

LOS SENSORES REMOTOS EN LOS PROYECTOS DE MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Beatriz Irene Zapata Arbeláez

Centro de Investigación en Ecosistemas y Cambio Global, Carbono y Bosques. Estudiante de la Especialización en Medio Ambiente y Geoinformática, Universidad de Antioquia. E-mail: bzapata@carbonoybosques.org.

Jesús Adolfo Anaya Acevedo

Profesor asociado Universidad de Medellín
E-mail: janaya@udem.edu.co

RESUMEN. Se realizó una revisión del estado del arte de las técnicas de teledetección para la implementación de programas de mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), MDL y REDD. Para tal fin se recopiló la información documentada haciendo una clasificación de la misma en tres grandes clases de sensores: ópticos, radar y LiDAR. Posteriormente, se evaluó la conveniencia del uso de cada uno de estos en los diferentes elementos que contiene el monitoreo de REDD en áreas tropicales, resaltando la gran importancia que tienen las observaciones de campo y el conocimiento de las áreas evaluadas para la escogencia de la escala y para los supuestos que se realicen en la tipificación de la dinámica del bosque. Por último, se presentan las características principales de los tipos de sensores, así como sus limitaciones y cómo estas limitaciones se pueden disminuir al combinar diferentes técnicas metodológicas.

ABSTRACT. A state of the art of remote sensing techniques was made in the context of Greenhouse Gases (GHG) emissions, CDM and REDD. For this purpose the documented information was collected and classified into three major classes of sensors: optical, radar and LiDAR. In addition, we evaluated the appropriateness of each sensor in the monitoring of the REDD tropical forests. Here, we highlighted the added value of field observation, the great value of local knowledge in areas to be evaluated, the selection of the appropriate detail level (scale), and the importance of characterizing forest dynamics. Finally this article presents the main characteristics of sensor types, sensor limitations and how these can be reduced by combining different techniques.

66

Palabras Claves: Teledetección, imágenes satelitales, resolución espacial, REDD, MDL, biomasa, sensores ópticos, sensores LiDAR, sensores radar, degradación, deforestación.

Key Words. Remote sensing, satellite imagery, spatial resolution, REDD, CDM, biomass, optical sensors, LiDAR sensors, radar, degradation, deforestation.

1. Introducción

A partir de la problemática ambiental mundial, desatada desde los años sesenta debido al incremento de las actividades industriales y al aumento exponencial de la población mundial, se han desarrollado diferentes alternativas y mecanismos para la mitigación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) [*Greenhouse Gases (GHG)*]. De manera inevitable, estas alternativas han implicado muchas decisiones en referencia a las actividades productivas y económicas de las naciones, convirtiéndose en un tema escabroso y de interés diplomático gobernado por una incuestionable incertidumbre científica (Orrego et al. 2003). Tímidamente, dicha preocupación se materializó con la creación del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático [*Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*] y la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático [*United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*], que comenzó sesiones en Río de Janeiro en 1992. En la tercera reunión de las partes (COP3), realizada en Japón a finales de 1997, se adoptaron compromisos más rigurosos y detallados por parte de los países industrializados, mediante la adopción del Protocolo de Kioto¹ (PK) (Kagi y Schone 2005).

Como parte de los mecanismos y estrategias de mitigación, se reconoció el papel importante que juegan los bosques naturales y plantaciones forestales como sumideros de dióxido de carbono (CO₂) y otros GEI. En el marco del PK, se estipuló el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) [*Clean Development Mechanism (CDM)*]. Este esquema, posee una reglamentación clara con respecto al establecimiento de actividades de forestación y reforestación en países que no tengan compromisos de reducción (principalmente aquellos en vía de desarrollo) (Kagi y Schone 2005).

Por otro lado, empezó a surgir modestamente el Mercado Voluntario de carbono. En este esquema se realizaban actividades de deforestación evitada, en un principio, bajo una mentalidad altruista con el medio ambiente y posteriormente, como pre-cumplimiento ante un eventual cambio en la legislación donde se obligue a las entidades a realizar acciones de compensación (Laguado et al. 2008).

¹El Protocolo de Kioto es un acuerdo jurídicamente vinculante cuyo objetivo es que, en el período 2008-2012, los países industrializados reduzcan sus emisiones colectivas de gases que causan el efecto de invernadero en un 5,2%, respecto a 1990.

Poco a poco, la incorporación del bosque natural dentro de las estrategias de mitigación y la preocupación por las altas tasas de deforestación en el trópico, llevaron a la concepción de los mecanismos de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD). En la actualidad, se discute cómo se podrían diseñar y operar los proyectos REDD y los impactos que podría tener sobre la conservación de los bosques y su biodiversidad, el clima, los pueblos indígenas y las comunidades locales, así como las necesidades tecnológicas y de capacitación para su implementación (Zambrano y Cordero 2008).

En el contexto del MDL forestal, existe una amplia gama de aproximaciones metodológicas establecidas por el IPCC y aceptadas por la UNFCCC, con el fin de estimar el potencial de captura de GEI de cada proyecto. En el caso de los mecanismos REDD, el panorama es más complejo. El contenido de biomasa y las tasas de captura de carbono en los ecosistemas boscosos dependen, en primera instancia del estado de sucesión en el que se encuentre el bosque, aunque la relación entre estas variables no es lineal (Keeling y Phillips 2007, Zhou et al. 2002) y es más compleja e impredecible en el bosque tropical (Keeling y Phillips 2007). Además, para establecer la línea base, es necesario conocer los procesos de deforestación a partir de la presión sobre la tierra y otros aspectos socioeconómicos determinantes específicos del área de interés (Brown et al. 2003).

En Colombia, como en muchos países en desarrollo, existen grandes vacíos en relación al conocimiento básico de la información y dinámica de los ecosistemas, específicamente en los bosques naturales y plantaciones forestales, así como deficiencia de información confiable y permanente sobre la composición, oferta, grado de intervención y afectación de los bosques por actividades relacionadas con el aprovechamiento y cambio del uso del suelo (Bahamondez et al. 2005). Este vacío aunado a las limitaciones metodológicas mencionadas, disminuye las posibilidades de llevar a cabo iniciativas de planificación públicas o proyectos privados en el marco del MDL y REDD.

Bajo este panorama, es inminente la necesidad de incorporar metodologías que impriman mayor dinámica en la estructuración de este tipo de proyectos. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), las herramientas de teledetección, imágenes satelitales y sensores remotos, conforman una alternativa para la identificación de áreas con potencial para la implementación de proyectos MDL y REDD (Achard et al. 2007, Asner 2009, Gibbs et al. 2007). El uso de imágenes satelitales incrementan la velocidad y frecuencia con la cual se pueden realizar los análisis en un área, lo cual facilita y dinamiza los procesos de detección y monitoreo de los cambios en el uso del suelo a través del tiempo (Bodart et al. 2009, Steininger y Horning 2007, Tucker y Townshend 2000).

No obstante, el uso de estas herramientas no necesariamente es una alternativa económica. En algunos casos, se puede acceder de manera gratuita a la información satelital y en otros los costos pueden ser bastante altos (Böttcher et al. 2009). Adicionalmente, se suelen presentar inconvenientes en la escala de la imagen, acceso a programas especializados, instalación y manejo de equipos de alta tecnología y el personal calificado para manipularlo (Gibbs et al. 2007). Sin embargo, debido a los niveles de demanda actual en el campo de la investigación, se presume que el acceso a

las herramientas de teledetección e imágenes satelitales se incrementará en las próximas décadas, debido a las tecnologías emergentes y el fortalecimiento de las capacidades técnicas (Gibbs et al. 2007, Asner 2009).

Finalmente, la información de campo es fundamental e imprescindible para el desarrollo, calibración y validación de las técnicas de teledetección (Steininger y Horning 2007, GOFIC GOLD 2009). A partir de las variables dendrométricas medidas en el terreno, se pueden establecer relaciones alométricas² de la biomasa en función de las características espectrales de la información satelital (Anaya et al. 2009, Asner 2009, Baccini et al. 2008, Ballhorn et al. 2009³, Foody et al. 2003, Gibbs et al. 2007, Hoekman y Quiñones 1997, Houghton et al. 2007, Lefsky et al. 2005, Lindquist y Kamelarczyk 2009, Lu 2005, Myneni et al. 2001, Peterson et al. 2005, Steininger 2000).

En este estudio se pretende realizar un estado del arte en las diferentes técnicas de teledetección utilizadas para monitorear la vegetación, enmarcados en la implementación de proyectos MDL y REDD, por lo cual se hace especial énfasis en la estimación de la biomasa. En primer lugar, se hace una introducción a los mecanismos de mitigación que competen al sector forestal y elementos básicos de la teledetección, seguido de los métodos y los instrumentos que se utilizan en diferentes casos, de acuerdo a tres grandes categorías en las técnicas de teledetección: Óptico, Radar y LiDAR.

2. Mecanismos de Mitigación: MDL y REDD

2.1. Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), definido en el artículo 12 del PK fue creado con el objetivo de ayudar a los países en vía de desarrollo a lograr un desarrollo sostenible y contribuir al cumplimiento de los compromisos adquiridos por los países de economías desarrolladas en la reducción de las emisiones (UNFCCC 1998). El MDL es el único mecanismo que permite que las reducciones/remociones de GEI logradas en proyectos realizados en países en vías de desarrollo puedan ser adquiridas por los países desarrollados, como un permiso para emitir una cantidad de CO₂ o gases no-CO₂ igual a la cantidad adquirida (Salinas y Hernández 2008; Gao et al. 2007).

Dentro de este mecanismo se realizan los proyectos MDL forestales, consistentes en actividades de reforestación comercial o de restauración, que actúan como sumidero de carbono. Las áreas destinadas para este tipo de actividades, deben demostrar la ausencia de bosque y procesos de sucesión en un periodo comprendido entre el 31 de diciembre de 1989 y la fecha más reciente que se pueda analizar antes de inicio del proyecto. En este sentido, las imágenes satelitales han sido la mejor herramienta para llevar a cabo el análisis multitemporal que permite determinar la elegibilidad de las tierras (Salinas y Hernández 2008).

²En ecología se llama relación alométrica a la relación existente entre la velocidad de un proceso biológico y cualquier medida (volumen, masa, altura, etc.) de los organismos en los que ocurre, o bien entre dos medidas tomadas en el mismo organismo. En este caso, se establecen relaciones alométricas entre una variable dendrométrica del árbol (diámetro, área de copa, altura) y el contenido de biomasa del mismo.

2.2. Reducción de Emisiones por Degradación y Deforestación (REDD)

En la actualidad se estima que las emisiones por degradación y deforestación alcanzan entre un 15 y 30% de las emisiones totales (IPCC 2007; Brown et al. 2003; Mollicone et al. 2007; Achard et al. 2007; Dutschke y Wolf 2007, Goetz et al. 2009; Myneni et al. 2001). A partir de estos reportes alarmantes, algunas naciones se han interesado en proyectos de conservación forestal, con el ánimo de hacer más lento los procesos de deforestación e incluso revertir las altas tasas reportadas (Brown et al. 2003). Sin embargo, el diseño de estos proyectos se ha visto interrumpido por la ambigüedad de los conceptos de deforestación y degradación.

Las negociaciones para definir un sistema de incentivos con el fin de reducir las emisiones por degradación y deforestación del bosque, bajo la consideración de la UNFCCC, han tenido un considerable progreso desde la COP11 en el año 2005. En diciembre de 2007 durante la COP14 en Bali, Indonesia, se reconoció formalmente los proyectos REDD como uno de los mecanismos potenciales para la reducción de emisiones (Zambrano y Cordero 2008; Hamilton 2008). Posteriormente, la mayoría de las naciones reconocieron la importancia del mecanismo, lo que condujo en su momento, a un drástico aumento de la oferta de este tipo de proyectos dentro de las estrategias de mitigación (Hamilton 2008). Finalmente, durante la última COP, realizada en Copenhague, en diciembre de 2009, se iniciaron estrategias de movilización de recursos financieros desde los países desarrollados para el establecimiento de las estrategias REDD, así como un fondo de adaptación, transferencia y desarrollo de tecnología y capacitación (UNFCCC 2009).

Pese a la falta de claridad respecto a la estructura metodológica para la implementación del mecanismo REDD, se ha detectado que las herramientas de teledetección, son la mejor opción para el monitoreo de las actividades de deforestación y degradación debido a las grandes extensiones de tierra que se abarca en los análisis e igualmente el nivel de detalle que se puede alcanzar con imágenes de alta resolución. La combinación entre las imágenes satelitales y la información obtenida en campo, juega un papel importante en la determinación de pérdida de cobertura boscosa (Achard et al. 2007), además, las habilidades técnicas han avanzado considerablemente desde la década de los 90 y la implementación de programas de monitoreo con sistemas de teledetección hacen parte de las metas de los países en desarrollo a nivel nacional (De Fries et al. 2005). Por consiguiente, se presentan algunos elementos básicos de teledetección, que pueden ayudar e comprender el gran papel que juega esta tecnología en los mecanismos de mitigación de GEI, particularmente en REDD.

3. Teledetección

La teledetección se define como la adquisición y procesamiento de las imágenes de una superficie planetaria, a partir de sensores instalados en plataformas espaciales, utilizando para su obtención la interacción electromagnética entre la superficie

y el sensor, siendo la fuente de radiación el sol (teledetección pasiva) o el sensor (teledetección activa) (Chuvienco 1995). La captura de información por teledetección, es una técnica bastante indirecta que debe ser utilizada con precaución (GOFC GOLD 2009). El objetivo principal de estas herramientas es la interpolación y extrapolación de la información, hacia superficies extensas, a partir de algunos puntos en los cuales se tiene certeza de la observación realizada. Por tanto, el mayor beneficio que se obtiene al utilizar imágenes digitales, es que se pueden tipificar grandes extensiones, a partir de algunos puntos de control. A diferencia de los muestreos de campo, la imagen satelital permite obtener una caracterización visual y total del área de interés, incluso en aquellas áreas remotas de difícil acceso terrestre (Achard et al. 2007, Asner 2009, Baccini et al. 2008).

Por consiguiente, se puede establecer que la captura de información e inferencias en áreas tan extensas y de condiciones tan adversas como son los bosques naturales, eventualmente se podría realizar por medio de las técnicas de teledetección, teniendo en cuenta que, como regla, todos los análisis realizados bajo esta técnica requieren información de campo adicional ó conocimiento del área para la interpretación de las imágenes (Steininger y Horning 2007, GOFC GOLD 2009).

3.1. Elementos generales

El principio básico del funcionamiento de los sensores remotos es la percepción del reflejo de los objetos sometidos a diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, teniendo en cuenta que el porcentaje de reflectancia, varía en función de las características físicas del objeto. Dicha variación se denomina firma espectral. Por tanto, de acuerdo a las propiedades físicas y químicas de los objetos, a partir de la firma espectral, es posible identificar diferentes sustancias, permitiendo discriminar entre composiciones y coberturas en la superficie terrestre (Short 2009).

En general, los sensores se pueden clasificar en dos grandes categorías: sensores pasivos y activos. En la primera categoría se encuentran los ópticos, los cuales dependen de la luz del sol incidente sobre la superficie. Los sensores activos emiten su propia luz mediante pulsos microondas (sensores radar) y laser (sensores LiDAR) (Steininger y Horning 2007). Uno de los términos y características técnicas de mayor relevancia en la teledetección, es la resolución de las imágenes. En realidad, la resolución puede hacer referencia a cuatro aspectos fundamentales: unidad de visualización, temporalidad, rango de la longitud de onda e intensidad de la longitud de onda.

Resolución espacial. Está asociada principalmente al tamaño del pixel de la imagen relacionado con el tamaño de los objetos en el terreno y es un indicador del potencial de detalle que ofrece la imagen (Steininger y Horning 2007). La escogencia de la resolución espacial debe ser consecuente y coherente con los objetivos y escala del análisis, por lo cual es indispensable definir el tamaño del área de estudio y el alcance del estudio en tres niveles: global, nacional o regional (Strittholt y Steininger 2007).

Resolución temporal. Básicamente se refiere a la frecuencia de repetición de toma de una imagen (Steininger y Horning 2007). Una resolución temporal alta es conveniente

para el estudio de tendencias de la vegetación de rápido crecimiento como los pastos (Anaya et al. 2009). Además, cuando hay problemas de nubosidad en el área de interés, las observaciones más frecuentes eventualmente, deberían incrementar la posibilidad de obtener imágenes libres de nubes (Anaya et al. 2009, Baccini et al. 2008). Sin embargo, esta situación no se cumple en muchos casos, debido a las condiciones de nubosidad permanente en algunas zonas (en Colombia, por ejemplo en los bosques altoandinos y en el flanco occidental de la cordillera occidental).

Resolución espectral. Hace referencia al intervalo del espectro electromagnético que una banda puede registrar. Asociado a este concepto, está la amplitud de la banda espectral (rango de la longitud de onda que cubre la banda), localización de la banda (porción del espectro electro magnético) y número de bandas. La mayoría de los sensores remotos reproducen imágenes utilizando varias bandas espectrales, y cada banda corresponde a un rango de longitud de onda específica dentro del espectro electromagnético (Steininger y Horning 2007).

Resolución radiométrica. Corresponde al número de valores de guía o digitales posibles de una banda ó al rango potencial de la intensidad de la longitud de onda percibida. El número de valores limita la sensibilidad del sensor ó cantidad de variación que puede ser detectada. Por encima de ese rango de intensidad, el sensor se satura y no puede reflejar diferencias en la imagen; por debajo no lo capta por ser tan débil la señal que emite, es decir que no percibe cambios por fuera de la intensidad de la resolución radiométrica (Steininger y Horning 2007).

Las características de las imágenes que se deben tener para un estudio, dependen específicamente del nivel de detalle con el que se desee contar. De manera general, la precisión temática de la imagen se maximiza cuando se utilizan datos de alta resolución espacial, temporal y espectral (Steininger y Horning 2007). No obstante, en la planificación de las actividades, se debe hacer un balance entre el nivel de detalle deseado y costo efectividad (tiempo y dinero), pues algunas veces demasiada información puede entorpecer y retrasar los procesos.

3.2. Tipos de sensores

Ópticos

Los sensores ópticos son sensores pasivos, que reciben la reflexión de los objetos luego de haber sido impactados por la energía solar. Por consiguiente, necesitan la luz del día para captar las imágenes. Este tipo de herramientas han sido de gran utilidad en estudios ambientales y de cobertura del suelo, debido a la gran cobertura a nivel mundial, desarrollo de programas de procesamiento de las imágenes y disponibilidad de las mismas vía internet.

Este tipo de sensores tienen la cualidad de dar apariencia de textura a la imagen cuando la resolución es lo suficientemente detallada (Strittholt y Steininger 2007, Wittmann

et al. 2000). No obstante, esta característica puede llevar a malinterpretaciones de las imágenes en áreas de pendientes, donde las condiciones de iluminación son variables. Steininger (2000), pudo establecer una correlación significativa entre la reflectancia del dosel y el contenido de biomasa en un bosque secundario Amazónico de Brasil. Sin embargo, en condiciones similares en la Amazonía Boliviana, no se encontró esta correlación debido, probablemente a la menor luminosidad en estas áreas, lo cual atenuó la relación entre las variables. La reflectancia de la luz en el bosque depende del arreglo, morfología y cantidad de hojas y ramas, entre otros. Algunas características estructurales como la cobertura de copas, altura de los árboles, proyección de la copa y frecuencia de claros, inciden en la reflectividad del dosel superior de la vegetación y proporcionan información útil para la diferenciación de varios tipos de bosque (Wittmann et al. 2000).

Otro aspecto relevante en el uso de sensores pasivos, es que el espectro se satura rápidamente con el avance de la sucesión del bosque, aún para contenidos de biomasa relativamente bajos (Steininger 2000). Además, este tipo de sensores se ve obstruido por la nubosidad, ya que la reflectancia de las nubes le impide recibir el reflejo de los elementos de la superficie. De manera general mediante el uso de este tipo de sensores, se puede hallar una correlación entre los índices espectrales de la vegetación y la biomasa aérea, teniendo en cuenta las limitaciones frente a las condiciones de sombra, saturación del espectro y nubosidad.

Radar

Radiowave Detection and Ranging. Son sensores activos. Los sensores de radar envían señales de ondas que penetran hasta la superficie, atravesando las nubes y delineando el terreno también como el dosel de la vegetación. A partir del retorno de la señal, se puede estimar la altura de cada una de las superficies percibidas (terreno y dosel) (Goetz et al. 2009). Posteriormente, la altura medida por el sensor puede ser utilizada para estimar la biomasa, desarrollando modelos alométricos entre la biomasa y la altura media de dosel.

La tecnología radar es más valiosa cuanto mayor sea la longitud de onda, pues en longitudes de onda corta, algunos elementos se comportan similares (ramas y las hojas), mientras que en longitudes de onda largas sólo las ramas largas devuelven el reflejo (Steininger y Horning 2007). La principal ventaja que presenta es su capacidad de penetrar las nubes, por medio de las microondas con que impactan la superficie, lo cual a su vez, permite tipificar la estructura vertical del bosque (Gibbs et al. 2007). Bajo las condiciones ambientales agresivas del bosque lluvioso tropical el acceso es limitado y los sistemas de monitoreo mediante técnicas de sensores remotos ópticos fallan debido a la nubosidad. Los radares espaciales pueden ofrecer mejores posibilidades ya que pueden cubrir áreas con suficiente frecuencia debido a la alta resolución temporal y sistema de radar polarimétrico que ofrece amplias posibilidades de monitoreo (Hoekman y Quiñones 1997). De igual forma que los sensores ópticos, las estimaciones suelen ser confiables en bosques jóvenes, mientras que en los bosques más maduros la señal se satura rápidamente (Gibbs et al. 2007).

Aunque la disponibilidad de los datos radar es amplia y en el 2005 fueron lanzados nuevos sistemas de los cuales se esperarían mejores resultados, la información radar aún es bastante costosa en comparación con las imágenes ópticas.

LiDAR

Light Detection and Ranging. Son sensores activos que usan haces de luz laser para medir directamente la distribución del dosel de la vegetación, en tres dimensiones y la topografía del sotobosque (GOF-C-GOLD 2009). Al igual que los sensores radar, la tecnología LiDAR consiste en la medición exacta del tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso láser y su retorno, tras reflejarse en la superficie que se observa (García et al., 2009). Al analizar el tiempo de retorno para cada pulso hasta el sensor, se puede determinar la altura de la superficie relativa y absoluta con una precisión de varios centímetros, generando un modelo digital del terreno [Digital Terrain Model (DTM)] (Ballhorn et al. 2009). Con los sistemas LiDAR, se pueden generar nubes de puntos mucho más densas que con cualquier otro método y obtener estructuras en tres dimensiones del dosel de modo más rápido (alrededor de 5.000 ha en un día con una resolución espacial de 1m) (Asner 2009).

Mediante LiDAR se puede obtener un perfil de la distribución espacial de la vegetación en el bosque. Los niveles de referencia relativos y absolutos ayudan a diferenciar los estratos dentro de la masa boscosa y a estimar la altura media del dosel. Posteriormente, con este valor de altura e información obtenida en campo, se puede determinar la biomasa aérea del bosque por diferentes métodos: obtener valores de volumen y biomasa a partir de las variables diámetro y altura (Hese et al. 2004, Lefsky et al. 2005) y en otros casos, si se cuenta con estimaciones de biomasa en el bosque, se pueden correlacionar estos datos con los puntos de LiDAR y obtener un modelo de biomasa en función de la altura (Asner 2009).

Por consiguiente, para la determinación de la biomasa total, la información de los sensores remotos se correlaciona con inventarios de campo y se realiza una interpolación y una extrapolación de las estimaciones al área de interés de acuerdo al tamaño de muestra (Hese et al. 2004). En una escala local, el uso de los sensores LiDAR son la mejor opción para la determinación de biomasa (Anaya et al. 2009).

Actualmente, la mayoría de los sistemas LiDAR son aerotransportados, por lo cual, la aplicación de estos datos suele restringirse a escalas locales. Hasta ahora el único sistema LiDAR a bordo de un sistema de satélites, que ha permitido obtener datos de manera global, es el sensor GLAS (*Geoscience Laser Altimeter System*), a bordo de la plataforma ICESat (García et al., 2009). Por consiguiente, los costos de implementación de esta tecnología suelen ser bastante altos (Bötcher et al. 2009). Sin embargo, aunque en la actualidad es poco factible realizar análisis utilizando LiDAR, los analistas de mercado muestran que entre el 2005 y el 2008 hubo un aumento del 75% en el número de sistemas LiDAR aerotransportados y hay una tendencia a la disminución de los costos de implementación de esta tecnología (Asner 2009).

3.3. Los sensores remotos en REDD

En la implementación del mecanismo REDD se deben identificar los procesos de deforestación y degradación en dos aspectos: cambio en el área boscosa y cambio en el contenido de carbono de estas áreas (Asner 2009, Hiepe y Kanamaru 2008, Gibbs et al. 2007).

En el caso de los procesos de deforestación, se debe determinar el cambio (aumento-disminución) en el área boscosa. Se considera que las técnicas de teledetección son la única herramienta práctica para estimar las deforestación a nivel pantropical, sin las cuales el reto de los mecanismo REDD sería aún mayor (Achard et al. 2007, Asner 2009). El uso de esta tecnología es requerida debido a las limitaciones de acceso de muchas áreas en el trópico y lo poco práctico que son los muestreos basados en fotografías aéreas. En el monitoreo de la áreas degradadas, la dificultad gira en torno a la determinación de la alteración del área ocurrida dentro de la matriz boscosa. La complejidad de la determinación radica en la heterogénea composición del bosque degradado, ya que es una mezcla de diferentes tipos de coberturas (vegetación arbustiva, árboles muertos, suelos, sombra) y la firma espectral característica de los procesos de degradación, cambia rápidamente (GOFD GOLD 2009). Las diferencias en la reflectancia entre bosque degradado, bosque intacto, bosques densos de dosel abierto, entre otros tipos, son muy sutiles y se pueden confundir fácilmente cuando no se tiene cartografía de coberturas del suelo (Olander et al. 2008).

Dentro del balance global de emisiones de carbono, las áreas tropicales juegan un papel fundamental (Achard et al. 2007). Este punto es más relevante aún, ya que gran parte de las naciones en vía de desarrollo (No Anexo I), que potencialmente podrían desarrollar programas REDD, se encuentran en el cinturón tropical. A raíz de esto, es indispensable el fortalecimiento de las capacidades técnicas en referencia a los sistemas de teledetección en todo el trópico (Achard et al. 2007). Paradójicamente, las características inherentes a los bosques tropicales (gran diversidad de especies, falta de estacionalidad, condición siempre verde de la vegetación, nubosidad), impiden tipificar tendencias naturales, lo que dificulta el desarrollo de estas tecnologías. Varios estudios han demostrado la dificultad para estimar el contenido de biomasa en áreas tropicales a partir de imágenes satelitales y generar modelos replicables a nivel pantropical (Anaya et al. 2009, Steininger 2000). Asner (2009), plantea que a partir de los sistemas de teledetección (específicamente LiDAR), se pueden detectar cambios en el contenido de carbono por deforestación y degradación, a partir de un valor inicial de referencia.

3.3.1. Deforestación

3.3.1.1. Área

En el contexto de las técnicas utilizadas en los programas REDD, de acuerdo a GOFD-GOLD (2009) y Achard et al. (2007), a partir de imágenes satelitales desde la década de los 90 en adelante, es posible obtener resultados confiables de las variaciones del área

forestal. Las limitaciones para desarrollar los análisis giran en torno a los recursos y a la disponibilidad de la información, más que a las metodologías (GOFC-GOLD 2009).

Para la estimación de las tendencias históricas de degradación, se utilizan dos enfoques metodológicos básicos: el muestreo y la evaluación “wall to wall” (un análisis que cubre la extensión espacial completa del área de interés) (Hiepe y Kanamaru 2008; Gibbs et al. 2007, GOFC-GOLD 2009). Si los recursos no son suficientes para realizar una aproximación “wall to wall” (particularmente para países grandes), se pueden realizar muestreos estratificados ó sistematizados (GOFC-GOLD 2009, Gibbs et al. 2007). No obstante, Tucker y Townshend (2000), demostraron que para alcanzar una precisión de 20% en las estimaciones de deforestación, es necesario utilizar el método “wall to wall” ya que el fenómeno de deforestación en el trópico no se presenta de manera aleatoria, sino que se concentra en algunas áreas en particular.

En primera instancia, se debe establecer una situación de línea base para la disminución de la deforestación (Asner 2009). El establecimiento de esta situación de referencia constituye una de las discusiones más representativas para el período de compromiso de REDD (Hiepe y Kanamaru 2008, Olander et al. 2008), debido a la escasa información para tipificar la tasa de deforestación histórica en cada país. Para proyectar los cambios en el uso del suelo Brown et al. 2003, desarrollaron 3 métodos en áreas tropicales de Brasil, Bolivia y Méjico: Cambio de área Forestal (CAF), Captura de carbono por uso del suelo (LUCS) y Modelación Geográfica (GEOMOD). Este último método utiliza información sobre la tasa de cambio de uso del suelo en diferentes lugares distribuidos espacialmente para simular la dinámica del paisaje. La tasa de cambio fue estimada a partir de la interpretación de imágenes satelitales de periodos anteriores extrapolados a la actualidad. Una gran fortaleza del método es que incorpora datos espaciales de factores biofísicos y socioeconómicos, con el fin de entender los procesos de deforestación a partir de la presión de la tierra y otros aspectos socioeconómicos determinantes. De acuerdo a Brown et al. 2003, el modelo se puede aplicar para cualquier escala deseada, siempre que cuente con imágenes satelitales, bases de datos espaciales de interés y disponibilidad de equipos adecuados. Sin embargo, las estimaciones realizadas se ven limitadas espacial y temporalmente (Hiepe y Kanamura 2008), en este caso a 10 años, debido a que los patrones supuestos están ligados a factores socioeconómicos y políticos locales, cuya dinámica es diferente al comportamiento de los factores biofísicos (Brown et al. 2003).

Para establecer la línea base de la tasa de deforestación a nivel nacional, se debe utilizar todas las fotografías, imágenes satelitales e inventarios que se tengan disponibles. Como requerimiento mínimo, GOFC GOLD (2009) recomienda hacer uso de imágenes tipo Landsat (resolución 30 m) para los años 1990, 2000 y 2005, y una Unidad Mínima de Mapeo (UMM) [*Minimum Mapping Units (MMU)*] entre 1 y 6 ha. Las evaluaciones de cobertura del suelo en una escala pantropical se realizan a partir de imágenes de resolución gruesa, alrededor de 1 km (Achard et al. 2007).

3.3.1.2. Biomasa

La teledetección se ha convertido en una importante herramienta para la evaluación y observación de características ambientales, en múltiples escalas espaciales y temporales (Foody et al. 2003). Las aproximaciones con sensores remotos son la mejor forma de estimar la biomasa a escala regional, cuando la información es escasa (Anaya et al. 2009). Sin embargo, hay varias implicaciones que deben ser superadas para realizar estimaciones de mayor confiabilidad.

La información inferida a partir de la imagen debe ser correlacionada con las mediciones de campo que se tengan disponibles. Dichas mediciones generalmente no son diseñadas de una manera que posibilite la relación entre la información de campo y la imagen. Además, los sensores ópticos presentan la desventaja de saturarse rápidamente en el bosque tropical, debido a la densidad del follaje (Anaya et al. 2009). Teniendo en cuenta estas inconsistencias, lo más conveniente es realizar el monitoreo del cambio en el contenido de biomasa, a partir de un estado inicial de carbono (línea base), donde se calibre la información de las imágenes de satélite con datos y cartografía actual a nivel nacional (Asner 2009).

3.3.2. Degradación

3.3.2.1. Área

En el monitoreo de las áreas afectadas por degradación, se han establecido dos acercamientos generales: aproximaciones directas e indirectas (GOF-C-GOLD 2009). En la primera, el objetivo es detectar los “vacíos” en el bosque, generados por la extracción de algunos árboles. La aproximación indirecta rastrea las pruebas que podrían indicar que se realiza algún tipo de explotación forestal en el área, como son vías de acceso y residuos de quemadas.

Para alcanzar el nivel de detalle requerido, se han utilizado principalmente sensores ópticos de alta resolución (ASTER, SPOT, Ikonos, Quickbird, Imágenes digitales aéreas). Igualmente, los sensores de la plataforma LandSat, han sido de gran ayuda, debido a que se pueden obtener imágenes de resolución media (30m), apropiadas para la detección de cambios en el dosel del bosque, de fácil acceso vía internet y por un costo relativamente moderado. Particularmente, en las imágenes de los sensores TM (Thematic Mapper) y ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), se pueden identificar áreas de explotación, residuos de quemadas y vías de acceso como indicadores de explotación forestal actual o en el pasado (Fuller 2006, Ballhorn et al. 2009, Chuvieco et al. 2007). En el caso de la identificación de zonas de perturbación por actividades ganaderas y agrícolas es necesario contar con información de mayor resolución (alrededor de 10m) para detectar áreas de limpieza entre 0.5 y 1 ha. Para áreas de explotación menor se requieren algoritmos de mayor complejidad que detecten diferencias sutiles en el porcentaje de reflectancia (Achard et al. 2007). De igual forma, la información de escala gruesa también es de gran interés en estas iniciativas; a partir de imágenes satelitales de gran resolución, se pueden

identificar grandes frentes de explotación, estratificar las áreas, y posteriormente, dirigir mayores esfuerzos para realizar un análisis de mayor detalle (de Fries et al. 2002).

Finalmente, la frecuencia de monitoreo en áreas degradadas debe ser inferior a 1 año, debido al cambio de la firma espectral y a la confusión de eventos antrópicos con cambios naturales del bosque (cambios estacionales, corrientes de viento, entre otros) (GOFC GOLD 2009).

3.3.2.2. Biomasa

Debido a la variabilidad de los reservorios de carbono en las coberturas vegetales, es conveniente realizar una estratificación del bosque para incorporar la variabilidad en la estimación del contenido de carbono (Gibbs et al. 2007, GOFC-GOLD 2009). Dependiendo de la información que se tenga, el criterio de estratificación puede ser el tipo de bosque (maduro, intervenido, secundario, quemado) (Gibbs et al. 2007, Asner 2009) ó de acuerdo a las condiciones de sitio.

En principio, existe incertidumbre en la conversión de mediciones de satelitales de degradación de bosque a pérdida de carbono, aunque el IPCC (2006) desarrolló guías para contabilizar este aspecto (Asner 2009). Para monitorear la pérdida de biomasa por degradación, Asner (2009) realizó en primera instancia, un mapa de coberturas en el cual se asignaba a cada pixel un valor porcentual del estado de degradación de 0 a 100% (línea base). Luego determinó la biomasa (línea base) mediante un modelo alométrico de la biomasa en función de la altura media de dosel. Este modelo fue ajustado con mediciones de campo e imágenes LandSat 7. Posteriormente, para determinar la ganancia o pérdida en el contenido de biomasa, se evaluó la transición o cambio de la degradación en cada pixel, y se multiplicó por el contenido de biomasa inicial.

Por otro lado, se han realizado varias aproximaciones bastante satisfactorias para la estimación de contenido de biomasa utilizando la combinación de imágenes satelitales ópticas, tecnología LiDAR e información de campo (Asner et al. 2009, Baccini et al. 2008).

3.4. MDL y sensores remotos

Este mecanismo de mitigación está totalmente legislado por la UNFCCC. A raíz de esto, se debe seguir de manera cuidadosa la herramienta de elegibilidad³ (*Procedures to demonstrate the eligibility of lands for afforestation and reforestation CDM project activities*). Allí se establece el procedimiento para demostrar que el área donde se implementará el proyecto no cuenta con cobertura boscosa al inicio del mismo, ni durante los años anteriores (por lo menos desde el 31 de diciembre de 1989) se habían iniciado procesos de sucesión en al área a reforestar.

³UNFCCC, EB 35, Annex 18. Disponible en www.unfccc.int

Bajo las condiciones que se inscribe el proceso de elegibilidad de tierras del MDL, el área mínima de determinación es de 1 ha (10.000 m²). Por consiguiente, es posible realizar demostraciones de elegibilidad de tierras con imágenes de resolución gruesa (entre 1 y 250m) (Salinas y Hernández 2008). De igual forma, las imágenes de mayor utilidad en este proceso, han sido las imágenes tipo Landsat.

Conclusiones

A través de la teledetección es posible realizar estimaciones de algunas métricas del bosque, y de manera indirecta estimar el contenido de biomasa, siendo el cambio en biomasa una medida del aumento o disminución de la cobertura boscosa. No obstante, estas estimaciones rara vez son replicables en áreas de condiciones ambientales similares y siempre deben ir de la mano con información de campo local. La teledetección es la técnica más recomendable para hacer el seguimiento a las coberturas boscosas en el ámbito global. Por un lado, permiten abarcar áreas de estudio a nivel de un país, y por otro, permiten un monitoreo imparcial por parte de terceros. A partir de esta revisión se puede concluir que las técnicas de teledetección aplicadas a la vegetación se pueden agrupar en tres categorías: óptico, radar y LiDAR. Las imágenes ópticas tienen la ventaja de la alta resolución temporal, sin embargo ofrecen una estimación de biomasa muy indirecta ya que no penetra el dosel. En el caso de radar, se ha encontrado que mayores longitudes de onda tienen alta capacidad de penetrar el dosel y por tanto de describir la estructura del bosque. Sin embargo, esta técnica se caracteriza por su baja resolución temporal y mayor reto en procesamiento de los datos. Finalmente, LiDAR parece la mejor opción pero no se cuenta con experiencias con esta técnica en el país.

El inconveniente para la implementación de los mecanismos REDD es más de recursos que de metodologías (GOFC GOLD 2009). Los sistemas de sensores activos combinados con la información de sensores ópticos, podrían dar solución a las inconsistencias en las estimaciones de contenido de biomasa. Sin embargo, en la actualidad los altos costos de la tecnología radar y LiDAR imposibilita la aplicación de estos. Los costos de implementación de los programas no solo se ven incrementados por la adquisición de las imágenes y software, sino además por el nivel de experiencia y adiestramiento necesario para la manipulación y análisis de las imágenes. Para la implementación y el monitoreo de los mecanismos REDD la tecnología de LiDAR se vislumbra como una opción de gran potencialidad, a partir de la determinación del contenido inicial de carbono, y asumiendo que la demanda del sistema contribuya a la disminución de costos y flexibilidad de acceso a esta herramienta (Asner 2009).

En la actualidad, la mayor función de LiDAR es la representación de las características estructurales del bosque y el dosel. En muchos estudios se ha encontrado que las estimaciones de la altura de los individuos utilizando esta tecnología, ha sido de igual o mayor confiabilidad que las mediciones realizadas en muestreos de campo, con errores menores de 0.5m (altura individual) y 1m (alturas medias y máximas de dosel) (GOFC GOLD 2009). De acuerdo a Asner (2009), las estimaciones de contenido de biomasa a partir de LiDAR pueden ser comparables e incluso mejores en referencia los ajustes alométricos a nivel de parcela, y con el uso de LiDAR, un número relativamente

pequeño de parcelas (menos de 10 por tipo de bosque), pueden incrementar el ajuste de los modelos en un 40%. Este punto continúa siendo un foco de intensa investigación, pero es evidente que la noción tradicional de que cientos de muestras son necesarias por cada tipo de vegetación, no es compatible con la literatura actual LiDAR, disminuyendo así la necesidad de grandes programas de medición de inventario forestal (Asner 2009, Lindquist y Kamelarczyk 2009).

El monitoreo de la degradación, es más complejo y representa un mayor reto en referencia a la deforestación. En este caso el uso de imágenes de tipo óptico, podría ser útil, ya que si se cuenta con la escala adecuada, se pueden detectar pequeños aprovechamientos del bosque, previendo los problemas de nubosidad y pendiente del terreno. La reflectancia de la luz en un bosque depende del arreglo, morfología y cantidad de hojas y ramas, entre otros. Algunas características estructurales como la cobertura de copas, altura de los árboles, proyección de la copa y frecuencia de claros, inciden en la reflectividad del dosel superior de la vegetación y proporcionan información útil para la diferenciación de varios tipos de bosque (Wittmann et al. 2000). De acuerdo a estas características, se puede hallar una correlación entre los índices espectrales de la vegetación y la biomasa aérea, teniendo en cuenta las limitaciones del sensor a las condiciones de sombra, saturación del espectro y nubosidad. ☺

Bibliografía

- ACHARD, F., De Fries, R., Eva, H., Hansen, M., Mayaux, P. y H-J. Stibig. 2007. Pan-tropical monitoring of deforestation. En: Environmental Research Letters. No. 2 (2007) 045022. 11p.
- ANAYA, J. A., Chuvieco, E. y A. Palacios. 2009. Aboveground biomass assessment in Colombia: A remote sensing approach. En: Forest Ecology and Management. Vol: 257 (2009) 1237-1246. 10p.
- ASNER, G. P. 2009. Tropical forest carbon assessment: integrating satellite and airborne mapping approaches. En: Environmental Research Letters. No. 4 (2009) 034009 (11p).
- BACCINI, A., Laporte, N., Goetz, S. J., Sun, M. y H. Dong. 2008. A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery. En: Environmental Research Letters. No. 3 (2008) 045011 (9p).
- BAHAMONDEZ, C., Lorenz, M., Mery, G. y J. Varjo. 2005. Evaluación de los recursos forestales ante necesidades cambiantes de información. En: Forest in the Global Balance - Changing Paradigms.
- BALLHORN, U., Florian, S., Masonc, M. y S. Limind. 2009. Derivation of burn scar depths and estimation of carbon emissions with LiDAR in Indonesian peatlands. En: Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). Vol: 106. No. 50 (21213-21218) 6p.
- BODART, C., Beuchle, D., Simonetti, D., Eva, H., Raši, R., Carboni, S., Brink, A., Stibig, H.-J. A, Achard, F. y P. Mayaux. 2009. Global Monitoring of Tropical Forest Cover Changes by Means of a Sample Approach and Object-based Classification of Multi-scene Landsat Imagery: Pre-processing and First Results.

- BÖTTCHER, H., Eisbrenner, K., Fritz, S., Kindermann, G., Kraxner, F., McCallum, I. y M. Obersteiner. 2009.** An assessment of monitoring requirements and costs of 'Reduced Emissions from Deforestation and Degradation. En: Carbon Balance and Management 2009, 4:7. 14p.
- BROWN, S., Dejong, B., Guerrero, G., Hall, M., Maser, O., Marzoli, W., Ruiz, F. y D. Shoch. 2003.** Modelación de la deforestación en México y sus implicaciones para los proyectos de captura de carbono. En: Finalización de Líneas Base de Deforestación Evitada. Winrock International.
- CHUVIECO, E. Fundamentos de Teledetección Espacial, Ediciones RIALP, S.A, 2da.** Edición, Madrid, España, 1995.
- CHUVIECO, E., A. De Santis, D. Riaño y K. Halligan. 2007.** Simulation approaches for burn severity estimation using remotely sensed images. En: Fire Ecology 3(1): 129-150.
- DE FRIES, R. S., Houghton, R. A., Hansen, M. C., Field, C. B., Skole, D. y J. Townshend. 2002.** Carbon emissions from tropical deforestation and regrowth based on satellite observations for the 1980s and 1990s. En: Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). Vol: 99. No. 2 (14256-14261) 6p.
- DUTSCHKE, M. y R. Wolf. 2007.** Reducing Emissions from Deforestation in Developing Countries. The way forward. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH. Climate Protection Programme in Developing Countries.
- FOODY, G. M., Boyd, D. S. y M. E.J. Cutler, 2003.** Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. En: Remote Sensing of Environment. No:85 (2003) 463-474,12p.
- FULLER, D. O. 2006.** Tropical forest monitoring and remote sensing: A new era of transparency in forest governance?. En: Singapore Journal of Tropical Geography. No. 27 (2006) 15-29. 15p.
- GAO, W., Zhou, N., Li, H. y D. M. Kammen. 2007.** Possibility and potential of clean development mechanisms in China. En: Environmental Research Letter 2(2007) 044005. 8p.
- GARCÍA, M., Prado, E., Riaño., D., Chuvieco, E. y F. M. Danson. 2009.** Ajuste planimétrico de datos LiDAR para la estimación de características dasométricas en el Parque Natural del Alto Tajo. En: GeoFocus No. 9, p.184-208. ISSN: 1578-5157, 25 p.
- GIBBS, H.K., Brown, S.O., Niles, J. y J.A. Foley. 2007.** Monitoring and estimating tropical carbon stocks: making REDD a reality. En: Environmental Research Letters. No. 2, p. 1-13.
- GOETZ, S. J., Baccini, A., Laporte, N. T., Johns, T., Walker, W., Kellndorfer, J., Houghton, R. A. y M. Sun. 2009.** Mapping and monitoring carbon stocks with satellite observations: a comparison of methods. En: Carbon Balance and Management 2009, 4:2. 7p.
- GOFC-GOLD. 2009.** Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting, Gofc-Gold Report version COP14-2, (Gofc-Gold Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada).
- HAMILTON, K., M. Sjardin, T. Marcello y G. Xu. 2008.** Forging a Frontier: State of the Voluntary Carbon Markets. A report by Ecosystem Marketplace y New Carbon Finance.

HESE, S., C. Schmullius, R. Dubayah, W. Lucht, y M. Barnsley. 2004. The earth observation mission CARBON-3D – a synergetic multi-sensor approach to global biomass mapping for an improved understanding of the CO₂ balance. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVI - 8/W2. Freiburg, Germany 03-06 October 2004.

HIEPE, C. y H. Kanamaru. 2008. Review of literature on monitoring to support REDD. UN-REDD PROGRAMME. 24p.

HOUGHTON, R. A., Butman, D., Bunn, A. G., Krankina, O. N., Schlesinger, P. y T. A. Stone. 2007. Mapping Russian forest biomass with data from satellites and forest inventories. En: Environmental Research Letters. No. 2 (2007) 045032. 7p.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Climate change: the physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

KAGI, W. y D. Schone. 2005. Forestry projects under de CDM, procedures experiences and lessons learned. FAO. B.S.S. Economic Consultants. Blumenrain 16. Basel. Switzerland.

KEELING H. C. y O. L. Phillips. 2007. The global relationship between forest productivity and biomass. Global Ecology and Biogeography. 14p.

LAGUADO, W., A. Yepes, A. Sierra y B. Zapata. 2008. Exploración de oportunidades de los proyectos forestales bajo los mercados voluntarios y panorama actual de los proyectos REDD. Informe final. Este documento se realizó en el marco del proyecto: “Mas Bosques para Medellín: un ambiente sano para el presente y el futuro” Centro de Investigación en Ecosistemas y Cambio Global Carbono y Bosques – CyB y Corporación Autónoma Regional Rionegro – Nare – CORNARE.

LEFSKY, M. A., D. J. Harding, M. Keller, W. B. Cohen, C. C. Carabajal, F. Del Bom Espirito-Santo, M. O. Hunter, y R. De Oliveira Jr. (2005), Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. En: Geophysical Research Letter. Vol 32, L22S02, doi:10.1029/2005GL023971.

LINDQUIST, E. J. y K. B. F. Kamelarczyk. 2009. Linking remote sensing and field data to model carbon stocks in the Congo Basin: A tool for REDD. IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. No. 6 (2009).

LU, D. 2005. Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. En: International Journal of Remote Sensing. Vol. 26, No. 12, 2509–2525. 17p.

MOLLICONE, D., Freibauer, A., Schulze, E. D., Braatz, S., Grassi, G. y S. Federici. 2007. Elements for the expected mechanisms on ‘reduced emissions from deforestation and degradation, REDD’ under UNFCCC. En: Environmental Research Letters. No. 2(2007) 045024. 7p.

MYNENI, R. B., Dong, J., Tucker, C. J., Kaufmann, R. K., Kauppi, P. E., Liski, J., Zhou, L., Alexeyev, V. y M. K. Hughes. 2001. A large carbon sink in the woody biomass of Northern forests. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS). 98(26): 14784-14789.

OLANDER, L. P., Gibbs, H. K., Steininger, M. K., Swensen, J. J. y B. C. Murray. 2008. Reference scenarios for deforestation and forest degradation in

support of REDD: a review of data and methods. En: Environmental Research Letters. No. 3(2008) 025011. 11p.

ORREGO, S. A., Del Valle, J. I. y Moreno, F. H (EDS.). 2003. Medición de captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: contribuciones para la mitigación del cambio climático. Panamericana Formas e Impresos S.A, Medellín.

PETERSON, B., Dubayah, R., Hyde, P., Hofton, M., Blair, J. B. y J. F. Kaufman. 2005. Use of LiDAR for Forest Inventory and Forest Management Application. Proceedings of the Seventh Annual Forest Inventory and Analysis Symposium. 193-200. 8p.

SALINAS, Z. y P. Hernández (Eds). 2008. Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía. Serie Técnica. Manual técnico No 83. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) Turrialba, Costa Rica.

SHORT, N. M. 2009. The Remote Sensing Tutorial. National Aeronautics and Space Administration (NASA). Disponible en: <http://rst.gsfc.nasa.gov>. Consultado en enero de 2010.

STEININGER, M. K. 2000. Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data from Brazil and Bolivia. En: International Journal of Remote Sensing Vol. 21, No. 6 & 7, 1139-1157. 19p.

STEININGER, M. y N. Horning. 2007. The Basics of Remote Sensing. En: Sourcebook on Remote Sensing and Biodiversity Indicators. Secretarial of the Convention on Biological Diversity. CBD Technical Series No 32.

STRITTHOLT, J y M. Steininger. 2007. Trends in Selected Biomes, Habitats, and Ecosystems: Forests. En: Sourcebook on Remote Sensing and Biodiversity Indicators. Secretarial of the Convention on Biological Diversity. CBD Technical Series No 32.

Tucker, C. J. Y J. R. G. Townshend. 2000. Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data. En: International Journal of Remote Sensing. Vol. 21, No. 6 & 7, 1461-1471. 11p.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 1998. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2009. Procedures to demonstrate the eligibility of lands for afforestation and reforestation CDM project activities. Executive Board report 35, Annex 18.

WITTMANN, F., Anhuf, D. y W. Junk. 2000. Detection of Different Forest Types in Central Amazonian Várzea by Remote Sensing Techniques - Preliminary Results. German-Brazilian Workshop on Neotropical Ecosystems - Achievements and Prospects of Cooperative **Research Hamburg, September 3-8, 2000.** Session 4: Living Resources Management: Approaches, Techniques, Variability. 607-612, 12p.

ZAMBRANO, C. y D. Cordero. 2008. REDD en América del Sur: Experiencias y herramientas útiles. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

ZHOU, G., Wang, Y., Jiang, Y. y Yang, Z. 2002. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's Larix forests. En: Forest Ecology and Management. 169(2002): 149-157.