

Fonseca, William; Herrera, Jorge; Alice, Federico
Desafíos nacionales en materia de métricas de cara a la meta costarricense de alcanzar
la carbono-neutralidad en el 2021
Revista de Ciencias Ambientales, vol. 47, núm. 1, enero-junio, 2014, pp. 16-31
Universidad Nacional
Heredia, Costa Rica

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=665070680002>



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES

Tropical Journal of Environmental Sciences



Desafíos nacionales en materia de métricas de cara a la meta costarricense de alcanzar la carbono-neutralidad en el 2021

National metric challenges facing the Costa Rican goal of achieving carbon - neutrality by 2021

William Fonseca ^a, Jorge Herrera ^b y Federico Alice

^a Ingeniero forestal, director de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, wfonseca@una.ac.cr. ^b Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, jorge.herrera.murillo@una.cr. ^c Ingeniero forestal e investigador de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, Costa Rica, dr.tiza@gmail.com.

Director y Editor:

Dr. Eduardo Mora-Castellanos

Consejo Editorial:

Enrique Lahmann, UICN, Suiza

Enrique Leff, UNAM, México

Sergio Molina, Universidad Nacional, Costa Rica

Olman Segura, Universidad Nacional, Costa Rica

Rodrigo Zeledón, Universidad de Costa Rica

Gerardo Budowski, Universidad para la Paz, Costa Rica

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas



Desafíos nacionales en materia de métricas de cara a la meta costarricense de alcanzar la carbono-neutralidad en el 2021

William Fonseca, Jorge Herrera y Federico Alice

W. Fonseca, ingeniero forestal especialista en cambio global y desarrollo sostenible, es director de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional (wfonseca@una.cr).

J. Herrera, especialista en química y física de la atmósfera, es coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales (Universidad Nacional) y subdirector de esta (jorge.herrera.murillo@una.cr).

F. Alice, ingeniero forestal especialista en manejo de carbono, es investigador en la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional (federico.alice.guier@una.cr).

Resumen

Se analiza las debilidades en materia de métrica, que enfrenta la iniciativa de carbono-neutralidad propuesta por el gobierno costarricense, y se visualizan las correcciones técnicas que serían necesarias para alcanzar una mayor comparabilidad, confiabilidad y aplicabilidad de los resultados obtenidos. Los vacíos técnicos se presentan no únicamente en la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también en el cálculo de la capacidad de fijación y almacenamiento, donde se utiliza información mundial sobre índices de biomasa y carbono, usualmente aportada por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, con lo cual se hace referencia

Abstract

This paper analyzes weaknesses faced by the carbon neutrality initiative proposed by the Costa Rican government due to metrics and highlights some of the technical improvements that will be required in order to achieve greater comparability, applicability and confidence from the results obtained. Technical gaps are found not only in the assessment of greenhouse gas emissions but when accounting for biogenic carbon capture and storage, where global reference values, usually those reported by the IPCC, are commonly used. We then make reference to problems associated with their use, mainly related to the uncertainty (accuracy

Introducción

El cambio climático es hoy uno de los desafíos más grandes a los que se enfrenta la humanidad. Es causado en mayor medida por el incremento en la emisión y la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, principalmente de CO₂ proveniente de la quema de combustibles fósiles (carbón, gas y petróleo) y procesos industriales (65% de las emisiones, $\pm 5\%$), así como del cambio de uso de suelo (11%, $\pm 50\%$; IPCC, 2014a). Este aumento en la concentración de gases ha ocasionado severos impactos en el clima, con afectaciones a los sistemas sociales, productivos y económicos (IPCC, 2014b). Los impactos van desde sequías, inundaciones, alteración del ciclo hidrológico, eventos hidrometeorológicos extremos cada vez más frecuentes, aumento del nivel del mar, derretimiento de glaciares, extinción de especies

a los problemas asociados con su uso, principalmente a la incertidumbre (precisión y/o exactitud) que se genera en las estimaciones. En el nivel nacional se alude a la ausencia o escasa información sobre biomasa y carbono para algunos ecosistemas, y a la falta de estudios completos referentes a biomasa vegetal en el ecosistema, con lo que se brinda ejemplos sobre algunas de las especies más estudiadas. Por último, se hace un contraste de los resultados obtenidos, a partir de indicadores comúnmente utilizados contra la información generada nacionalmente.

Palabras clave: biomasa, carbono-neutralidad, emisiones de gases de efecto invernadero, captura y fijación de carbono, métricas.

and precision) that results from any estimate. At the national level there is a lack of information for biomass and carbon for some ecosystems as well as few complete studies that consider all carbon pools at the ecosystem level. We give examples for some of the most studied species. Finally, we compare results using global reference values against those developed from local studies at the national level.

Keywords: biomass, biogenic carbon capture and storage, carbon neutrality, metric, emissions of greenhouse gases.

animales y vegetales, así como innumerables pérdidas humanas (IPCC, 2014b).

Ante esta realidad, en el 2006 y a través de la Iniciativa Paz con la Naturaleza, se contempla el cambio climático como una de las áreas prioritarias de acción en materia ambiental, tanto en la agenda de política interna como en la externa, suscribiendo el compromiso de convertir a Costa Rica en un país carbono-neutral para el 2021. Dicho compromiso fue retomado en el eje de mitigación de la Estrategia Nacional de Cambio Climático aprobada en el 2009, con el fin de procurar que el país evite las emisiones netas de gases de efecto invernadero y adopte una visión que compagine las acciones ambientales, económicas y sociales con la estrategia de competitividad nacional (MINAET, 2009).

En los últimos años, el país ha venido realizando esfuerzos importantes en la consecución de esta meta, principalmente a través de la promulgación del acuerdo 36-2012 “Programa País Carbono-Neutralidad”, la norma INTE 12-01-06-2011 y el Decreto n.º 37926-MINAE sobre el “Reglamento de

Regulación y Operación del Mercado Doméstico de Carbono” (Costa Rica, 2012; INTECO, 2011; Costa Rica, 2013a). Estos instrumentos establecen las condiciones bajo las cuales una organización o empresa debe cuantificar y reportar sus emisiones, así como optar por la obtención de un certificado de carbono-neutralidad por parte del Ministerio de Ambiente y Energía. Según



Alfredo Huerta. Transporte emisor de dióxido de carbono, San José.

lo establece la norma 12-01-06-2011, la condición de carbono-neutralidad se logra cuando, a través de un proceso transparente de medición de las emisiones (e), el resultado neto de las emisiones menos las reducciones y/o remociones internas (r), menos la compensación (c) debe ser igual a cero, expresado de acuerdo con la siguiente ecuación:



Alfredo Huerta. Industria emisora de dióxido de carbono, San José.

$$e_{(i-1)} - r_{(i)} - c_{(i)} = 0 \quad (1)$$

donde “i” es el año o período del inventario.

Bajo este modelo, las organizaciones estiman sus inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero con un enfoque de control operacional, siguiendo las disposiciones del Protocolo de Gases de Efecto Invernadero: “Estándar Corporativo de contabilidad y reporte” del World Resources Institute (WRI) o la norma ISO 14064-1:2006 (Costa Rica, 2012; INTECO, 2011). Las emisiones por considerar en este inventario deben provenir de una adecuada identificación de fuentes, sumideros y reservorios de la organización, los cuales deberán ser evaluados a través de una metodología que permita estimar, en forma confiable, el aporte de cada una de las emisiones netas de la organización.

El reporte de emisiones que se genera bajo el formato seleccionado deberá ser verificado por organismos acreditados por el Ente Costarricense de Acreditación (ECA), con la norma ISO 14065, los cuales, además de cumplir lo establecido en la norma ISO 14064-3, deberán considerar durante el procedimiento de verificación que el nivel de aseguramiento en estos procesos sea razonable, con un

umbral de significancia de un 5%, de acuerdo con lo solicitado por el Programa País (Costa Rica, 2012).

Para diversos ámbitos de la economía como la industria, los sectores de energía y de transporte, actividades agropecuarias y el manejo de bosques, la integración de inventarios de emisiones ha permitido ampliar sus políticas. Por ejemplo, estos inventarios se aplican en diversos ejercicios de investigación científica y planeación ambiental, como lo es la modelación, el diseño de estrategias y programas de gestión, el análisis de tendencias, el cumplimiento de compromisos internacionales y la eventual comercialización de créditos de carbono. Todas estas aplicaciones requerirán inventarios de emisiones de creciente calidad, con mayor detalle y accesibilidad de los datos. Como ventajas, la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero permiten diagnosticar, clasificar y medir cuantitativamente las fuentes que contribuyen en mayor proporción a la generación de emisiones, realizar un seguimiento de los niveles de emisión en el tiempo y revisar el cumplimiento con las normas vigentes establecidas (Rypdal y Winiwarer, 2001).

El funcionamiento del modelo costarricense de carbono-neutralidad enfrenta retos importantes en materia de la métrica asociada, no solo en los procesos de estimación de las emisiones generadas en cada una de las fuentes incluidas en los límites operativos de las organizaciones, sino además en la determinación de las remociones de gases de efecto invernadero asociadas a sumideros y reservorios en proyectos de reducción y/o compensación.

Adicionalmente, a escala nacional, los inventarios sirven para comprobar el cumplimiento de compromisos, por parte de los distintos países, ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC; Somogyi et al., 2008), con lo cual adquieren mayor relevancia en países en desarrollo, ante la posibilidad de compromisos legalmente vinculantes de reducción de emisiones después del 2020 (Streck et al., 2012). Al mismo tiempo, la posibilidad de implementar mecanismos sectoriales de incentivos basados en resultados, como las “Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación” (NAMAs) y los “Enfoques de política e incentivos positivos para las cuestiones relativas a la reducción de las emisiones debidas a la deforestación y la degradación forestal en los países en desarrollo...” (REDD+), aumenta aún más la necesidad de mejorar los inventarios, ya que ambos mecanismos están sujetos al establecimiento de sistemas apropiados de monitoreo, reporte y verificación (MRV). Por último, será necesario que, en adelante, se presenten reportes de actualización ante la CMNUCC, de manera bianual (UNFCCC, 2012), con lo que se aumenta la presión sobre aquellos responsables de desarrollar los inventarios nacionales de GEI.

Aparte del reto que esto representa en términos del alcance y de la frecuencia con que se realizan los inventarios, es también evidencia de la necesidad de mejorar su calidad. Esto debido a varias razones: la importancia de reducir la incertidumbre en cuanto al impacto real de las actividades humanas sobre el clima; el reconocimiento de que si los datos utilizados para derivar estrategias de control son defectuosos, la política

pública resultante puede ser equivocada (Braatz y Doorn, 2003), y —quizás un poco más inmediato— el hecho de que incentivos basados en resultados, inevitablemente, se verán influenciados positiva o negativamente por la forma en cómo estos son medidos.

Dado lo anterior, el propósito del trabajo del que en este artículo se da cuenta fue aclarar conceptos y hacer evidente la necesidad de generar métricas nacionales para mejorar la confiabilidad de los inventarios.

Retos en materia de la métrica asociada a la estimación de emisiones de GEI

Emisiones reales o potenciales

En los inventarios, las emisiones pueden ser estimadas como tasas reales o potenciales de emisión. Las reales reflejan el mejor cálculo de la verdadera masa emitida a la atmósfera durante un periodo, mientras que las emisiones potenciales son estimaciones de la tasa máxima de liberación que puede alcanzar una fuente durante un periodo, bajo la adopción de dos supuestos: 1) que en caso de existir equipos de control estos funcionan adecuadamente, tratando el porcentaje total de la corriente gaseosa designado, y 2) que tales equipos trabajan a su máximo rendimiento.

Tanto las emisiones reales como las potenciales son importantes, sin embargo, por lo general, en la reglamentación de cada país se debe definir cuál de los dos tipos de emisiones es el más deseable. En el modelo nacional de carbono-neutralidad, no existe una indicación clara de la naturaleza de las estimaciones que se están generando (reales o potenciales), con lo cual se corre el peligro de estar mezclando estos dos enfoques y dando pie a inconsistencias en el nivel de métrica, que afecta la comparabilidad de los datos.

Metodologías para la estimación de las emisiones

El desarrollo de un inventario de emisiones requiere una combinación de enfoques. En este sentido, no existe un método único que pueda usarse para estimar los aportes de todas las fuentes, sumideros y reservorios. La selección de los métodos para cuantificar emisiones debe considerarse como punto de partida los costos del inventario en relación con la calidad e incertidumbre de los resultados deseados, los cuales a su vez estarán determinados por los propósitos previamente establecidos (fig. 1).

Se pueden emplear seis técnicas diferentes para la determinación de las emisiones.

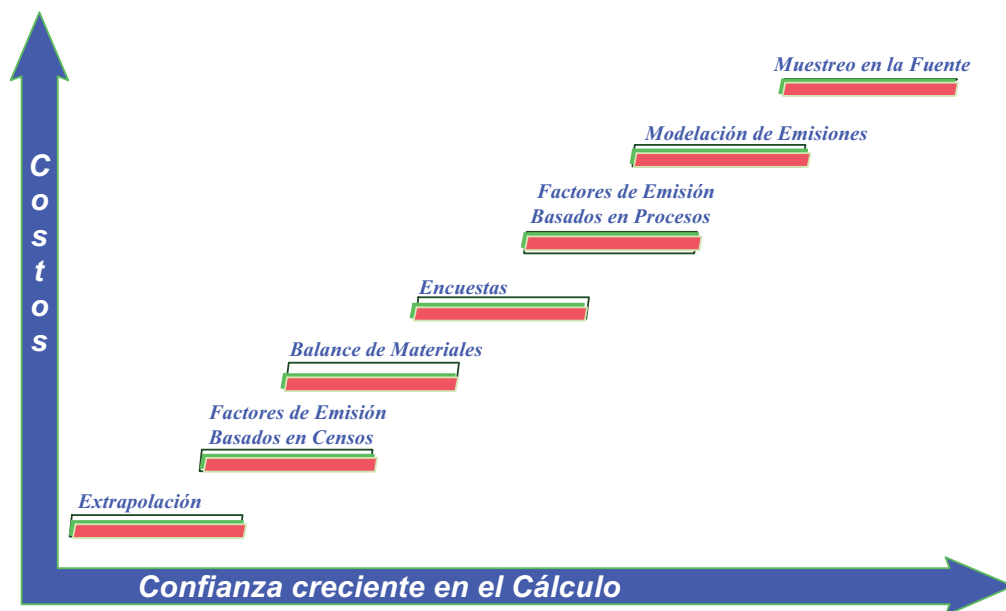
Muestreo en fuente. Su propósito es determinar la concentración del GEI en una corriente de gas o su tasa de emisión de una chimenea o del escape de un proceso. Midiendo la concentración del GEI en un volumen conocido de gas y determinando la tasa de flujo del gas en una chimenea, es posible calcular la tasa de emisión en masa del GEI.

Los muestreos en la fuente se integran con mediciones de corto plazo que, por lo general, se realizan en periodos de una a cuatro horas. Para coleccionar una muestra representativa, deben hacerse al menos dos muestreos en una chimenea o en un escape para cada GEI de interés, bajo condiciones normales de operación. Las variaciones en la operación del proceso durante el muestreo pueden añadir un alto grado de variabilidad en los datos de muestreo. Por lo tanto, los parámetros clave de la

operación de un proceso, que pueden afectar las emisiones de contaminantes de la fuente, también deben ser monitoreados durante la toma de muestra (INE, 2005).

Modelos de emisión. Para ciertas categorías de fuente, se pueden establecer relaciones funcionales entre las emisiones, los procesos múltiples y las variables ambientales, con el afán de dar lugar a modelos matemáticos complejos. Si estos modelos de emisión requieren cálculos complejos o grandes volúmenes de datos para alimentarlos, es probable que se apoyen en programas de cómputo. Si bien los modelos están diseñados para producir estimaciones más exactas que las obtenidas con factores de emisión, la exactitud de la estimación siempre dependerá de la calidad de los datos con que se alimente el modelo y de los supuestos en que se base. Por lo tanto, antes de decidir utilizar un modelo como la alternativa para un tipo específico de fuente, es importante comparar las necesidades del modelo de emisión con los datos disponibles. En este sentido, los requisitos

Figura 1. Relación entre el costo, el grado de confianza y las diversas técnicas existentes para el cálculo de emisiones en los inventarios de GEI –tomada de INE, 2005–.



de información son variables, por lo que, para estimar emisiones puede requerirse uno o varios parámetros físicos de la fuente para la cual se usará el modelo (Dickson y Oliver, 1991).

Factores de emisión. Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de GEI emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. Los factores de emisión, en general, se pueden clasificar en dos tipos: los basados en procesos y los basados en censos. Habitualmente, los primeros se utilizan para estimar emisiones de fuentes puntuales y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados en encuestas o en balances de materiales. Por otro lado, los factores de emisión basados en censos se usan generalmente para estimar emisiones de fuentes de área (Espinoza et al., 1996).

Los factores de emisión deben tener asociado un indicador de confiabilidad, el cual está íntimamente relacionado con el proceso utilizado en su construcción y cuya contribución a la incertidumbre debe ser tomada en cuenta a la hora de calcular las emisiones. De esta forma, se debe dar preferencia al uso de factores nacionales de emisión, los cuales se basan en “promedios nacionales” calculados a partir de una amplia gama de evaluaciones en la fuente, así como de estimaciones nacionales de consumos. Las emisiones reales pueden diferir considerablemente de los valores que se calculan usando factores nacionales de emisión, debido a las diferencias geográficas. Por otra parte, los factores internacionales de emisión (por ejemplo, los derivados del IPCC) pueden usarse cuando: no existen factores locales de emisión, la mezcla local de fuentes individuales en la categoría es semejante a las condiciones reportadas para el factor internacional y la categoría de la fuente es de baja prioridad para el inventario (USEPA, 2007).

Encuestas. La encuesta (o cuestionario) a establecimientos industriales o comerciales es utilizada como un método para recabar los datos

básicos necesarios en la estimación de emisiones de una o varias fuentes puntuales. Generalmente, dicha estimación de emisiones se realiza mediante la aplicación de factores de emisiones promedio o ponderadas, de acuerdo con la información levantada en la encuesta o el cuestionario. Con este fin, el cuestionario debe enviarse a cada planta o establecimiento, con la solicitud de información acerca de las características de cada uno de los procesos y puntos de emisión de contaminantes. El método de encuesta también se puede usar para reunir la información necesaria para calcular las emisiones de fuentes de área. De igual manera, este método puede dar lugar al desarrollo de factores de emisión específicos para una región, que sirvan para hacer ciertas estimaciones de emisiones de fuentes de área (INE, 2005).

El balance de materiales. Es un método utilizado para estimar las emisiones de algunas categorías de fuentes, en donde se conoce el volumen y la composición química de los insumos o materias primas utilizadas. Este método puede usarse en los casos en que no hay datos disponibles de muestreos en la fuente o factores de emisión aplicables. El uso de un balance de materiales implica el análisis de un proceso, para determinar si las emisiones pueden ser estimadas conociendo únicamente los parámetros específicos de operación y la composición de los materiales. El uso del balance de materiales es muy adecuado en los casos en que pueden conocerse los componentes del proceso, excepto las emisiones al aire (SEMAR-NAT, 2001).

Extrapolación. Las técnicas de extrapolación pueden usarse para calcular emisiones indirectamente y para verificar las dimensiones, en órdenes de magnitud, de las estimaciones de emisiones calculadas con otros métodos. En general, la extrapolación de emisiones de una región geográfica u organización a otra se considera como



Luis D. Marín. Bosque primario fijador de carbono, Nicaragua.

el enfoque menos deseable para la estimación de emisiones, debido a que este puede no tomar en cuenta, de manera apropiada, diferencias importantes entre dos regiones u organizaciones y puede propagar los sesgos de un inventario a otro. Sin embargo, cuando se combina con un marco de modelación, la extrapolación es un enfoque práctico y costo-efectivo, que desarrolla estimaciones de emisiones en aquellas regiones u organizaciones en las que la información no es suficiente para el uso de metodologías de estimación más rigurosas.

Incertidumbre en el cálculo de emisiones

El programa nacional de reporte de emisiones descrito en el acuerdo País C-Neutralidad no establece un lineamiento orientado a determinar el valor máximo de incertidumbre de los inventarios que se le presentan; de hecho, casi ninguno de los inventarios elaborados en el país cuenta con una memoria de cálculo que respalde el valor de incertidumbre declarado en estos. Al no regular el nivel máximo de incertidumbre requerido para los inventarios, se está dejando a la libre la posibilidad de utilizar casi cualquier técnica para

el cálculo de las emisiones, lo que afecta directamente la calidad de los datos y la misma intercomparabilidad de los inventarios.

La incertidumbre de una medición se puede definir como el intervalo de datos razonables, en el cual se encuentra el valor considerado como verdadero de la cantidad de medida. Un resultado expresado únicamente como un dato no tiene sentido, si no viene

acompañado de un segundo término que define un intervalo de incertidumbre. La determinación de este intervalo depende de múltiples factores que incluyen los equipos utilizados, su calibración y la forma de uso. Por ello, la evaluación de la incertidumbre de una medida requiere el establecimiento de un modelo del proceso de medida para definir las magnitudes utilizadas, estimar sus incertidumbres y componerlas según reglas definidas.

En esta materia, no se debe dejar de lado el hecho de que, como cualquier medición, un inventario de emisiones debe tener una estimación de incertidumbre asociada, que de forma directa caracterice el grado de confiabilidad de los resultados como criterio para determinar los usos posibles de estos instrumentos. Resulta contraproducente el uso de inventarios de emisiones con niveles de incertidumbre mayores al 50%, para la toma de decisiones o en el desarrollo de proyectos de emisiones donde se requiera demostrar adicionalidad.

Lineamientos para la definición de límites operativos

Un elemento importante por considerar es el hecho de que durante la realización de los inventarios de emisiones de GEI se deben incluir todas las emisiones directas (alcance I), las indirectas por energía (alcance II) y, en forma opcional, otro tipo de emisiones indirectas (alcance III; Costa Rica, 2012; INTECO, 2011). Sin em-

bargo, existen algunas fuentes particulares de emisiones como aquellas generadas por la disposición final de residuos, las cuales deben ser minuciosamente analizadas porque pudieran estar doblemente contabilizadas, al ser consideradas tanto en forma voluntaria por la organización como en forma directa por parte del operador de los sitios de disposición final.

En virtud de lo anterior, se requiere un análisis de criterios adicionales a las disposiciones de las metodologías, para evitar el traslape de condiciones frontera que lleven al programa nacional de reporte de emisiones a fomentar la doble contabilidad.

Sector forestal y uso del suelo en los inventarios de GEI

Es reconocida la influencia de los ecosistemas forestales en el ciclo global del carbono, al actuar como sumideros de alrededor de un 28% de las emisiones antropogénicas durante el periodo 2002-2011 (Bonan, 2008; Heimann y Reichste, 2008; Le Quéré et al., 2012). Sin embargo, en el nivel global, el sector forestal representa el 12,5% de las emisiones globales de carbono,



Luis D. Marín. Bosque primario fijador de carbono, Nicaragua.

principalmente debido a la deforestación y la degradación de bosques tropicales (Houghton et al., 2012; Le Quéré et al., 2012). Por lo tanto, la reducción de la deforestación es una de las principales medidas de mitigación del cambio climático, con una contribución cercana a 3 Gt C año⁻¹, según Canadell y Raupach (2008), o a 2,4 Gt C año⁻¹, según Pan et al. (2011).

A pesar de la importancia de estos ecosistemas como sumideros y del potencial del sector forestal para evitar emisiones de carbono, se reconoce también la gran incertidumbre en la estimación de tasas de deforestación e incremento en la cobertura, así como de la incertidumbre sobre las densidades de carbono en estos ecosistemas (Houghton et al., 2012). Esto, principalmente, en regiones tropicales donde ocurren la mayoría de los cambios en la cobertura (deforestación e incremento) y en donde los ecosistemas son más complejos y así también la determinación de las densidades de carbono (Pan et al., 2011).

Con estimaciones en el nivel global, Petrescu et al. (2012) muestran cómo las diferencias en la clasificación de tierras (datos de actividad) y

Cuadro 1. Fracción de carbono (%) en la biomasa de las plantaciones forestales y del bosque secundario.

Especie	Estadístico	Follaje	Ramas	Fuste	Raíz	Hierbas	Necromasa	
							Gruesa	Fina
Bosque secundario (Fonseca, 2009)	X	44,63	47,09	47,63	47,12	43,46	50,28	41,06
	E (%)	1,15	1,15	1,33	1,49	1,37	2,07	2,03
	n	161	159	161	161	49	38	40
<i>V. guatemalensis</i> (Fonseca, 2009)	X	42,95	46,46	48,11	48,63	44,64	48,51	38,50
	E (%)	2,16	2,67	2,28	1,97	1,79	2,97	2,50
	n	59	59	59	59	68	41	44
<i>Hieronyma alchorneoides</i> (Fonseca, 2009)	X	45,94	47,65	49,67	49,24	43,99	46,98	42,79
	E (%)	2,67	4,37	1,96	1,83	2,03	2,03	2,08
	n	61	60	61	58	72	45	51
<i>C. lusitanica</i> (Rojas, 2012)	X	51,3	47,1	34,6	49,4	42	50,1	43,3
	E (%)	2,6	2,8	6,5	4,9	12,4	8,3	13,1
	n	16	20	18	7	4	6	4
<i>Pinus sp.</i> (Rojas, 2012)	X	49,2	48,8	45	48	43,7	48,7	45,5
	E (%)	3	2,3	3,1	3,5	4,9	2,2	2,2
	n	21	18	25	12	12	15	16
<i>Alnus acuminata</i> (Ruíz, 2011)	X	37,0	41,9	44,4	41,2	37,7	46,7	32,9
	E (%)	4,3	2,7	2,8	3,6	4,8	3,7	9,4
	n	12	29	13	8	21	15	18

X= promedio, E (%)= error de muestreo calculado al 95% de confianza, n= tamaño de la muestra, n para las fracciones de necromasa es inferior al número de parcelas muestreadas porque en algunas de ellas no existía.

el uso de factores por defecto recomendados en las guías del IPCC, para inventarios de carbono en el sector forestal (2003 y 2006), resultan en diferencias de hasta un 40% en los estimados. Así, se aporta evidencia sobre cómo las extrapolaciones, por falta de estudios específicos de sitio y en algunos casos de especies, contribuyen en la incertidumbre de los estimados de carbono en ecosistemas forestales (Canadell y Raupach, 2008; Ito et al., 2008; IPCC, 2007).

Debido a la falta de estudios específicos de sitio y especies para generar factores locales, el método común es la utilización de modelos o valores genéricos reportados por el IPCC, pero existen grandes cuestionamientos sobre la precisión y/o exactitud de sus resultados (Clark y Kellner, 2012). En algunos casos, como en el uso de modelos globales, se reconoce que las estimaciones pueden ser más confiables incluso que aquellas generadas con información local (Chave et al., 2005), pero esto solo en casos en donde el tamaño

y la representatividad de las muestras utilizadas para generar los modelos no son lo suficientemente confiables (Chave et al., 2004; Sarmiento et al., 2005). Sin embargo, se ha demostrado, también, que cuando se cumple con esta condición (i. e., alto número de muestras representativas de una comunidad), pueden ocurrir grandes variaciones por la aplicación de factores o modelos globales (Fonseca et al., 2011ab).

En el nivel nacional existe poca información sobre acumulación de biomasa y de carbono en ecosistemas forestales de bosque seco y bosque de altura. El bosque húmedo (primario y secundario) ha sido más estudiado (Segura, 1997, 1999; Ortiz, 1997; Corrales, 1998; Fonseca, 2006; Fonseca et al., 2008, 2009, 2010, 2011ab), pero la mayoría de investigaciones se refiere a sitios muy específicos (en el nivel de finca) y generalmente se ha estudiado la biomasa y/o el carbono en solo una parte de la biomasa, es decir, no se evalúa el ecosistema.

Las plantaciones forestales no están exentas de la falta de información. Las especies más utilizadas en reforestación (*Tectona grandis*, *Gmelima arborea*, *Bombacopsis quinata*, *Terminalia amazonia*, *Vochysia guatemalensis*, *Hieronyma alchorneoides*) han sido más estudiadas (Cubero y Rojas, 1999; Pérez y Kanninen, 2002, 2003; Montero y Montagnini, 2006; Montero y Kanninen, 2002, 2006; Redondo, 2007; Fonseca et al. 2008, 2009, 2010, 2011b), de las cuales en la mayoría se evaluaron la biomasa y/o el carbono en fustes. Algunas especies establecidas en plantación o en sistemas agroforestales y silvopastoriles (e. g. *Cupressus lusitanica*, *Alnus acuminata*, *Pinus* sp., *Vochysia ferruginea*, *Eucalyptus* sp., *Cordia alliodora*) tienen una situación más crítica. En igual o peor condición están aquellas utilizadas en bosques urbanos.

Muchos esfuerzos se han desarrollado para generar mayor investigación e información, pero siguen siendo insuficientes para la estimación precisa que permita la administración de financiamiento basado en resultados (Goetz et al., 2010). Indudablemente, esta realidad es crítica en países con bosque tropical en donde la medición es aún más compleja, especialmente si se pretenden considerar en las mediciones componentes distintos de la biomasa aérea, para los cuales existe menor cantidad de información.

Algunos esfuerzos en Costa Rica

En esta sección contrastaremos resultados obtenidos con métricas logradas en el nivel local contra las reconocidas por el IPCC y las dadas para otras latitudes. Las formas comúnmente utilizadas para estimar el carbono almacenado en ecosistemas forestales son a través de factores de expansión de biomasa o de ecuaciones alométricas. Por ello, algunos de los valores de referencia más utilizados se refieren precisamente a un factor de expansión de biomasa (FEB; i. e. la relación entre el fuste y la biomasa en ramas y hojas), la relación raíz/tallo o raíz/biomasa aérea total (Br/

Bat), aquellas utilizadas para transformar volumen de madera en biomasa seca (i. e. densidad específica de la madera) y el valor utilizado para transformar biomasa en carbono (i. e. fracción de carbono; FC). De la misma manera, existen modelos alométricos que se han desarrollado para todos los bosques tropicales del mundo y son ampliamente utilizados.

La FC recomendada por el IPCC en las Guías del 2006 es 0,47, con variaciones de entre 0,44 y 0,49, sin embargo, debido a procesos de negociación bajo la CMNUCC, el valor reportado en las Guías del IPCC 2003 (0,5 con variaciones entre 0,45 y 0,50) continúa siendo ampliamente utilizado¹ (Brown et al., 1986; Ortiz, 1997; Husch, 2001; Redondo, 2007). En cuanto al FEB, el valor de referencia reportado por el IPCC (2006) para bosques tropicales corresponde a 1,6, pero, debido a la posibilidad de utilizar valores locales, el inventario nacional de GEI de Costa Rica para el 2005, utiliza, indistintamente de la especie, el sitio o el tipo de ecosistema, un FEB de 1,75 para adicionar al fuste el carbono contenido en las hojas y ramas (Chacón et al. 2009). Finalmente, para estimar el carbono en la raíz, el IPCC (2006) brinda valores de referencia para bosques tropicales de la relación raíz/tallo, en un rango de 20% a 57%, pero este último compartimento difícilmente es considerado en los inventarios de carbono.

Para explicar la magnitud de esta incertidumbre, se expone información generada localmente (cuadros 1 y 2) que representa tan solo un ejemplo de lo que se debe construir para cada especie y ecosistema a través de investigación. En el cuadro 3 se muestran los estimados de biomasa y carbono con datos locales y los obtenidos a través

1 Esto debido a la necesidad de mantener consistencia en la aplicación de métodos en los inventarios que se realizan en un mismo periodo de compromiso. No es hasta el segundo periodo de compromiso del Protocolo de Kioto que se acuerda que los países Anexo I reporten utilizando las Guías del IPCC de 2006. Aún así, esto no es compulsorio para países no Anexo I, por lo que la consideración de los valores de referencia de las Guías del 2003 continúa siendo válida en este contexto.

Cuadro 2. Factores de expansión de la biomasa (FEB) y relaciones biomasa radical (Bra)-biomasa aérea total (Bat) y biomasa radical-biomasa del fuste (Bf) para las especies en bosque secundario y especies nativas en plantación.

Tipo de bosque	Estadístico	FEB= Btotal/Bfuste	Braíz/Baérea total	Braíz/Bfuste
Bosque secundario	X	1,44	0,25	0,37
	E (%)	3,84	8,29	10,37
	n	139	139	139
<i>V. guatemalensis</i>	X	1,56	0,26	0,39
	E (%)	12,68	21,16	18,16
	n	54	45	45
<i>H. alchorneoides</i>	X	1,57	0,30	0,52
	E (%)	7,03	11,77	15,57
	n	58	42	42
<i>Cupressus lusitanica</i>	X	1,7	0,10	0,15
	E (%)	6,6	22,3	32,8
	n	48	10	10
<i>Pinus sp.</i>	X	1,4	0,10	0,13
	E (%)	6,5	10,4	12,9
	n	63	23	23
<i>Alnus acuminata</i>	X	1,43	0,18	0,22
	E (%)	3,33	8,42	8,46
	n	47	47	47

X= promedio, E (%)= error de muestreo calculado al 95% de confianza, n= tamaño de la muestra.

Cuadro 3. Carbono por árbol (kg) estimado a partir de valores locales producto de investigación y con fracciones de carbono de las Guías del 2003 del IPCC (FC= 0,5 y 0,45).

Especie	Variable	Componente				Necromasa (Mg ha ⁻¹)	Hierbas (Mg ha ⁻¹)
		Follaje	Ramas	Fuste	Raíz		
<i>V. guatemalensis</i> dap=40,5 cm (Fonseca, 2009)	Biomasa	24,56	254,98	478,88	98,56	0-13,7	0,25-3,8
	C con datos de proyecto	10,55	118,46	230,39	47,93	5,96	0,11-1,7
	C con FC= 0,5	12,28	127,49	239,44	49,28	6,85	0,13-1,9
	Diferencia (%)	14,09	7,08	3,78	2,74	13,0	15,4-10,5
	C con FC= 0,45	11,05	114,74	215,50	44,35	6,17	0,11-1,71
	Diferencia (%)	4,52	-3,24	6,91	-8,07	3,4	0,0-0,0
<i>A. acuminata</i> dap=41,6 cm (Ruíz, 2012)	Biomasa	22,08	151,34	620,62	130,60	0,43-34,0	0,7-7,14
	C con datos de proyecto	8,17	64,41	275,56	53,8	0,17-13,53	0,26-2,69
	C con FC= 0,5	11,04	75,67	310,31	65,3	0,22-17,0	0,35-3,57
	Diferencia (%)	26,0	14,88	11,20	17,61	22,7-20,4	25,7-24,6
	C con FC= 0,45	9,94	68,10	279,30	58,77	0,19-15,3	0,32-3,21
	Diferencia (%)	17,77	5,42	1,33	8,46	10,5-11,57	18,8-16,2

Cuadro 4. Biomasa por árbol estimada con factores de expansión por especie y con el valor utilizado en el inventario nacional de GEI (Chacón et al., 2009). FEB = 1,44; 1,56; 1,57; 1,46, para especies en bosque secundario, *V. guatemalensis*, *H. alchorneoides* y *A. acuminata*, respectivamente.

Especie	Biomasa del fuste (kg)	Biomasa calculada con FEB Por especie	1,75	Diferencia (%)
<i>Pentaclethra macroloba</i> dap= 23,4 cm	120,57	173,62	211,0	17,72
<i>Vochysia guatemalensis</i> dap= 40,5 cm	478,88	747,05	838,04	10,86
<i>Hyeronima alchorneoides</i> dap = 28,8 cm	223,73	351,26	391,53	10,29
<i>Alnus acuminata</i> dap= 41,6 cm	275,56	402,32	487,48	17,47

de información de las Guías del IPCC o aquella que es comúnmente utilizada. En primera instancia, se resalta que una buena parte de los estudios en el nivel mundial solo evalúa la biomasa y/o el carbono en el componente leñoso aéreo (fuste y ramas), y principalmente en el fuste. Esto por ser en donde se encuentra el mayor stock, se presentan los mayores cambios de un periodo a otro, y por ser el que tiene carbono más duradero.

Del cuadro 1 se deduce que la fracción de carbono varía entre los distintos componentes de la biomasa (es mayor en la biomasa más lignificada) y fue estimada con errores de muestreo muy aceptables ($E\% < 10,0$). La FC de los componentes leñosos está cercana al valor de referencia del IPCC (2003; 0,45-0,50) para toda la biomasa en climas tropicales. Igual sucede con los factores de expansión de biomasa (cuadro 2), en donde estos varían de acuerdo con la especie, fueron estimados con bastante precisión ($E\% < 10,0$) y están un poco distantes de lo utilizado en el inventario nacional de GEI (FEB=1,75, solo para la biomasa aérea).

En el cuadro 3 se muestran las diferencias (sub o sobre estimaciones) que generan inexactitud en los estimados, los cuales conllevan una pobre valoración del verdadero aporte del sector forestal para combatir el cambio climático. Al calcular el carbono con la FC de 0,5, se generan sobreestimaciones que superan el 3% (raíz de *V. guatemalensis*) con valores tan altos de hasta 26% (hojas de

A. acuminata). Para *V. guatemalensis*, la sobreestimación por árbol es 21,2 kg de carbono (77,7 kg de CO_2) y en *A. acuminata* es 60,4 kg (221,6 kg de CO_2). Aun estimando carbono con una FC de 0,45 (valor recomendado para no sobreestimar), en la mayoría de los casos se generan sobreestimaciones (*A. acuminata*) y en algunos componentes subestimaciones (ramas y raíz de *V. guatemalensis*).

El uso de FEB reportado en la literatura también genera errores en las estimaciones. Por ejemplo, el FEB promedio para 35 especies de bosque secundario calculado en Costa Rica fue 1,44 y 1,56; 1,57; 1,46, para *V. guatemalensis*, *H. alchorneoides* y *A. acuminata*, respectivamente (cuadro 2). En estos FEB se incluye la raíz y, aun así, están muy por debajo del valor de 1,75 utilizado en el inventario nacional de GEI o el empleado en estimaciones realizadas como parte de la estrategia REDD+ de Costa Rica (FEB=1,6). El valor usado en el inventario nacional de GEI sobreestima la biomasa en más del 10% (cuadro 4) y corresponde a un ejemplo, en donde un valor de una investigación específica de sitio y especies se emplea para extrapolar valores a escala nacional, sin resolver problemas de incertidumbre del inventario.

El alto grado de dificultad y costo que conlleva la determinación de la biomasa de la raíz (Fonseca, 2009; Husch, 2001; Schlegel, 2001; Sierra et al., 2001) ha generalizado el uso de valores de referencia en los inventarios de carbono.

En el nivel mundial se reportan valores muy variados, según Dixon (1995) esta relación oscila entre 0,03 y 0,5 y, como se mencionó anteriormente, el IPCC (2006) reporta un rango de 0,20 a 0,57. MacDicken (1997) cita entre 10% y 40% de la biomasa aérea y recomienda utilizar entre 10% y 15% para no sobreestimar. Al utilizar un valor de 15% para estimar la biomasa se genera una subestimación, ya que la relación para muchas especies (cuadro 2) está entre 25% y 30%, que traducida a carbono, en un árbol con 300 kilos de biomasa aérea, ronda los 75 kg/árbol. Por otro lado, si se utilizara el valor recomendado por el IPCC (2006) para bosques tropicales de 11 a 20 años de edad (0,57), el resultado sería de una sobreestimación con respecto a los valores generados localmente.

El aporte al carbono total de componentes poco estudiados mundialmente como la necromasa y las hierbas, aunque pareciera marginal, genera un beneficio adicional que puede llegar hasta los 16,2 Mg C ha⁻¹ (59,5 Mg CO₂; cuadro 3), o el equivalente a aproximadamente un 15% del carbono en el nivel de ecosistema (Fonseca et al., 2011b).

En resumen, si sumamos la incertidumbre en el cálculo del carbono por árbol por el hecho de utilizar factores de la literatura (FC, FEB, Br/Bat) y los extrapolamos a la hectárea, la cifra final está bastante alejada de la realidad. A esto debe agregársele el carbono no cuantificado en la necromasa, en la vegetación herbácea, en los productos de la madera y en el suelo. Es así como la selección de ecuaciones alométricas, factores



Eric Gay. Plantación forestal fijadora de carbono, Costa Rica.

de expansión, fracción de carbono, densidad de la madera, etc. juegan un papel importante en las estimaciones y se reconoce que son también el origen de la mayor parte de los errores asociados a la cuantificación de carbono en ecosistemas forestales (Chave et al., 2004; Elías y Potvin, 2003; Sarmiento et al., 2005). Hasta tanto no se tenga el inventario completo y con buena exactitud, es difícil tomar decisiones sobre bases sólidas y comprender realmente cuál es el verdadero aporte del sector forestal al control del cambio climático.

Conclusiones

La ausencia de varias especificaciones técnicas a la hora de estimar emisiones en el marco del Programa País de reporte de inventarios de gases de efecto invernadero genera riesgos elevados que reducen la aplicabilidad, comparabilidad y confiabilidad de los resultados, hecho que resta eficacia a esta iniciativa novedosa propuesta por el gobierno costarricense. Una situación similar se presenta en la estimación de las capacidades

de fijación y almacenamiento de carbono, donde la complejidad ecológica de los ecosistemas forestales y la ausencia o escasa información sobre densidades de biomasa por sitio y especie conllevan el uso de valores de referencia en el nivel mundial, que generan mucha incertidumbre en las evaluaciones de carbono. A lo anterior se suma las estimaciones de carbono incompletas en los ecosistemas, con lo cual se hace poco probable conocer cuál es el verdadero aporte del sector forestal al control del cambio climático. Un resultado importante se refiere a que la evidencia confirma que, incluso en los casos cuando la información existe, la aplicación apropiada de esta depende completamente del usuario. Gran parte de los errores se debe a la falta de actualización ante la nueva información desarrollada y al hecho de que, aun cuando se utilizan valores locales, es responsabilidad del usuario valorar si estos realmente son representativos a la escala para la cual se realiza el inventario. Es por esto que se deben aumentar los esfuerzos para generar y utilizar indicadores nacionales que mejoren las estimaciones, como medida complementaria para avanzar en los procesos de monitoreo, reporte y verificación.

Referencias

- Bonan G. B. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* 320. Disponible en www.sciencemag.org
- Braatz, B. y Doorn, M. (2003). *Manejo del proceso de elaboración del Inventario Nacional de gases de efecto invernadero*. Unidad de Apoyo a las Comunicaciones Nacionales, Fondo para el Medio Ambiente Mundial, Grupo de Energía y Medio Ambiente, Oficina de la Política de Desarrollo. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Brown, S., Lugo, A. y Chapman, J. (1986). Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. *Canadian Journal of Forestry Research* 16, 390-394.
- Canadell, J. y Raupach, M. (2008). Managing Forests for Climate Change Mitigation. *Science* 320, 1456-1457.
- Chacón, A., Montenegro, J. y Sasa, J. (2009). *Inventario Nacional de Gases con Efecto Invernadero y Absorción de Carbono en Costa Rica en el 2000 y 2005*. Gobierno de Costa Rica, Ministerio del Ambiente, Energía y Telecomunicaciones / Instituto Meteorológico Nacional. Disponible en http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/inventario_gases_efecto_invernadero.pdf
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernández, A., Lao, S. y Pérez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 359, 409-420. Disponible en http://si-pddr.si.edu/dspace/bitstream/10088/6729/1/Chave_Condit_Aguilar_Hernandez_Lao_and_Perez_2004.pdf
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M., Chambers, J., Eamus, D., Folster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. y Yamakura, T. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145 (1), 87-99.
- Clark, D. y Kellner, J. (2012). Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness. *Journal of Vegetation Science* 23, 1191-1196.
- Corrales, L. (1998). *Estimación de la cantidad de carbono almacenado y captado (masa aérea) en el Corredor Biológico Mesoamericano de Costa Rica*. PROARCA/CAPAS/CCAD/USAID.
- Costa Rica. (2013a, noviembre 11). Reglamento de Regulación y Operación del Mercado Doméstico de Carbono. Decreto 37926-MINAE. *La Gaceta* 217.
- Costa Rica. (2013b). Mercado doméstico voluntario de carbono de Costa Rica: Un instrumento hacia la C-neutralidad. San José, Costa Rica: MINAE-DCC-PNUD.
- Costa Rica. (2012, junio 19). Oficialización Programa País. Acuerdo-36-2012-MINAE-T. Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. *La Gaceta* 118, Alcance Digital 79.
- Cubero, J. y Rojas, S. (1999). Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea Roxb.*), teca (*Tectona grandis L. F.*) y pochote (*Bombacopsis quinata Jacq.*) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Disponible en <http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:taRWtUkKV4QJ:cglobal.imn.ac.cr/Pdf/mitigacion/Estudio%2520sobre%2520Fijacion%2520de%2520Carbono%2520en%2520Plantaciones.pdf>
- Dickson, R. J. y Oliver, W. R. (1991). Emissions Models for Regional Air Quality Studies. *Environmental Science and Technology* 25, 1533-1535.
- Elias, M. y Potvin, C. (2003). Assessing inter- and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. *Can. J. For. Res.* 33, 1039-1045.
- Espinosa, M. E., Páramo, V. H. y Sarmiento, J. (1996). Mobile Sources Inventories in Mexico [Paper 96-RA108A.02]. Presentado en el 89th Annual Meeting of the Air

- & Waste Management Association, Nashville, Tennessee.
- Fonseca, W. (2006). *Estimación de tasas de crecimiento en tierras de pastos degradados en el Pacífico Central de Costa Rica*. San José, Costa Rica: FONAFIFO-MINAE.
- Fonseca, W., Alice, F., Montero, J., Toruño, H. y Leblanc, H. (2008). Acumulación de biomasa y carbono en bosques secundarios y plantaciones forestales de *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides* en el Caribe de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 46, 57-63.
- Fonseca, W., Alice, F. y Rey-Venayas, J. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque* 30 (1), 36-47.
- Fonseca, W. (2009). *Restauración forestal y almacenamiento de carbono en el trópico húmedo*. (Tesis de Ph. D.). Universidad de Alcalá, España.
- Fonseca, W., Alice, F., Montero, J., Toruño, H. y Leblanc H. (2010). Biomass and carbon accumulation in secondary forests and forestry plantations used as a restoration tool in the Costa Rican Caribbean Region [Paper N° 20 "Climate Change and Biodiversity in the Americas"]. Smithsonian Institution.
- Fonseca, W., Rey-Benayas, J. M. y Alice, F. (2011a). Carbon accumulation in the biomass & soil of different aged secondary forests in the Humid Tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 262, 1400-1408.
- Fonseca, W., Alice, F. y Rey-Benayas, J. M. (2011b). Carbon Accumulation in Aboveground and Belowground Biomass and Soil of Different Age Native Forest Plantations in the Humid Tropical Lowlands of Costa Rica. *New Forests*. Doi: 10.1007/s11056-011-9273-9
- Fonseca, W., Chávez, H., Alice, F. y Rey-Benayas, J. M. (2011c). Cambios en la cobertura del suelo (1986-2006) y áreas prioritarias para la restauración forestal en la zona Caribe de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 59-60, 99-107.
- Goetz, S., Achard, F., Joosten, H., Kanamaru, H., Lehtonen, A., Menton, M., Petrokofsky, G., Pullin, A. S. y Wattenbach, M. (2010). *Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools* [CEE protocol 09-016 (SR77)]. Collaboration for Environmental Evidence. Disponible en www.environmentalevidence.org/SR77.html
- Heimann, M. y Reichste, M. (2008). Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* 451, 289-292. Doi:10.1038/nature06591
- Houghton R. A., van der Werf, G. R., DeFries, R. S., Hansen, M. C., House, J. I., Le Quére, C., Pongratz, J. y Ramankutty, N. (2012). Chapter G2 Carbon emissions from land use and land-cover change. *Biogeosciences Discuss.* 9, 835-878. Doi:10.5194/bgd-9-835-2012. www.biogeosciences-discuss.net/9/835/2012/
- Husch, B. (2001). Estimación del contenido de carbono en los bosques. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, del 18 al 20 de octubre del 2001. Valdivia, Chile.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). (2005). Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones. Disponible en http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=457
- INTECO. (2011). Sistema de gestión para demostrar la C-neutralidad. Requisitos. INTE 12-01-06:2011. (ed. 2).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014a). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en <http://mitigation2014.org/report>
- IPCC. (2014b). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. IPCC Working Group II Contribution to AR5. Disponible en <http://ipcc-wg2.gov/AR5/>
- IPCC. (2007). Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R. y Meyer, L. A. (Eds.)]. Cambridge, United Kingdom y New York, USA: Cambridge University Press,
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme [Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. y Tanabe, K. (Eds.)]. Japan: IGES.
- IPCC. (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme UNEP [Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. y Wagner, F. (Eds.)]. ISBN 4-88788-003-0.
- Ito, A., Penner, J. E., Prather, M. J., de Campos, C. P., Houghton, R. A., Kato, T., Jain, A. K., Yang, X., Hurtt, G. C., Frolking, S., Fearon, M. G., Chini, L. P., Wang, A. y Price, D. T. (2008). Can we reconcile differences in estimates of carbon fluxes from land-use change and forestry for the 1990s? *Atmos. Chem. Phys.* 8, 3291-3310. Disponible en www.atmos-chem-phys.net/8/3291/2008/
- Le Quére, C., Andres, R. J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R. A., House, J. I., Marland, G., Peters, G. P., van der Werf, G., Ahlström, A., Andrew, R. M., Bopp, L., Canadell, J. G., Ciais, P., Doney, S. C., Enright, C., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jain, A. K., Jourdain, C., Kato, E., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Levis, S., Levy, P., Lomas, M., Poulter, B.,

- Raupach, M. R., Schwinger, J., Sitch, S., Stocker, B. D., Viovy, N., Zaehle, S. y Zeng, N. (2012). The global carbon budget 1959–2011. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* 5, 1107-1157. Doi:10.5194/essdd-5-1107-2012. Disponible en www.earth-syst-sci-data-discuss.net/5/1107/2012/
- MacDicken, K. (1997). A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Forest carbon Monitoring Program. Winrock International Institute for Agricultural Development (WRI). Disponible en <http://www.winrock.org/REEP/PUBSS.html>
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET). (2009). Estrategia Nacional de Cambio Climático. Disponible en <http://cambioclimaticocr.com/2012-05-22-19-42-06/estrategia-nacional-de-cambio-climatico>
- Montero, M. y Kanninen, M. (2002). Biomasa y Carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell en la zona Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana* 39-40, 50-55.
- Montero, M. y Montagnini, F. (2006). Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente* 45, 118-125.
- Ortiz, E. (1997). Costa Rican secondary forest: an economic option for joint implementation initiatives to reduce atmospheric CO₂ [Draft paper presented for inclusion in the beiger Seminar in Punta Leona, Costa Rica].
- Pan, Y., Birdsey, R., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. y Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science* 333, 988. Doi: 10.1126/science.1201609.
- Pérez, D. y Kanninen, M. (2002). Wood specific gravity and aboveground biomass of *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology Management* 165 (1-3), 1-19.
- Pérez, D. y Kanninen, M. (2003). Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science* 15 (1), 199-213.
- Petrescu, A. M. R., Abad-Viñas, R., Janssens-Maenhout, G., Blujdea, V. y Grassi, G. (2012). Global estimates of C stock changes in living forest biomass: EDGARv4.3 – 5FL1 time series from 1990 to 2010. *Biogeosciences Discuss.* 9, 3767-3793. Doi: 10.5194/bgd-9-3767-2012. Disponible en www.biogeosciences-discuss.net/9/3767/2012/
- Redondo, A. (2007). Growth, carbon sequestration, and management of native tree plantations in humid regions of Costa Rica. *New Forests* 34, 253-268.
- Rypdal, K. y Winiwarter, W. (2001). Uncertainties in greenhouse gas emission inventories-evaluation, comparability and implications. *Environmental Science & Policy* 4 (2), 107-116.
- Sarmiento, G., Pinillos, M. y Garay, I. (2005). Biomass Variability in Tropical American Lowland Rain Forests. *Ecotrópicos* 18 (1), 1-20.
- Schlegel, B. (2001). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, del 18 al 20 de octubre del 2001. Valdivia, Chile.
- Segura, M. (1997). *Almacenamiento y fijación de carbono en Quercus costaricensis, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional, Heredia.
- Segura, M. (1999). Almacenamiento y fijación de carbono en bosques de bajura de la zona atlántica de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 23-28.
- SEMARNAT. (2001). *Guía para la correcta selección y empleo de métodos de estimación de emisiones contaminantes*. México: SEMARNAT y la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA).
- Sierra, A., Del Valle, J. y Orrego, S. (2001). *Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en bosques sucesionales y maduros tropicales de Colombia*. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, del 18 al 20 de octubre del 2001. Valdivia, Chile.
- Somogyi, Z., Teobaldelli, M., Federici, S., Matteucci, G., Pagliari, V., Grassi, G. y Seufert, G. (2008). Allometric biomass and carbon factors database. *iForest* 1, 107-113. Disponible en <http://www.sisef.it/iforest/>
- Strech, C., Chagas, T., von Unger, M. y O'Sullivan, R. (2012). The Durban Climate Conference between Success and Frustration. *JEEPL* 9 (2), 201-221. Doi: 10.1163/187601012X639853.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2012). Conference of the Parties: Report of the Conference of the Parties on its seventeenth session, held in Durban from 28 November to 11 December 2011. Addendum Part Two: Action taken by the Conference of the Parties at its seventeenth session. FCCC/CP/2011/9/Add.1. Disponible en <http://unfccc.int/resource/docs/2011/cop17/eng/09a01.pdf>
- US EPA. (2007). Emission factors uncertainty assessment. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina, November. Disponible en <http://www.epa.gov/ttnchie1/efpac/uncertainty.html>