briznas de hierba), el contenido de humedad del combustible y el tipo de incendio (es decir, la intensidad y la velocidad de propagación que se ven muy afectadas por la variabilidad climática y por diferencias regionales, como se refleja en el Cuadro 2.6). Por último, el factor de emisión nos da la cantidad de un gas de efecto invernadero en particular emitida por unidad de materia seca quemada, la que puede variar en función del contenido de carbono de la biomasa y de la exhaustividad de la combustión. En las especies con altas concentraciones de N, las emisiones de  $NO_x$  y  $N_2O$  resultantes de incendios pueden variar en función del contenido de N del combustible. Andreae y Merlet (2001) realizaron una revisión exhaustiva de los factores de emisión, la que se resume en el Cuadro 2.5.

En los métodos de Nivel 2 se emplea el mismo enfoque general que en el Nivel 1, aunque se hace uso de factores de emisión más refinados derivados por los países y/o de estimaciones de densidades de combustible y de factores de combustión más refinados que los provistos en los cuadros por defecto. Los métodos de Nivel 3 son más exhaustivos e incluyen consideraciones acerca de la dinámica de los combustibles (biomasa y materia orgánica muerta).

**Figura 2.6**      **Árbol de decisiones genérico para la identificación del nivel apropiado para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por incendios en una categoría de uso de la tierra.**



Nota:

1: Véase el Volumen 1, Capítulo 4, «Opción metodológica e identificación de categorías principales» (principalmente la sección 4.1.2 relativa a los recursos limitados) para el análisis de las *categorías principales* y el uso de los árboles de decisión.

<b>CUADRO 2.4</b>				
<b>VALORES DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE (MATERIA ORGÁNICA MUERTA MÁS BIOMASA VIVA) (TON MATERIA SECA-<sup>1</sup>) PROVOCADO POR INCENDIOS EN DISTINTOS TIPOS DE VEGETACIÓN</b>				
(Debe utilizarse en la Ecuación 2.27 para estimar el producto de las cantidades ' $M_B \cdot C_f$ ', es decir, una cantidad absoluta)				
<b>Tipo de vegetación</b>	<b>Subcategoría</b>	<b>Media</b>	<b>ES</b>	<b>Referencias</b>
Bosque tropical primario (cortado y quemado)	Bosque tropical primario	83,9	25,8	7, 15, 66, 3, 16, 17, 45
	Bosque tropical primario abierto	163,6	52,1	21,
	Bosque tropical primario húmedo	160,4	11,8	37, 73
	Bosque tropical primario seco	-	-	66
<b>Todos los bosques tropicales primarios</b>		<b>119,6</b>	<b>50,7</b>	
Bosque tropical secundario (cortado y quemado)	Bosque tropical secundario joven (3-5 años)	8,1	-	61
	Bosque tropical secundario intermedio (5-10 años)	41,1	27,4	61, 35
	Bosque tropical secundario avanzado (14-17)	46,4	8,0	61, 73
<b>Todos los bosques tropicales secundarios</b>		<b>42,2</b>	<b>23,6</b>	66, 30
<b>Todos los bosques tropicales terciarios</b>		<b>54,1</b>	<b>-</b>	66, 30
Bosques boreales	Incendios naturales (general)	52,8	48,4	2, 33, 66
	Incendios de copas	25,1	7,9	11, 43, 66, 41, 63, 64
	Incendios de superficie	21,6	25,1	43, 69, 66, 63, 64, 1
	Quemado de rollizos post-corte	69,6	44,8	49, 40, 66, 18
	Fuegos para desmante	87,5	35,0	10, 67
<b>Todos los bosques boreales</b>		<b>41,0</b>	<b>36,5</b>	43, 45, 69, 47
Bosques de eucaliptos	Incendios naturales	53,0	53,6	66, 32, 9
	Incendios controlados - (superficie)	16,0	13,7	66, 72, 54, 60, 9
	Quema de rollizos post-corte	168,4	168,8	25, 58, 46
	Tala retiro de madera y quema (fuego para desmante)	132,6	-	62, 9
<b>Todos los montes de eucaliptos</b>		<b>69,4</b>	<b>100,8</b>	
Otros bosques de zonas templadas	Incendios naturales	19,8	6,3	32, 66
	Quema de rollizos post-corte	77,5	65,0	55, 19, 14, 27, 66
	Tala y quema (fuego para desmante) Tala retiro de madera y quema (fuego)	48,4	62,7	53, 24, 71
<b>Todos los demás bosques de zonas templadas</b>		<b>50,4</b>	<b>53,7</b>	43, 56

<b>CUADRO 2.4 (CONTINUACIÓN)</b>				
<b>VALORES DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE (MATERIA ORGÁNICA MUERTA MÁS BIOMASA VIVA) (TON MATERIA SECA-<sup>1</sup>) PROVOCADO POR INCENDIOS EN DISTINTOS TIPOS DE VEGETACIÓN</b>				
(Debe utilizarse en la Ecuación 2.27 para estimar el producto de las cantidades ' $M_B \cdot C_F$ ', es decir, una cantidad absoluta)				
<b>Tipo de vegetación</b>	<b>Subcategoría</b>	<b>Media</b>	<b>ES</b>	<b>Referencias</b>
Arbustales	Arbustos (general)	26,7	4,2	43
	Brezales de <i>calluna</i>	11,5	4,3	26, 39
	Artemisa	5,7	3,8	66
	Fynbos	12,9	0,1	70, 66
<b>Todos los arbustales</b>		<b>14,3</b>	<b>9,0</b>	
Bosques de la sabana (quemadas tempranas de la estación seca)*	Bosques de la sabana	2,5	-	28
	Parques de la sabana	2,7	-	57
Todos los bosques de la sabana (quemada temprana de la		<b>2,6</b>	<b>0,1</b>	
Bosques de la sabana (quemadas medias/tardías de la estación seca)*	Bosques de la sabana	3,3	-	57
	Parques de la sabana	4,0	1,1	57, 6, 51
	Sabana tropical	6	1,8	52, 73
	Otros bosques de la sabana	5,3	1,7	59, 57, 31
Todos los bosques de las sabana (quemadas medias/tardías		<b>4,6</b>	<b>1,5</b>	
Pastizales de la sabana (quemadas tempranas de la estación seca)*	Pastizales tropicales y subtropicales	2,1	-	28
	Pastizales	-	-	48
<b>Todos los pastizales de la sabana (quemadas tempranas de la estación seca)*</b>		<b>2,1</b>	<b>-</b>	
Pastizales de la sabana (quemadas medias/tardías de la estación seca)*	Pastizales tropicales y subtropicales	5,2	1,7	9, 73, 12, 57
	Pastizales	4,1	3,1	43, 9
	Pasturas tropicales	23,7	11,8	4, 23, 38, 66
	Sabana	7,0	2,7	42, 50, 6, 45, 13, 65
<b>Todos los bosques de las sabana (quemadas medias/tardías de la estación seca)*</b>		<b>10,0</b>	<b>10,1</b>	
Otros tipos de vegetación	Turba	41	1,4	68, 33
	Tundra	10	-	33
Residuos agrícolas (quemada de campo post-cosecha)	Residuos de trigo	4,0		véase Nota b
	Residuos de maíz	10,0		véase Nota b
	Residuos de arroz	5,5		véase Nota b
	Caña de azúcar <sup>a</sup>	6,5		véase Nota b
* Sólo combustión de la capa superficial				
~ Derivado de bosques tropicales desbrozados (incluye el material maderero no quemado)				
<sup>a</sup> En cuanto a la caña de azúcar, los datos se refieren al quemado previo a la cosecha del cultivo.				
<sup>b</sup> Evaluación de expertos a cargo de los autores.				

<b>CUADRO 2.5</b> <b>FACTORES DE EMISIÓN (g kg<sup>-1</sup> DE MATERIA SECA QUEMADA) PARA DISTINTOS TIPOS DE QUEMADO. LOS VALORES SON MEDIAS ± SD Y SE BASAN EN UNA REVISIÓN EXHAUSTIVA DE ANDREAE Y MERLET (2001)</b> (Debe utilizarse como la cantidad «G <sub>ep</sub> » de la Ecuación 2.27)					
Categoría	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	NO <sub>x</sub>
Sabana y pastizales	1613 ± 95	65 ± 20	2,3 ± 0,9	0,21 ± 0,10	3,9 ± 2,4
Residuos agrícolas	1515 ± 177	92 ± 84	2,7	0,07	2,5 ± 1,0
Bosque tropical	1580 ± 90	104 ± 20	6,8 ± 2,0	0,20	1,6 ± 0,7
Bosque tropical extra	1569 ± 131	107 ± 37	4,7 ± 1,9	0,26 ± 0,07	3,0 ± 1,4
Quemado de biocombustible	1550 ± 95	78 ± 31	6,1 ± 2,2	0,06	1,1 ± 0,6
Nota: La categoría «bosques tropicales extra» incluye todos los demás tipos de bosques. Nota: Respecto a la combustión de biomasa no boscosa en pastizales y tierras de cultivo, no es necesario estimar ni declarar las emisiones de CO <sub>2</sub> porque se supone que las absorciones anuales de CO <sub>2</sub> (a través del crecimiento) y las emisiones anuales de CO <sub>2</sub> (ya sea por descomposición o fuego) por parte de la biomasa están en equilibrio (véase lo analizado precedentemente sobre sincronía en la Sección 2.4).					

<b>CUADRO 2.6</b>				
<b>VALORES DE LOS FACTORES DE COMBUSTIÓN (PROPORCIÓN DE LA BIOMASA COMBUSTIBLE PREVIA AL INCENDIO CONSUMIDA) PARA INCENDIOS EN DIFERENTES TIPOS DE VEGETACIÓN</b>				
(Los valores de la columna «media» deben utilizarse para la cantidad $C_f$ en la Ecuación 2.27)				
<b>Tipo de vegetación</b>	<b>Subcategoría</b>	<b>Media</b>	<b>SD</b>	<b>Referencias</b>
Bosque tropical primario (cortado y quemado)	Bosque tropical primario	0,32	0,12	7, 8, 15, 56, 66, 3, 16, 53, 17, 45,
	Bosque tropical primario abierto	0,45	0,09	21
	Bosque tropical primario húmedo	0,50	0,03	37, 73
	Bosque tropical primario seco	-	-	66
<b>Todos los bosques tropicales primarios</b>		<b>0,36</b>	<b>0,13</b>	
Bosque tropical secundario (cortado y quemado)	Bosque tropical secundario joven (3-5 años)	0,46	-	61
	Bosque tropical secundario intermedio (5-10 años)	0,67	0,21	61, 35
	Bosque tropical secundario avanzado (14-17 años)Bosque tropical secundario intermedio	0,50	0,10	61, 73
<b>Todos los bosques tropicales secundarios</b>		<b>0,55</b>	<b>0,06</b>	56, 66, 34, 30
<b>Todos los bosques tropicales terciarios</b>		<b>0,59</b>	-	66, 30
Bosques boreales	Incendios naturales (general)	0,40	0,06	33
	Incendios de copas	0,43	0,21	66, 41, 64, 63
	Incendios de superficie	0,15	0,08	64, 63
	Quema de rollizos post-corte	0,33	0,13	49, 40, 18
	Fuegos para desmante	0,59	-	67
<b>Todos los bosques boreales</b>		<b>0,34</b>	<b>0,17</b>	45, 47
Bosques de eucaliptos	Incendios naturales	-	-	
	Incendios controlados - (superficie)	0,61	0,11	72, 54, 60, 9
	Quema de rollizos post-corte	0,68	0,14	25, 58, 46
	Tala y quema (fuego para desmante)Tala retiro de madera y quema (fuego para desmante)	0,49	-	62
<b>Todos los bosques de eucaliptos</b>		<b>0,63</b>	<b>0,13</b>	
Otros bosques de zonas templadas	Quema de rollizos post-corte	0,62	0,12	55, 19, 27, 14
	Tala y quema (fuego para desmante)Tala retiro de madera y quema (fuego para desmante)	0,51	-	53, 24, 71
<b>Todos los demás bosques de zonas templadas</b>		<b>0,45</b>	<b>0,16</b>	53, 56

<b>CUADRO 2.6 (CONTINUACIÓN)</b>				
<b>VALORES DE LOS FACTORES DE COMBUSTIÓN (PROPORCIÓN DE LA BIOMASA COMBUSTIBLE PREVIA AL INCENDIO CONSUMIDA) PARA INCENDIOS EN DIFERENTES TIPOS DE VEGETACIÓN</b>				
(Los valores de la columna «media» deben utilizarse para la cantidad $C_f$ de la Ecuación 2.27 )				
<b>Tipo de vegetación</b>	<b>Subcategoría</b>	<b>Media</b>	<b>SD</b>	<b>Referencias</b>
Arbustales	Arbustos (general)	0,95	-	44
	Brezales de <i>calluna</i>	0,71	0,30	26, 56, 39
	Fynbos	0,61	0,16	70, 44
<b>Todos los arbustales</b>		<b>0,72</b>	<b>0,25</b>	
Bosques de la sabana (quemadas tempranas de la estación seca)*	Bosques de la sabana	0,22	-	28
	Parques de la sabana	0,73	-	57
	Otros bosques de la sabana	0,37	0,19	22, 29
<b>Todos los bosques de la sabana (quema temprana de la estación seca)*</b>		<b>0,40</b>	<b>0,22</b>	
Bosques de la sabana (quemadas medias/tardías de la estación seca)*	Bosques de la sabana	0,72	-	66, 57
	Parques de la sabana	0,82	0,07	57, 6, 51
	Sabana tropical	0,73	0,04	52, 73, 66, 12
	Otros bosques de la sabana	0,68	0,19	22, 29, 44, 31, 57
<b>Todos los bosques de la sabana (quemadas medias/tardías de la estación seca)*</b>		<b>0,74</b>	<b>0,14</b>	
Pastizales de la sabana (quemadas tempranas de la estación seca)*	Pastizales tropicales y subtropicales	0,74	-	28
	Pastizales	-	-	48
<b>Todos los pastizales de la sabana (quemadas tempranas de la estación seca)*</b>		<b>0,74</b>	<b>-</b>	
Pastizales de la sabana (quemadas medias/tardías de la estación seca)*	Pastizales tropicales y subtropicales	0,92	0,11	44, 73, 66, 12, 57
	Pasturas tropicales	0,35	0,21	4, 23, 38, 66
	Sabana	0,86	0,12	53, 5, 56, 42, 50, 6, 45, 13, 44, 65, 66
<b>Todos los bosques de la sabana (quemadas medias/tardías de la estación seca)*</b>		<b>0,77</b>	<b>0,26</b>	
Otros tipos de vegetación	Turba	0,50	-	20, 44
	Humedales tropicales	0,70	-	44
Residuos agrícolas (quema de campo post-cosecha)	Residuos de trigo	0,90	-	véase Nota b
	Residuos de maíz	0,80	-	véase Nota b
	Residuos de arroz	0,80	-	véase Nota b
	Caña de azúcar <sup>a</sup>	0,80	-	véase Nota b
* Sólo combustión de la capa superficial				
~ Derivado de bosques tropicales desbrozados (incluye el material maderero no quemado)				
<sup>a</sup> En cuanto a la caña de azúcar, los datos se refieren al quemado previo a la cosecha del cultivo.				
<sup>b</sup> Evaluación de expertos a cargo de los autores.				

## 2.5 ORIENTACIÓN GENÉRICA ADICIONAL PARA LOS MÉTODOS DE NIVEL 3

Las directrices de este volumen están enfocadas principalmente a los métodos de Nivel 1, así como a brindar una orientación general como asistencia para el desarrollo de un inventario de Nivel 2. Se le ha prestado menor atención a los métodos de Nivel 3, aunque se proporcionó algo de orientación general en esta sección. Los inventarios de Nivel 3 son sistemas de avanzada en los que se emplean mediciones y/o modelización con el propósito de mejorar la estimación de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (GEI), más allá de lo que es posible lograr con los métodos de Niveles 1 y 2. En esta sección, se elaboran directrices que proporcionan una base científica sólida para el desarrollo de inventarios de Nivel 3. *Estas directrices no limitan la selección de esquemas de muestreo o métodos de modelización de Nivel 3* sino que ofrecen una orientación general para ayudar a quien desarrolla el inventario en su tarea de aplicarlo. Más adelante en este volumen, pueden incluirse aspectos específicos que tienen que ver con los métodos de Nivel 3 para las categorías específicas de fuente individuales, los que servirán de complemento a la orientación general que se brinda en esta sección.

### 2.5.1 Inventarios de Nivel 3 basados en mediciones

Los inventarios se pueden basar en mediciones directas de cambios en las existencias de C a partir de las cuales se estiman las emisiones y absorciones de carbono. Es posible medir algunas de las emisiones de gases de efecto invernadero no CO<sub>2</sub>; no obstante, debido a la gran variabilidad espacial y temporal de las emisiones de no CO<sub>2</sub>, es factible que en los métodos de Nivel 3 se combinen modelos de proceso con mediciones, para poder estimar las emisiones de CO<sub>2</sub>. A partir de inventarios basados exclusivamente en mediciones, p. ej. basados en mediciones repetidas empleando un inventario nacional de forestación, se pueden derivar estimaciones de cambios en las existencias de carbono sin confiar en modelos de proceso, pero indefectiblemente requieren modelos estadísticos apropiados para escalar en espacio y tiempo las mediciones de las parcelas a un inventario nacional. Los enfoques basados en modelos dinámicos (p. ej. modelos basados en procesos) para estimar las emisiones nacionales se analizan en la Sección 2.5.2. En general, la puesta en práctica de un inventario de Nivel 3 basado en mediciones implica seis etapas.

**Etapa 1. Desarrollo de un esquema de muestreo.** Se pueden desarrollar esquemas de muestreo empleando toda una diversidad de enfoques, pero lo típico es que incluyan un cierto grado de aleatoriedad en los sitios de muestreo dentro de los estratos. (Incluso en los inventarios basados en una grilla regular es típico que el punto de inicio de la grilla se seleccione al azar). Los compiladores del inventario determinan cuál es el enfoque apropiado considerando el tamaño de su país, las principales variables ambientales (p. ej. el clima) y los sistemas de gestión de la región. Estos dos últimos puede servir como variables de estratificación, suponiendo que el esquema de muestreo no es totalmente aleatorio. Además, constituye una *buena práctica* para el muestreo prever una amplia cobertura espacial de emisiones y/o absorciones para una categoría fuente principal en particular.

El compilador debe establecer un lapso apropiado dentro del cual se volverá a muestrear los sitios, si es que se usa el diseño de mediciones repetidas. La oportunidad en que se realice la re-medicación depende de la velocidad en los cambios de inventario o de las emisiones de gases de efecto invernadero no CO<sub>2</sub>. Por ejemplo, los períodos de re-medicación en las regiones boreales y templadas, donde los árboles crecen lentamente y los depósitos de DOM cambian poco por año, pueden ser más largos que donde la dinámica del carbono sea más acelerada. Donde los flujos se midan directamente, la mayor variabilidad temporal y espacial va a requerir muestreos más frecuentes o intensivos para capturar los flujos que, de otra manera, podrían estar ausentes de los registros de mediciones.

Hay enfoques que no incluyen el re-muestreo de los mismos sitios. Tales diseños son aceptables, pero pueden limitar la capacidad estadística del análisis y, por consiguiente, traer aparejada una mayor incertidumbre. Es factible que un diseño con mediciones repetidas proporcione una mejor base para estimar los cambios en las existencias de carbono o las emisiones en la mayoría de los países.

Una *buena práctica* es desarrollar un manual de la metodología, que explique el esquema de muestreo como parte de la Etapa 1. Puede resultar de utilidad para quienes se ocupen de las mediciones, de los análisis de laboratorio y de otros aspectos del proceso, a la vez que sirva, posiblemente, para aportar material de apoyo a los efectos de la documentación.

**Etapa 2. Selección de los sitios de muestreo.** Se ubicarán sitios de muestreo específicos sobre la base del diseño de muestreo. Constituye una *buena práctica* tener sitios alternativos de muestreo en caso de que no resulte



posible muestrear en algunas de las ubicaciones originales. En el diseño de mediciones repetidas, los sitios conformarán una red de monitorización que volverá a muestrearse periódicamente.

Es factible que la determinación de las ubicaciones de muestreo implique el uso de un sistema de información geográfica. Una base de datos geográfica puede incluir una gran diversidad de datos ambientales y de gestión, tales como clima, suelos, uso de la tierra y operaciones agropecuarias, según la categoría de fuente y la estratificación. Si no se dispone de datos importantes a escala nacional, quien desarrolle el inventario debe volver a evaluar el diseño y la estratificación (si se la usó) de la Etapa 1 y, posiblemente, modificar el diseño de muestreo.

El muestreo puede requerir coordinación entre distintos ministerios nacionales, gobiernos provinciales o estatales, compañías y terratenientes. Es posible crear relaciones entre estas partes interesadas antes de proceder a recolectar las muestras iniciales. Informar a las partes interesadas respecto a la monitorización en curso también puede servir de ayuda y permitir un mayor éxito en la aplicación de los programas de monitorización.

**Etapa 3. Recolección de las muestras iniciales.** Una vez determinado el conjunto final de sitios, un equipo de muestreo puede visitar esos lugares, establecer parcelas y tomar las muestras iniciales. Las muestras iniciales van a suministrar las existencias iniciales de carbono o van a servir como primera medición de las emisiones. Es una *buena práctica* establecer protocolos de medición de campo y de laboratorio antes de que se recolecten las muestras. Además, puede servir de ayuda tomar las coordenadas geográficas de las ubicaciones de las parcelas o de los puntos de muestreo con un sistema de posicionamiento global y, si se planifica repetir las mediciones, marcar permanentemente la ubicación para que el sitio se pueda encontrar fácilmente y se puedan volver a tomar las muestras en el futuro.

Constituye una *buena práctica* tomar las medidas pertinentes y notas sobre las condiciones ambientales y la gestión del sitio. Esto va a confirmar que las condiciones fueron coherentes con el diseño del esquema de muestreo, a la vez que se pueda usar para el análisis de datos (Etapa 5). Si se aplica un método de muestreo estratificado, y se hace evidente que muchos o la mayoría de los sitios no son coherentes con las condiciones ambientales y los sistemas de gestión que se esperaba, es una *buena práctica* repetir la Etapa 1, reevaluando y, posiblemente, modificando el esquema de muestreo sobre la base de la nueva información.

**Etapa 4. Remuestreo periódico de la red de monitorización.** Parta los diseños de mediciones repetidas, los sitios de muestreo se volverán a muestrear periódicamente a fin de evaluar las tendencias de las existencias de carbono y de las emisiones de no CO<sub>2</sub> durante un período de inventario. El tiempo que deberá transcurrir entre una y otra medición depende de la velocidad con la que se produzcan los cambios en las existencias, de la variabilidad de las emisiones, de los recursos de que se disponga para el programa de monitorización, y del diseño del esquema de muestreo.

Si se ha previsto un muestreo destructivo, como los que implican sacar muestras de suelo o de biomasa, es una *buena práctica* volver a muestrear el mismo sitio pero no exactamente en el mismo lugar en el que se extrajo la muestra anteriormente. Es factible que el muestreo destructivo en la ubicación exacta introduzca sesgo en las mediciones. Esos sesgos podrían comprometer la monitorización y producir resultados que no sean representativos de las tendencias nacionales.

**Etapa 5. Análisis de los datos y determinación de los cambios en las existencias de carbono y en las emisiones de no CO<sub>2</sub> y deducción de las estimaciones de emisión y absorción nacionales y de la magnitud de la incertidumbre.** Constituye una *buena práctica* seleccionar un método estadístico apropiado para el análisis de los datos sobre la base del diseño de muestreo. El resultado general del análisis estadístico estará constituido por estimaciones de los cambios en las existencias de carbono o por mediciones de emisiones de las cuales se pueden derivar las estimaciones de emisiones y absorciones a nivel nacional. También es una *buena práctica* incluir estimaciones de incertidumbre, lo que incluirá errores en las mediciones durante la recolección de muestras y el procesamiento en laboratorio (es decir, esto último se puede manejar empleando normas y a través de verificaciones cruzadas con laboratorios independientes), variaciones de muestreo relacionadas con el diseño de monitorización y otras fuentes pertinentes de incertidumbre (véanse, más adelante en este volumen, los análisis para cada categoría de fuente, además de lo referido a incertidumbre en el Volumen 1). El análisis puede incluir el escalamiento de las mediciones a un dominio espacial o temporal de mayor magnitud, lo que, nuevamente, depende del diseño del esquema de muestreo. El escalamiento puede oscilar entre un simple promedio o promedio ponderado y técnicas más detalladas de interpolación/extrapolación.

Para obtener estimaciones nacionales de cambios de existencias o de emisión de gases de efecto invernadero no CO<sub>2</sub>, a menudo resulta necesario extrapolar las mediciones utilizando modelos que tienen en cuenta las condiciones ambientales, la gestión y otros datos de la actividad. Aunque (por lo menos en teoría) los cambios netos de los gases de efecto invernadero con base de carbono se pueden estimar utilizando exclusivamente mediciones de existencias de carbono, a menudo se emplean modelos estadísticos y de otra naturaleza como ayuda para escalar las medidas de las parcelas a estimaciones nacionales. Es poco factible que las estimaciones

nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero no CO<sub>2</sub> se deriven sólo a partir de las mediciones, dados los gastos y las dificultades que implica obtenerlas. Por ejemplo, las emisiones de N<sub>2</sub>O provocadas por incendios forestales no pueden medirse empíricamente, aunque es típico que se las infiera a partir de muestras, de datos de la actividad en la superficie quemada y de estimaciones de consumo de combustible. Por contraste, las emisiones de N<sub>2</sub>O del suelo pueden estimarse fácilmente empleando cámaras, aunque sería muy oneroso establecer una red con la intensidad de muestreo necesaria para proporcionar estimaciones de emisión a nivel nacional, basadas exclusivamente en mediciones sin utilizar modelos para la extrapolación.

Una *buena práctica* es analizar las emisiones con relación a las condiciones ambientales además del aporte de las distintas prácticas de gestión a esas tendencias. La interpretación de las pautas va a resultar de utilidad para evaluar las posibilidades para mitigación futura.

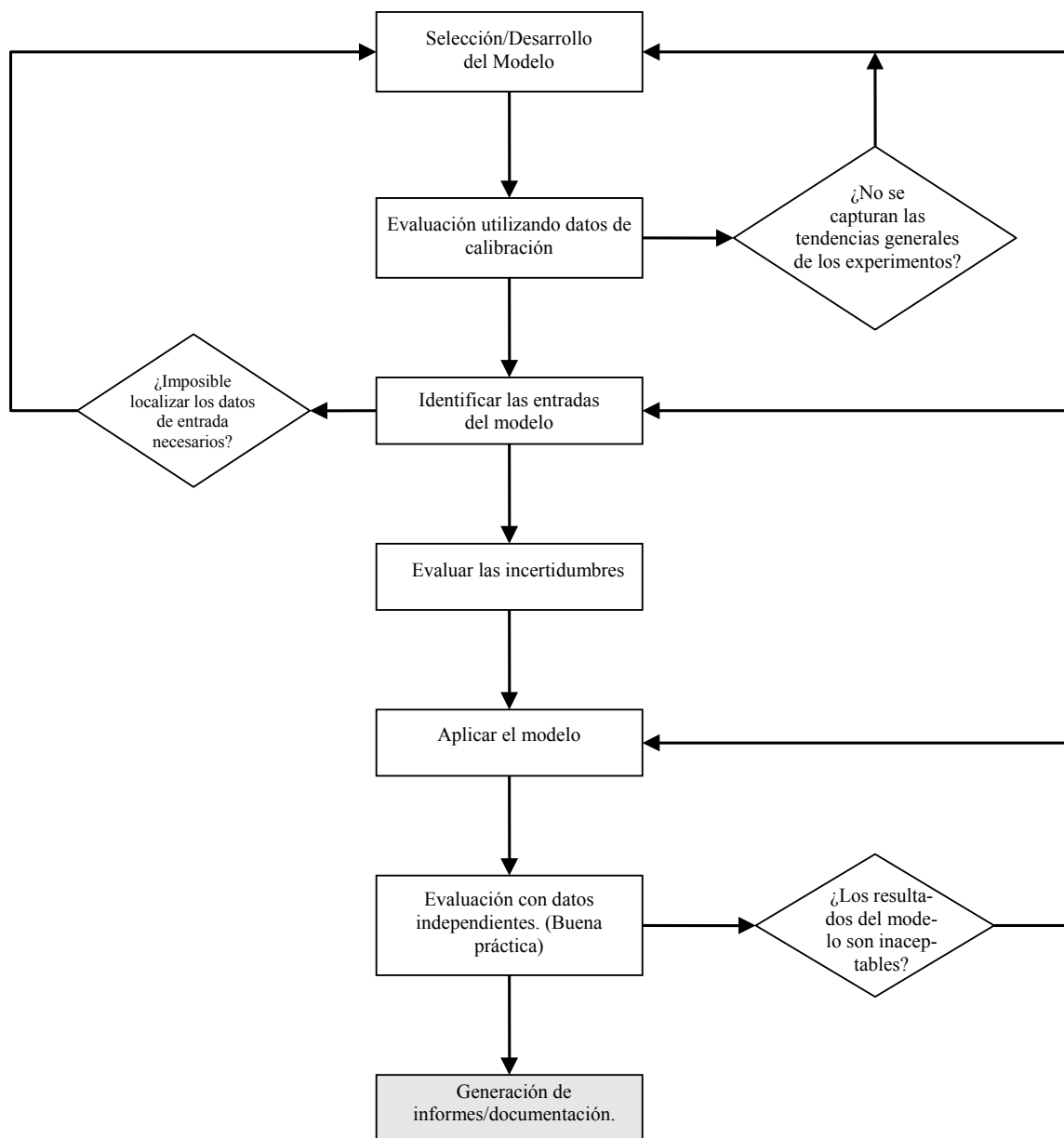
**Etapa 6. Generación de informes y documentación** Constituye una *buena práctica* recopilar los resultados de los inventarios de manera sistemática y transparente a los efectos de la declaración. La documentación puede incluir una descripción del esquema de muestreo y de los métodos estadísticos, el cronograma de muestreo (incluido el remuestreo), estimaciones de cambios en las existencias y las emisiones, y la interpretación de las tendencias de emisión (p. ej. aportes de las actividades de gestión). Además, se deberán completar y documentar en el informe las actividades de garantía de calidad y de control de calidad (GC/CC), incluso los procedimientos de garantía de calidad con los que revisores pares no involucrados en el análisis evaluaron la metodología. Para conocer detalles respecto a GC/CC, generación de informes y documentación, véase la sección que trata sobre la categoría fuente específica más adelante en este volumen, así como la información provista en el Volumen 1, Capítulo 6.

## 2.5.2 Inventarios de Nivel 3 basados en modelos

Los inventarios basados en modelos se desarrollan utilizando modelos de avanzada empíricos, basados en procesos o de otros tipos. Es una *buena práctica* contar con mediciones independientes para confirmar que el modelo tiene la capacidad necesaria para estimar emisiones y absorciones en las categorías fuente de interés (Prisley y Mortimer, 2004). En general, se utilizan siete etapas para implementar un inventario de Nivel 3 basado en modelos (Figura 2.7).

**Etapa 1. Selección/desarrollo de un modelo para calcular los cambios de existencias y/o las emisiones de gases de efecto invernadero.** Se debe seleccionar o desarrollar un modelo que represente los cambios de existencias o las emisiones de gases de efecto invernadero no CO<sub>2</sub> con mayor exactitud que la que ofrecen los métodos de los Niveles 1 y 2. Como parte de esta decisión, es una *buena práctica* considerar la disponibilidad de datos para ingresar (Etapa 3) y de los recursos informáticos necesarios para implementar el modelo (Etapa 5).

**Figura 2.7** Etapas para desarrollar un sistema de estimación de inventario de Nivel 3 basado en modelos



**Etapas 2.** *Evaluación con datos de calibración.* Es una etapa crítica para el desarrollo del inventario en el que se comparen resultados de modelos directamente con mediciones utilizadas para la calibración/parametrización del modelo (p. ej. Falloon y Smith, 2002). Se pueden realizar comparaciones empleando pruebas estadísticas y/o gráficamente, con el objeto de demostrar que el modelo simula eficazmente las tendencias medidas para diversas condiciones en la categoría de fuente de interés. Es una *buena práctica* garantizar que el modelo responda como corresponde a las variaciones en los datos de la actividad y tenga la capacidad de declarar los resultados por categoría de uso de la tierra según las convenciones formuladas en el Capítulo 3. Puede resultar necesario efectuar una recalibración del modelo o modificaciones de su estructura (es decir, algoritmos) si el modelo no captura las tendencias generales y si hay grandes sesgos sistemáticos. En algunos casos, se puede seleccionar o desarrollar un nuevo modelo sobre la base de esta evaluación. Los resultados de la evaluación constituyen un componente importante de la documentación sobre declaración, lo que justifica el uso de un modelo en particular para cuantificar las emisiones de una categoría fuente.

**Etapas 3.** *Recolección de datos espacio-temporales sobre actividades y condiciones ambientales pertinentes que se necesitan para ingresarlos a un modelo.* Los modelos, incluidos los que se utilizan en los métodos de Niveles 1 y 2, requieren que se les ingrese información específica para estimar las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero relacionada con una categoría de fuente. Estos datos a ingresar pueden comprender desde información meteorológica o de los suelos hasta cantidad de ganado, tipos de bosques, perturbaciones naturales o prácticas de gestión de cultivos. Constituye una *buena práctica* que los datos a ingresar sean coherentes con la escala espacio-temporal del modelo (es decir, algoritmos). Por ejemplo, si un modelo funciona con periodicidad diaria, entonces los datos a ingresar deben suministrar información respecto a la variación diaria en los datos sobre características ambientales o actividad. En algunos casos, los datos a ingresar pueden constituir un factor limitante en la selección del modelo, lo que obliga a descartar algunos modelos por inapropiados, dados los datos de la actividad y/o ambientales de que disponen.

**Etapas 4.** *Cuantificación de incertidumbres.* Las incertidumbres se deben a la imperfección del conocimiento respecto a las actividades o los procesos que conducen a flujos de gases de efecto invernadero y es típico que se manifiesten en la estructura del modelo y en los datos que se le ingresan. Consecuentemente, el propósito de los análisis de incertidumbre es proporcionar una medida rigurosa de la confianza que se le atribuye a la estimación de un modelo, basada en incertidumbres contenidas en la estructura del modelo y en los datos que se le ingresan, lo que genera una medida de variabilidad en los cambios de existencias de carbono o en los flujos de gases de efecto invernadero no CO<sub>2</sub>. En el Volumen 1, Capítulo 3, se ofrece orientación específica respecto a los métodos adecuados para llevar a cabo estos análisis. También se proporciona información adicional respecto a categorías de fuente específicas más adelante en este volumen.

**Etapas 5.** *Aplicación del modelo.* El principal aspecto a considerar para esta etapa es que haya suficientes recursos informáticos y tiempo del personal para preparar los datos a ingresar, realizar las simulaciones del modelo y analizar los resultados. Esto depende de la eficiencia con que esté preparada la programación y de la complejidad del modelo, así como del alcance espacial y temporal y de la resolución de las simulaciones. En algunos casos, las limitaciones en recursos informáticos pueden limitar la complejidad y la amplitud de la resolución espacial o temporal que se puede usar en la aplicación a nivel nacional (es decir, simular a escalas espaciales y temporales más pormenorizadas va a requerir mayores recursos informáticos).

**Etapas 6.** *Evaluación con datos independientes.* Es importante tener presente la diferencia entre las Etapas 2 y 6. La Etapa 2 implica probar la salida del modelo con datos de campo que se utilizaran como base para la calibración (es decir, la parametrización). Por contraste, la evaluación con datos independientes se realiza con un conjunto de datos completamente independiente de la calibración del modelo, por lo que proporciona una evaluación más rigurosa de los componentes y los resultados del modelo. Lo óptimo es que la evaluación independiente se base en mediciones de una red de monitorización o de sitios de investigación que no se hayan usado para calibrar los parámetros del modelo. La red sería similar, en principio, a una serie de sitios que se utilizan para un inventario basado en mediciones. No obstante, no es necesario que el muestreo sea tan intensivo porque la red no forma parte de la base para estimar los cambios en las existencias de carbono ni los flujos de gases de efecto invernadero no CO<sub>2</sub> como sucede en los inventarios basados exclusivamente en mediciones, sino que se usa para verificar los resultados del modelo.

En algunos casos, la evaluación independiente puede demostrar que el sistema de estimación basado en el modelo no es el apropiado debido a diferencias de gran magnitud e impredecibles entre los resultados del modelo y las tendencias medidas a partir de la red de monitorización. Los problemas pueden tener su origen en una de tres posibilidades: errores en la etapa de aplicación, escasez de datos para alimentar al modelo, o un modelo inadecuado. Es típico que surjan problemas de aplicación a partir de los errores de programación informática, mientras que los datos ingresados al modelo pueden generar resultados erróneos si los mismos no son representativos de la actividad de gestión o de las condiciones ambientales. En estos dos casos, constituye una *buena práctica* para quienes desarrollan el inventario volver a las Etapas 3 o 6, según el problema que se plantee. Parece menos factible que el modelo resulte inadecuado si la Etapa 2 se consideró razonable. No obstante, si éste fuera el caso, es una *buena práctica* volver a la fase de selección/ desarrollo del modelo (Etapa 1).

Durante la Etapa 2 que sigue a la de selección/desarrollo, es una *buena práctica* evitar el uso de datos de evaluación independientes para recalibrar o definir algoritmos. Si esto sucede, estos datos ya no serían apropiados para una evaluación independiente y, por ende, no satisfarían el propósito de la Etapa 6 de este método de inventario.

**Etapa 7. Generación de informes y documentación.** Constituye una *buena práctica* recopilar los resultados de los inventarios de manera sistemática y transparente a los efectos de la generación de informes. La documentación puede incluir una descripción del modelo, un resumen de las fuentes de los datos ingresados al modelo, los resultados de la evaluación del modelo, incluyendo las fuentes de los experimentos y/o los datos de mediciones de la red de monitoreo, las estimaciones de cambios en las existencias y en las emisiones, y la interpretación de las tendencias de las emisiones (es decir, los aportes de las actividades de gestión). La garantía de calidad y el control de calidad deben completarse y documentarse en el informe. Para conocer detalles respecto a GC/CC, generación de informes y documentación, véase la sección que trata sobre la categoría de fuente específica más adelante en este volumen, así como la información provista en el Volumen 1, Capítulo 6.

## Referencias

- Andrea, M.O. and Merlet, P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles* **15**:955-966.
- Armentano, T.V. and Menges, E.S. (1986). Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone. *Journal of Ecology* **74**: 755-774.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L.H., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X.H., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., Pilegaard, K., Schmid, H.P., Valentini, R., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K. and Wofsy, S. (2001). FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* **82**: pp. 2415-2434.
- Bernoux, M., Carvalho, M.D.S., Volkoff, B. and Cerri, C.C. (2002). Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal* **66**:888-896.
- Bhatti, J.S., Apps, M.J. and Jiang, H. (2001). Examining the carbon stocks of boreal forest ecosystems at stand and regional scales. In: Lal R. *et al.* (eds.) *Assessment Methods for Soil Carbon*, Lewis Publishers, Boca Raton FL, pp. 513-532.
- Brady, N.C. and Weil, R.R. (1999). *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 881 pp.
- Clymo, R.S. (1984). The limits to peat bog growth. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* **303**:605-654.
- Conant, R.T., Paustian, K. and Elliott, E.T. (2001). Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Application* **11**:343-355.
- Coomes, D.A., Allen, R.B., Scott, N.A., Goulding, C. and Beets, P. (2002). Designing systems to monitor carbon stocks in forests and shrublands. *Forest Ecology and Management* **164**, pp. 89 - 108.
- Davidson, E. A. and Ackerman, I.L. (1993). Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry* **20**:161-164.
- Ellert, B.H., Janzen, H.H. and McConkey, B.G. (2001). Measuring and comparing soil carbon storage. In: R. Lal, J.M. Kimble, R.F. Follett and B.A. Stewart (eds.). *Soil Management for Enhancing Carbon Sequestration*. CRC Press, Boca Raton, FL.: pp. 593-610.
- Falloon, P. and Smith, P. (2002). Simulating SOC changes in long-term experiments with the RothC and Century; model evaluation for a regional application. *Soil Use and Management* **18**:101-111.
- Falloon, P. and Smith, P. (2003). Accounting for changes in soil carbon under the Kyoto Protocol: need for improved long-term data sets to reduce uncertainty in model projections. *Soil Use and Management* **19**:265-269.
- Forbes, M.S., Raison, R.J. and Skjemstad, J.O. (2006). Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems. *Journal of the Science of the Total Environment* (in press).

- Gifford, R.M. and Roderick, M.L. (2003). Soil carbon stocks and bulk density: spatial and cumulative mass coordinates as a basis for expression? *Global Change Biology* **9**:1507-1513.
- Gorham, E. (1991). Northern peatlands: role in the carbon cycle and probably responses to climatic warming. *Ecological Applications* **1**:182-195.
- Harmon, M.E. and Hua, C. (1991). Coarse woody debris dynamics in two old-growth ecosystems. *BioScience* **41**: 604-610.
- Harmon, M.E., Franklin, J.F., Swanson, F.J., Sollins, P., Gregory, S.V., Lattin, J.D., Anderson, N.H., Cline, S.P., Aumen, N.G., Sedell, J.R., Lienkaemper, G.W., Cromack, J.R. and Cummins, K.W. (1986). Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research* **15**: 133–302.
- IPCC (1997). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Lim B., Tréanton K., Mamaty I., Bonduki Y., Griggs D.J. Callander B.A. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA, Paris, France.
- IPCC (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Penman J., Kruger D., Galbally I., Hiraishi T., Nyenzi B., Emmanuel S., Buendia L., Hoppaus R., Martinsen T., Meijer J., Miwa K., Tanabe K. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan.
- IPCC (2000). Watson R., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath, N.H., Verardo D.J. and Dokken D.J. (Eds). Land use, Land-use Change, and Forestry: A Special Report. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- IPCC (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Penman J., Gytarsky M., Hiraishi T., Krug, T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- Jobbagy, E.G. and Jackson, R.B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications* **19**(2): 423-436.
- Karjalainen, L. and Kuuluvainen, T. (2002). Amount and diversity of coarse woody debris within a boreal forest landscape dominated by *Pinus sylvestris* in Vienansalo wilderness, eastern Fennoscandia. *Silva Fennica* **36**(1): 147–167.
- Kasimir-Klemedtsson, A, Klemedtsson, L., Berglund, K., Martikainen, P., Silvola, J. and Oenema, O. (1997). Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil Use and Management* **13**:245-250.
- Krankina, O.N., Harmon, M.E., Kukuev, Y.A., Treyfeld, R.E., Kashpor, N.N., Kresnov, V.G., Skudin, V.M., Protasov, N.A., Yatskov, M., Spycher, G. and Povarov, E.D. (2002). Coarse woody debris in forest regions of Russia, *Can.J. For. Res.* **32**: 768-778.
- Kurz, W.A., Apps, M.J., Webb, T.M. and McNamee, P.J. (1992). The carbon budget of the Canadian forest sector: phase I. Forestry Canada, Northwest Region. Information Report NOR-X-326, 93 pp.
- Lettens, S., van Orshoven, J., van Wesemael, B. and Muys, B. (2004). Soil organic and inorganic carbon contents of landscape units in Belgium derived using data from 1950 to 1970. *Soil Use and Management* **20**: 40-47.
- Mann, L.K. (1986). Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science* **142**:279-288.
- Martikainen, P.J., Nykanen, H., Alm, J. and Silvola, J. (1995). Change in fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide due to forest drainage of mire sites of different trophy. *Plant & Soil* **169**: 571-577.
- McGill, W. B. (1996). Review and classification of ten soil organic matter models. In: Powlson D.S., Smith P., and Smith J.U. (eds.). Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets. Springer-Verlag, Heidelberg: pp. 111-132.
- Nykänen, H., Alm, J., Lang, K., Silvola, J. and Martikainen, P.J. (1995). Emissions of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and CO<sub>2</sub> from a virgin fen and a fen drained for grassland in Finland. *Journal of Biogeography* **22**:351-357.
- Ogle, S.M., Breidt, F.J., Eve, M.D. and Paustian, K. (2003). Uncertainty in estimating land-use and management impacts on soil organic carbon storage for U.S. agricultural lands between 1982 and 1997. *Global Change Biology* **9**:1521-1542.
- Ogle, S.M., Breidt, F.J. and Paustian, K. (2005). Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry* **72**:87-121.

- Ogle, S.M., Conant, R.T. and Paustian, K. (2004). Deriving grassland management factors for a carbon accounting approach developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Environmental Management* **33**:474-484.
- Paustian, K., Andren, O., Janzen, H.H., Lal, R., Smith, P., Tian, G., Tiessen, H., van Noordwijk, M. and Woerner, P.L. (1997). Agricultural soils as a sink to mitigate CO<sub>2</sub> emissions. *Soil Use and Management* **13**:230-244.
- Preston, C.M. and Schmidt, M.W.I. (2006). Black (pyrogenic) carbon in the boreal forests: a synthesis of current knowledge and uncertainties. *Biogeosciences Discussions* **3**,211-271.
- Prisley, S.P. and Mortimer, M.J. (2004). A synthesis of literature on evaluation of models for policy applications, with implications for forest carbon accounting. *Forest Ecology and Management* **198**:89-103.
- Shaw, C.H., Bhatti, J.S. and Sabourin, K.J. (2005). An ecosystem carbon database for Canadian forests. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta, Information Report NOR-X-403.
- Siltanen *et al.* (1997). A soil profile and organic carbon data base for Canadian forest and tundra mineral soils. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta.
- Sleutel, S., de Neve, S., Hofman, G., Boeckx, P., Beheydt, D., van Cleemput, O., Mestdagh, I., Lootens, P., Carlier, L., van Camp, N., Verbeeck, H., Vand Walle, I., Sampson, R., Lust, N. and Lemeur, R. (2003). Carbon stock changes and carbon sequestration potential of Flemish cropland soils. *Global Change Biology* **9**:1193-1203.
- Smith, J. E. and Heath, L.S. (2001). Identifying influences on model uncertainty: an application using a forest carbon budget model. *Environmental Management* **27**:253-267.
- Smith, P., Powlson, D.S., Smith, J.U. and Elliott, E.T. (eds) (1997b). Evaluation and comparison of soil organic matter models. Special Issue, *Geoderma* **81**:1-225.
- Smith, P. (2004a). Monitoring and verification of soil carbon changes under Article 3.4 of the Kyoto Protocol. *Soil Use and Management* **20**: 264-270.
- Smith, P. (2004b). How long before a change in soil organic carbon can be detected? *Global Change Biology* **10**: 1878-1883.
- Smith, S.V., Renwick, W.H., Buddemeier, R.W. and Crossland, C.J. (2001). Budgets of soil erosion and deposition for sediments and sedimentary organic carbon across the conterminous United States. *Global Biogeochemical Cycles* **15**:697-707.
- Smith, W.N., Desjardins, R.L. and Pattey, E. (2000). The net flux of carbon from agricultural soils in Canada 1970-2010. *Global Change Biology* **6**:557-568.
- Somogyi, Z., Cienciala, E., Mäkipää, R., Muukkonen, P., Lehtonen, A. and Weiss, P. (2006). Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *European Journal of Forest Research*. DOI: 10.1007/s10342006-0125-7.
- Tate, K.R., Wilde, R.H., Giltrap, D.J., Baisden, W.T., Saggar, S., Trustrum, N.A., Scott, N.A. and Barton, J.P. (2005). Soil organic carbon stocks and flows in New Zealand: measurement and modelling. *Canadian Journal of Soil Science*, in press.
- Thormann M.N., Szumigalski A.R. and Bayley S.E. (1999). Above-ground peat and carbon accumulation potentials along a bog-fen-marsh wetland gradient in southern boreal Alberta, Canada. *Wetlands* **19** (2): 305-317.
- Tremblay, S., Ouimet, R. and Houle, D. (2002). Prediction of organic carbon content in upland forest soils of Quebec, Canada. *Can. J. For. Res.* **32**: pp. 903-914.
- VandenBygaert, A.J., Gregorich, E.G., Angers, D.A., *et al.* (2004). Uncertainty analysis of soil organic carbon stock change in Canadian cropland from 1991 to 2001. *Global Change Biology* **10**:983-994.
- Vogt, K.A., Vogt, D.J., Pamiotto, P.A., Boon, P., O'Hara, J. and Asbjornsen, H. (1996). Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type, and species. *Plant and Soil* **187**: pp. 159-219.
- Yavitt, J. B., Fahey, T.J. and Simmons, J.A. (1997). Methane and carbon dioxide dynamics in a northern hardwood ecosystem. *Soil Science Society of America Journal* **59**: 796-804.

## REFERENCIAS DE LOS CUADROS 2.4 Y 2.6

1. Alexander, M. (1978). Calculating and interpreting forest fire intensities. *Canadian Journal of Botany* **60**: p. 349-357.
2. Amiro, B., Todd, J. and Wotton, B. (2001). Direct carbon emissions from Canadian forest fires, 1959-1999. *Canadian Journal of Forest Research*, **31**: p. 512-525.
3. Araújo, T., Carvalho, J., Higuchi, N., Brasil, A. and Mesquita, A. (1999). A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the state of Pará, Brazil. *Atmospheric Environment*. **33**: p. 1991-1998.
4. Barbosa, R. and Fearnside, P. (1996). Pasture burning in Amazonia: Dynamics of residual biomass and the storage and release of above-ground carbon. *Journal of Geophysical Research*, **101**(D20): p. 25847-25857.
5. Bilbao, B. and Medina, E. (1996). Types of grassland fires and nitrogen volatilization in tropical savannas of calabozo, in Biomass Burning and Global Change: Volume 2. Biomass burning in South America, Southeast Asia, and temperate and boreal ecosystems, and the oil fires of Kuwait, J. Levine, Editor. MIT Press: Cambridge. p. 569-574.
6. Cachier, H., Lioussé, C., Pertusiot, M., Gaudichet, A., Echalar, F. and Lacaux, J. (1996). African fire Particulate emissions and atmospheric influence, in Biomass Burning and Global Change: Volume 1. Remote Sensing, Modeling and Inventory Development, and Biomass Burning in Africa, J. Levine, Editor. MIT Press: Cambridge. p. 428-440.
7. Carvalho, J., Higuchi, N., Araújo, T. and Santos, J. (1998). Combustion completeness in a rainforest clearing experiment in Manaus, Brazil. *Journal of Geophysical Research*. **103**(D11): p. 13195.
8. Carvalho, J., Costa, F., Veras, C., *et al.* (2001). Biomass fire consumption and carbon release rates of rainforest-clearing experiments conducted in northern Mato Grosso, Brazil. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **106**(D16): p. 17877-17887.
9. Cheyney, N., Raison, R. and Khana, P. (1980). Release of carbon to the atmosphere in Australian vegetation fires, in Carbon Dioxide and Climate: Australian Research, G. Pearman, Editor. *Australian Academy of Science*: Canberra. p. 153-158.
10. Cofer, W., Levine, J., Winstead, E. and Stocks, B. (1990). Gaseous emissions from Canadian boreal forest fires. *Atmospheric Environment*, **24A**(7): p. 1653-1659.
11. Cofer, W., Winstead, E., Stocks, B., Goldammer, J. and Cahoon, D. (1998). Crown fire emissions of CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and TNMHC from a dense jack pine boreal forest fire. *Geophysical Research Letters*, **25**(21): p. 3919-3922.
12. De Castro, E.A. and Kauffman, J.B. (1998). Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of above-ground biomass, root mass and consumption by fire. *Journal of Tropical Ecology*, **14**(3): p. 263-283.
13. Delmas, R. (1982). On the emission of carbon, nitrogen and sulfur in the atmosphere during bushfires in intertropical savannah zones. *Geophysical Research Letters*, **9**(7): p. 761-764.
14. Einfeld, W., Ward, D. and Hardy, C. (1991). Effects of fire behaviour on prescribed fire smoke characteristics: A case study, in Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications, J. Levine, Editor, MIT Press: Massachusetts. p. 412-419.
15. Fearnside, P., Filho, N. and Fernandes, F. (1993). Rainforest burning and the global carbon budget: biomass, combustion efficiency and charcoal formation in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **98**(D9): p. 16733-16743.
16. Fearnside, P., Graca, P., Filho, N., Rodrigues, J. and Robinson, J. (1999). Tropical forest burning in Brazilian Amazonia: measurement of biomass loading, burning efficiency and charcoal formation at Altamira, Para. *Forest Ecology and Management*, **123**: p. 65-79.
17. Fearnside, P., Graca, P. and Rodrigues, J. (2001). Burning of Amazonian rainforests: burning efficiency and charcoal formation in forest cleared for cattle pasture near Manaus, Brazil. *Forest Ecology and Management*, **146**: p. 115-128.
18. Feller, M. (1998). The influence of fire severity, not fire intensity, on understory vegetation biomass in British Columbia. in 13th Fire and Forest Meteorology Conference. Lorne, Australia: IAWF.
19. Flinn, D., Hopmans, P., Farrell, P. and James, J. (1979). Nutrient loss from the burning of *Pinus radiata* logging residue. *Australian Forest Research*, **9**: p. 17-23.
20. Garnett, M., Ineson, P. and Stevenson, A. (2000). Effects of burning and grazing on carbon sequestration in a Pennine blanket bog, UK. *Holocene*, **10**(6): p. 729-736.
21. Graca, P., Fearnside, P. and Cerri, C. (1999). Burning of Amazonian forest in Ariquemes, Rondonia, Brazil: biomass, charcoal formation and burning efficiency. *Forest Ecology and Management*, **120**: p. 179-191.
22. Griffin, G. and Friedel, M. (1984). Effects of fire on central Australian rangelands. I Fire and fuel characteristics and changes in herbage and nutrients. *Australian Journal of Ecology*, **9**: p. 381-393.
23. Guild, L., Kauffman, J., Ellingson, L. and Cummings, D. (1998). Dynamics associated with total above-ground biomass, C, nutrient pools, and biomass burning of primary forest and pasture in Rondonia, Brazil during SCAR-B. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **103**(D24): p. 32091-32100.
24. Gupta, P., Prasad, V., Sharma, C., Sarkar, A., Kant, Y., Badarinath, K. and Mitra, A. (2001). CH<sub>4</sub> emissions from biomass burning of shifting cultivation areas of tropical deciduous forests - experimental results from ground - based measurements. *Chemosphere - Global Change Science*, **3**: p. 133-143.
25. Harwood, C. and Jackson, W. (1975). Atmospheric losses of four plant nutrients during a forest fire. *Australian Forestry*, **38**(2): p. 92-99.
26. Hobbs, P. and Gimingham, C. (1984). Studies on fire in Scottish heathland communities. *Journal of Ecology*, **72**: p. 223-240.
27. Hobbs, P., Reid, J., Herring, J., *et al.* (1996). Particle and trace-gas measurements from prescribed burns of forest products in the Pacific Northwest, in Biomass Burning and Global Change: Volume 2. Biomass burning in South America, Southeast Asia, and temperate and boreal ecosystems, and the oil fires of Kuwait, J. Levine, Editor. MIT Press: Cambridge. p. 697-715.



28. Hoffa, E., Ward, D., Hao, W., Susott, R. and Wakimoto, R. (1999). Seasonality of carbon emissions from biomass burning in a Zambian savanna. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **104**(D11): p. 13841-13853.
29. Hopkins, B.(1965). Observations on savanna burning in the Olokemeji forest reserve, Nigeria. *Journal of Applied Ecology*, **2**(2): p. 367-381.
30. Hughes, R., Kauffman, J. and Cummings, D. (2000). Fire in the Brazilian Amazon 3. Dynamics of biomass, C, and nutrient pools in regenerating forests. *Oecologia*, **124**(4): p. 574-588.
31. Hurst, D., Griffith, W. and Cook, G. (1994). Trace gas emissions from biomass burning in tropical Australian savannas. *Journal of Geophysical Research*, **99**(D8): p. 16441-16456.
32. Jackson, W. (2000). Nutrient stocks in Tasmanian vegetation and approximate losses due to fire. Papers and proceedings of the Royal Society of Tasmania, 134: p. 1-18.
33. Kasischke, E., French, N., Bourgeau-Chavez, L. and Christensen, N. (1995). Estimating release of carbon from 1990 and 1991 forest fires in Alaska. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **100**(D2): p. 2941-2951.
34. Kauffman, J. and Uhl, C. (1990). 8 interactions of anthropogenic activities, fire, and rain forests in the Amazon Basin, in *Fire in the Tropical Biota: Ecosystem Processes and Global Changes*, J. Goldammer, Editor. Springer-Verlag: Berlin. p. 117-134.
35. Kauffman, J., Sanford, R., Cummings, D., Salcedo, I. and Sampaio, E. (1993). Biomass and nutrient dynamics associated with slash fires in neotropical dry forests. *Ecology*, **74**(1): p. 140-151.
36. Kauffman, J., Cummings, D. and Ward, D. (1994). Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian cerrado. *Journal of Ecology*, **82**: p. 519-531.
37. Kauffman, J., Cummings, D., Ward, D. and Babbitt, R. (1995). Fire in the Brazilian Amazon: 1. Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests. *Oecologia*, **104**: p. 397-408.
38. Kauffman, J., Cummings, D. and Ward, D. (1998). Fire in the Brazilian Amazon: 2. Biomass, nutrient pools and losses in cattle pastures. *Oecologia*, **113**: p. 415-427.
39. Kayll, A. (1966). Some characteristics of heath fires in north-east Scotland. *Journal of Applied Ecology*, **3**(1): p. 29-40.
40. Kiil, A. (1969). Fuel consumption by a prescribed burn in spruce-fir logging slash in Alberta. *The Forestry Chronicle*, : p. 100-102.
41. Kiil, A.(1975). Fire spread in a black spruce stand. Canadian Forestry Service Bi-Monthly Research Notes, 31(1): p. 2-3.
42. Lacaux, J., Cachier, H. and Delmas, R. (1993). Biomass burning in Africa: an overview of its impact on atmospheric chemistry, in *Fire in the Environment: The Ecological, Atmospheric, and Climatic Importance of Vegetation Fires*, P. Crutzen and J. Goldammer, Editors. John Wiley & Sons: Chichester. p. 159-191.
43. Lavoue, D., Lioussé, C., Cachier, H., Stocks, B. and Goldammer, J. (2000). Modeling of carbonaceous particles emitted by boreal and temperate wildfires at northern latitudes. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **105**(D22): p. 26871-26890.
44. Levine, J. (2000). Global biomass burning: a case study of the gaseous and particulate emissions released to the atmosphere during the 1997 fires in Kalimantan and Sumatra, Indonesia, in *Biomass Burning and its Inter-relationships with the Climate System*, J. Innes, M. Beniston and M. Verstraete, Editors. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht. p. 15-31.
45. Levine, J. and Cofer, W. (2000). Boreal forest fire emissions and the chemistry of the atmosphere, in *Fire, Climate Change and Carbon Cycling in the Boreal Forest*, E. Kasischke and B. Stocks, Editors. Springer-Verlag: New York. p. 31-48.
46. Marsdon-Smedley, J. and Slijepcevic, A. (2001). Fuel characteristics and low intensity burning in Eucalyptus obliqua wet forest at the Warra LTER site. *Tasforests*, **13**(2): p. 261-279.
47. Mazurek, M., Cofer, W. and Levine, J. (1991). Carbonaceous aerosols from prescribed burning of a boreal forest ecosystem, in *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*, J. Levine, Editor, MIT Press: Massachusetts. p. 258-263.
48. McNaughton, S., Stronach, N. and Georgiadis, N. (1998). Combustion in natural fires and global emissions budgets. *Ecological Applications*, **8**(2): p. 464-468.
49. McRae, D. and Stocks, B. (1987). Large-scale convection burning in Ontario. in *Ninth Conference on Fire and Forest Meteorology*. San Diego, California: American Meteorological Society.
50. Moula, M., Brustet, J., Eva, H., Lacaux, J., Gregoire, J. and Fontan, J. (1996). Contribution of the Spread-Fire Model in the study of savanna fires, in *Biomass Burning and Global Change: Volume 1. Remote Sensing, Modeling and Inventory Development, and Biomass Burning in Africa*, J. Levine, Editor. MIT Press: Cambridge. p. 270-277.
51. Neil, R., Stronach, N. and McNaughton, S. (1989). Grassland fire dynamics in the Serengeti ecosystem, and a potential method of retrospectively estimating fire energy. *Journal of Applied Ecology*, **26**: p. 1025-1033.
52. Pivello, V. and Coutinho, L. (1992). Transfer of macro-nutrients to the atmosphere during experimental burnings in an open cerrado (Brazilian savanna). *Journal of Tropical Ecology*, **8**: p. 487-497.
53. Prasad, V., Kant, Y., Gupta, P., Sharma, C., Mitra, A. and Badarinath, K. (2001). Biomass and combustion characteristics of secondary mixed deciduous forests in Eastern Ghats of India. *Atmospheric Environment*, **35**(18): p. 3085-3095.
54. Raison, R., Khana, P. and Woods, P. (1985). Transfer of elements to the atmosphere during low intensity prescribed fires in three Australian subalpine eucalypt forests. *Canadian Journal of Forest Research*, **15**: p. 657-664.
55. Robertson, K. (1998). Loss of organic matter and carbon during slash burns in New Zealand exotic forests. *New Zealand Journal of Forestry Science*, **28**(2): p. 221-241.
56. Robinson, J. (1989). On uncertainty in the computation of global emissions from biomass burning. *Climatic Change*, **14**: p. 243-262.
57. Shea, R., Shea, B., Kauffman, J., Ward, D., Haskins, C. and Scholes, M. (1996). Fuel biomass and combustion factors associated with fires in savanna ecosystems of South Africa and Zambia. *Journal of Geophysical Research*, **101**(D19): p. 23551-23568.

58. Slijepcevic, A. (2001). Loss of carbon during controlled regeneration burns in Eucalyptus obliqua forest. *Tasforests*, **13**(2): p. 281-289.
59. Smith, D. and James, T. (1978). Characteristics of prescribed burns and resultant short-term environmental changes in Populus tremuloides woodland in southern Ontario. *Canadian Journal of Botany*, **56**: p. 1782-1791.
60. Soares, R. and Ribeiro, G. (1998). Fire behaviour and tree stumps sprouting in Eucalyptus prescribed burnings in southern Brazil. in III International Conference on Forest Fire Research / 14th Conference on Fire and Forest Meteorology. Luso.
61. Sorrensen, C. (2000). Linking smallholder land use and fire activity: examining biomass burning in the Brazilian Lower Amazon. *Forest Ecology and Management*, **128**(1-2): p. 11-25.
62. Stewart, H. and Flinn, D. (1985). Nutrient losses from broadcast burning of Eucalyptus debris in north-east Victoria. *Australian Forest Research*, **15**: p. 321-332.
63. Stocks, B. (1987). Fire behaviour in immature jack pine. *Canadian Journal of Forest Research*, **17**: p. 80-86.
64. Stocks, B. (1989). Fire behaviour in mature jack pine. *Canadian Journal of Forest Research*, **19**: p. 783-790.
65. Stocks, B., van Wilgen B., Trollope W., McRae D., Mason J., Weirich F. and Potgieter A. (1996). Fuels and fire behaviour dynamics on large-scale savanna fires in Kruger National Park, South Africa. *Journal of Geophysical Research*, **101**(D19): p. 23541-23550.
66. Stocks, B. and Kauffman, J. (1997). Biomass consumption and behaviour of wildland fires in boreal, temperate, and tropical ecosystems: parameters necessary to interpret historic fire regimes and future fire scenarios, in Sediment Records of Biomass Burning and Global Change, J. Clark, et al., Editors. Springer-Verlag: Berlin. p. 169-188.
67. Susott, R., Ward D., Babbitt R. and Latham D. (1991). The measurement of trace emissions and combustion characteristics for a mass fire, in Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications, J. Levine, Editor. MIT Press: Massachusetts. p. 245-257.
68. Turetsky, M. and Wieder, R. (2001). A direct approach to quantifying organic matter lost as a result of peatland wildfire. *Canadian Journal of Forest Research*, **31**(2): p. 363-366.
69. Van Wagner, C. (1972). Duff consumption by fire in eastern pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, **2**: p. 34-39.
70. van Wilgen, B., Le Maitre, D. and Kruger, F. (1985). Fire behaviour in South African fynbos (macchia) vegetation and predictions from Rothermel's fire model. *Journal of Applied Ecology*, **22**: p. 207-216.
71. Vose, J. and Swank, W. (1993). Site preparation burning to improve southern Appalachian pine-hardwood stands: above-ground biomass, forest floor mass, and nitrogen and carbon pools. *Canadian Journal of Forest Research*, **23**: p. 2255-2262.
72. Walker, J. (1981). Fuel dynamics in Australian vegetation, in Fire and the Australian Biota, A. Gill, R. Groves, e I. Noble, Editors. Australian Academy of Science: Canberra. p. 101-127.
73. Ward, D., Susott, R., Kauffman, J., et al. (1992). Smoke and fire characteristics for Cerrado and deforestation burns in Brazil: BASE-B Experiment. *Journal of Geophysical Research*, **97**(D13): p. 14601-14619.