

ESTUDIO MULTITEMPORAL DE LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA UTILIZANDO PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

MULTITEMPORAL OF DEFORESTATION IN COLOMBIA USING IMAGE PROCESSING

ESp. Auris Marcela Parody Zuleta^a, MSc. Eudes Zapata Sanjuan^b

^a Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Tecnoparque Nodo Valledupar, Grupo de Investigación INVECOMM, Carrera 5 Número 14-81, Valledupar, Colombia, amparodyz@misena.edu.co

^b Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Tecnoparque Nodo Valledupar, Grupo de Investigación INVECOMM, Carrera 5 Número 14-81, Valledupar, Colombia, ezapata94@misena.edu.co

Fecha de recepción: 10-10-2015

Fecha de aprobación: 30-11-2015

Resumen: Generar información confiable acerca de la distribución y usos de los bosques, es un insumo de valor para estimar las tasas de deforestación y áreas degradadas de un país. El objetivo de este artículo es revisar los trabajos realizados en Colombia, que utilizaron el procesamiento de imágenes aéreas o satelitales, para el estudio de la deforestación en diferentes años. De los 20 trabajos revisados, 6 fueron elaborados por instituciones del gobierno, 16 de ellos utilizaron imágenes provenientes de sensores ubicados en plataformas espaciales y los 4 restantes corresponden al uso de fotografía digital aérea.

Palabras clave: Análisis multitemporal, deforestación, fotografía aérea, sensado remoto.

Abstract: Generate reliable information on the distribution and uses of forests, is an input value to estimate rates of deforestation and degraded areas of a country. The aim of this article is to review the work done in Colombia, which used processing aerial or satellite images for the study of deforestation in different years. Of the 20 studies reviewed, 6 were prepared by government institutions, 16 of them used images from sensors on space platforms and the remaining 4 for the use of digital aerial photography.

Keywords: Aerial Photography, deforestation, multitemporal analysis, remote sensing.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia la primera causa de deforestación es la expansión de la frontera agropecuaria, seguido de la colonización y la construcción de obras de infraestructura. Esto anudado a la mala gestión de los recursos naturales, ha disminuido el porcentaje de bosque tropical, especialmente en la región amazónica; lo que lo hace contribuyente a la generación de gases de efecto invernadero.

La clasificación temática de las coberturas vegetales, utilizando el procesamiento de imágenes provenientes de sensores remotos, mejoran la gestión de los recursos naturales de un país. Sin embargo, esta técnica para Colombia presenta limitaciones. La primera de ellas es que debido a que nuestro país se encuentra sobre la línea del Ecuador, se presenta gran índice de nubosidad, lo que dificulta la toma de imágenes periódicas y de gran calidad, necesarias para estos estudios. La segunda limitante se refiere a lo difícil que resulta validar los datos obtenidos. Una tercera limitante es la falta de estandarización de los métodos de procesamiento, validación y análisis, aunque en Colombia en el año 2011 se estableció el “Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia, Nivel Nacional Escala Gruesa y Fina”, utilizando sensado remoto.

El objetivo de esta revisión es caracterizar los diferentes métodos de procesamiento digital de imágenes para la evaluación de la deforestación. Además de presentar una recopilación de los trabajos realizados en

Colombia, que han utilizado las imágenes aéreas o satelitales como herramientas para la elaboración de mapas de bosques y de uso de suelos, cuya finalidad es determinar la tasa de deforestación y servir como insumo para generar políticas ambientales que mejoren el uso de los recursos naturales y contribuyan a la disminución de gases de efecto invernadero.

En el aparte 2 de este artículo se presentan los métodos descritos por la FAO, para evaluar la deforestación. En la sección 3 se hace una revisión de los trabajos realizados a nivel de instituciones gubernamentales y otras instituciones no oficiales y finalmente en la sección 4 se presentan las conclusiones del estudio.

2. DEFORESTACIÓN Y DEGRADACIÓN FORESTAL

En el contexto del Proyecto “Capacidad Institucional, Técnica y Científica para Apoyar Proyectos de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD¹), la deforestación se define como la medida de pérdida de cobertura boscosa entre un 10% y 30%(UNFCC, 2006). En el Protocolo De Procesamiento Digital De Imágenes Para La Cuantificación De La Deforestación En

¹ Reducción de Emisiones de la deforestación y degradación (REDD) de los bosques, es una iniciativa que busca que los países en desarrollo con bosques, protejan y mejoren el uso y la gestión de sus recursos forestales, para contribuir en la lucha global contra el cambio climático.

Colombia Nivel Nacional -Escala Gruesa Y Fina, la deforestación se define como la conversión directa y/o inducida de la cobertura bosque a otro tipo de cobertura de la Tierra en un periodo de tiempo determinado (DeFries et al., 2006; GOF-CGOLD, 2009) y según el Panel Intergubernamental de Cambio climático (IPCC), la deforestación se entiende como aquellos procesos naturales o antropogénicos que convierten las tierras forestales a no forestales (Ortega et al., 2010).

En Colombia según La Política de Bosques, expedida mediante el documento CONPES 2750 de 1994 (Ministerio de Medio Ambiente y DNP, 1996), las principales causas de deforestación son: la expansión de la frontera agropecuaria, la colonización, la construcción de obras de infraestructura, los cultivos ilícitos, el consumo de leña, los incendios forestales, la producción maderera para la industria y el comercio y el desplazamiento de las comunidades campesinas hacia áreas boscosas, debido a problemas de orden público (Ortega et al., 2010).

Otro termino relacionado a la deforestación es la degradación forestal, la cual según la REDD, se define como la perdida de biomasa sin un cambio en la cobertura forestal (Olander *et al.*, 2008). La ITTO² (Organización Internacional de Maderas Tropicales), la define como la

² La Organización Internacional de las Maderas Tropicales (OIMT), es una organización intergubernamental que promueve la conservación de los recursos forestales tropicales y su ordenación sostenible.

reducción de la capacidad de un bosque de producir bienes y servicios. Un bosque degradado proporciona un nivel reducido de productos y servicios de un sitio determinado y mantiene sólo una diversidad biológica limitada. El bosque degradado ha perdido la estructura, función, composición de especies y/o productividad normalmente asociadas con el tipo de bosque natural que se espera en ese sitio (ITTO, 2002).

En Colombia la superficie de bosques naturales tiende a decrecer debido a problemas sociopolíticos, falta de inversión en el sector y ausencia de acercamiento entre las comunidades dueñas de los recursos y el sector productivo (Rojas et al., 2012)

La estimación de las tasas de deforestación y la evaluación de los cambios de cobertura de la tierra de un país se pueden estimar usando tres métodos, estadísticas nacionales de la FAO³, sensado remoto (Teledetección) y fotografía aérea.

2.1 Estadísticas Nacionales de la FAO

La FAO ha estado llevando a cabo evaluaciones globales forestales cada cinco a diez años desde la primera encuesta en 1947. Las estadísticas se basan en gran medida en los datos de inventarios forestales, modelos y la opinión de expertos (FAO 2001). Estas proporcionan estimaciones de la superficie forestal y las tasas netas de deforestación por país para 1990, 2000 y 2005 (FAO 2006).

³ Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

Los datos proporcionados por la FAO han sido criticados por su falta de coherencia entre países, las definiciones cambiantes de bosque, los diferentes métodos para evaluar la deforestación, la poca fiabilidad de los datos y la pérdida de ellos en algunos casos (Grainger 1996, Matthews 2001). Además, las estimaciones publicadas a nivel de países no proporcionan detalles sobre la degradación forestal y son difíciles de validar (Olander et al., 2008).

2.2 Sensado Remoto

El sensado remoto o la teledetección se definen como la adquisición y procesamiento de las imágenes de una superficie de la tierra, a partir de sensores instalados en plataformas espaciales (Chuvieco 1995). El objetivo principal de esta herramienta 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, lo que permite tipificar grandes extensiones, a partir de algunos puntos de control (Zapata y Anaya, 2011). A diferencia de los muestreos de campo, las imágenes obtenidas a partir de satélites, permiten 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). Sin embargo las imágenes satelitales en algunos casos pueden ser costosas, difíciles de analizar y todos los estudios que las utilizan requieren información de campo adicional o información del área para su interpretación

(Olander et al., 2008) (Steininger y Horning 2007, GOFI GOLD 2009).

Los sensores remotos obtienen imágenes de la superficie de la tierra, a partir del reflejo de los objetos sometidos a diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, teniendo en cuenta que el porcentaje de reflectancia⁴, varía en función de las propiedades físicas y químicas del objeto. Dicha variación se denomina firma espectral; y gracias a esta es posible identificar diferentes sustancias, permitiendo discriminar entre composiciones y coberturas en la superficie terrestre (Short, 2009).

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 dosel⁵ superior de la vegetación y proporcionan información útil para la diferenciación de varios tipos de bosque (Wittmann et al. 2000) (Zapata y Anaya, 2011).

En una plataforma satelital existen dos categorías de sensores: los pasivos y los activos. Los primeros dependen de la luz del sol incidente sobre la superficie de la tierra, mientras que los segundos generan su propia luz mediante pulsos de

⁴ Se refiere a la relación entre la potencia electromagnética incidente con respecto a la potencia que es reflejada sobre una interface.

⁵ La región de las copas y regiones superiores de los árboles de un [bosque](#).

microondas y laser (Steininger y Horning 2007).

2.2.1 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). Aunque el espectro se satura rápidamente con el avance de la sucesión del bosque, aún para contenidos de biomasa relativamente bajos (Steininger 2000). 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 (Zapata y Anaya, 2011).

2.2.2 Sensores Radar

Los sensores de radar son sensores activos que 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 (Goetz et al. 2009).

La principal ventaja de esta tecnología 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).

Los radares espaciales pueden ofrecer mejores posibilidades que los ópticos, esto porque en 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. Además, pueden cubrir áreas con suficiente frecuencia debido a la alta resolución temporal (Hoekman y Quiñones 1997), sin embargo las imágenes radar suelen ser más costosas que las ópticas. 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).

2.2.3 Sensores LIDAR

Los LIDAR (Light Detection and Ranging) espaciales son sensores activos, que utilizan un haz 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). 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 (Ballhorn et al. 2009). Con los sistemas LIDAR, se puede obtener un perfil de la distribución espacial de la vegetación en el bosque.

La mayoría de los sistemas LiDAR son aerotransportados, por lo cual, la aplicación de estos datos suele restringirse a escalas locales y resulta costosa. En la actualidad es poco factible realizar análisis utilizando LiDAR, aunque algunos 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). El único registro que se tiene de un sensor LIDAR a bordo de un satélite, es el sensor GLAS (*Geoscience Laser Altimeter System*), que se encuentra en la plataforma ICESat (García et al., 2009).

En la Tabla 1 se presenta un resumen comparativo de las tecnologías de sensores más utilizadas en el procesamiento de imágenes, para determinar las tasas de deforestación en un país. En esta se especifica la escala, la resolución espacial de la imagen, los beneficios, las limitaciones y los costos que implican el uso de estos. La escala gruesa se refiere a que las imágenes de los sensores son de baja resolución y que proveen una alta resolución temporal generando información muy actualizada, y permitiendo identificar rápidamente las áreas de cambio. La escala fina es aquella que usa sensores de media resolución espacial que permiten tener un cubrimiento completo del país con un buen nivel de

detalle espacial para la identificación de coberturas de la Tierra (Cabrera et al., 2011). La resolución se refiere a la espacial, la cual está asociada al tamaño del pixel de la imagen y está un indica el nivel de detalle que ofrece la imagen (Steininger y Horning, 2007) (Zapata y Anaya, 2011).

En la tabla 2 se presentan los sensores y las plataformas disponibles para Colombia a escala gruesa y fina, según el “Protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes para la Cuantificación de la Deforestación en Colombia, Nivel Nacional Escala Gruesa y Fina”.

2.3 Fotografía Aérea

La fotografía aérea se refiere a la toma de imágenes, a partir de una cámara transportada en un avión, ultraliviano o dispositivo no tripulado (DRONE). Las fotografías aéreas se pueden clasificar de acuerdo a la ubicación de la cámara y al tipo de película usado. De acuerdo al ángulo de ubicación de la cámara, las fotografías aéreas pueden ser verticales, bajas oblicuas y altas oblicuas. En las primeras el eje de la cámara forma un ángulo recto (90°) con la horizontal. Las bajas oblicuas son tomadas con el eje de la cámara formando un ángulo de 30° con la vertical, mientras que las oblicuas altas son tomadas con un ángulo de 60° .

De acuerdo al tipo de película las fotografías aéreas se pueden clasificar en pancromáticas, a color y falso color. Las fotografías a blanco y negro o pancromáticas, producen una imagen en

escala de grises con un buen contraste que ayuda en la identificación de las

Tabla 1. Tipos de sensores sobre plataformas satelitales.

TIPO DE SENSOR	SENSOR	ESCALA	RESOLUCIÓN (metros)	BENEFICIOS	LIMITACIONES	COSTOS
OPTICOS	AVHRR, MODIS, SPOT- VEGETATION	Gruesa	1 000	El procesamiento de las imágenes permite obtener evaluaciones rápidas. La cobertura diaria ayuda con los problemas de nubosidad	No detecta degradación de bosques. Detección de cambios de pequeñas áreas de bosque.	Libre distribución, Costos bajos
	SPOT HRV, ASTER, IRS, CBERS	Fina	30	Permiten realizar evaluaciones a escala región/país. Puede detectar algunos tipos de degradación forestal	Cubre menos área por imagen, por tanto más lento y más costoso. La nubosidad es un problema en bosques tropicales	Libre distribución, costos moderados
	IKONOS	Fina	4	Excelente validación de evaluaciones a gran escala. Detecta posible degradación. Bueno para validación.	Cubre áreas muy pequeñas. Cobertura de países no disponibles. Requiere procesamiento. Requiere alto nivel de experticia.	Costoso
RADAR	ERS, JERS, Radarsat, ALOS PALSAR	Fina	30	Las señales penetran a través de las nubes. Pueden cubrir grandes áreas con suficiente frecuencia	Podría no trabajar bien en regiones montañosas	Libre, Costoso
LIDAR	GLAS	Fina	0,5 - 5	Genera imágenes de terrenos a alta precisión. Alta penetración de vegetación	Su uso se restringe a pequeñas áreas, debido a su elevado costo. Es el único sensor LIDAR en una plataforma satelital, disponible en ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite)	Costoso

Fuente: Elaboración propia con base en (Olander et al., 2008)

Tabla 2. Tabla de sensores remotos aplicables a Colombia

SENSOR	ESCALA	RESOLUCIÓN (metros)	AGENCIA
MODIS Terra/Aqua	Gruesa	250	NASA
Envisat MERIS		250 - 300	ESA
CBERS2-WFI		260	INPE
SAC-C/MMRS		170	CONAE
Landsat TM, ETM+	Fina	30	NASA
CBERS2-CCD		20	INPE
DMC		32	DMC International Imaging
IRS		56	ISRO
SPOT 4/5		10, 20	SPOT IMAGE
ASTER Terra		15	NASA
SAC-C/HRTC		20	CONAE
LISS III		25	ISRO
ALOS ANIR-2		10	JAXA
Envisat ASAR		25	ESA
ERS1/2		25	ESA

Fuente: (Cabrera et al., 2011)

características del suelo. Las fotografías aéreas a color registran imágenes en todo el rango del espectro visible, estas pueden resultar costosas y ofrecen un menor nivel de detalle que las pancromáticas. Las fotografías a falso color (Color infrarrojo) son aquellas que permiten ver en uno o más elementos de la misma longitudes de onda del espectro electromagnético, que están fuera del espectro visible.

Las fotografías aéreas son utilizadas como mapas, pero también permiten monitorear cambios dentro de comunidades de plantas, realizar mapas de cambios, identificar parámetros de las plantas tales como altura, densidad, cobertura entre otros (Knap, 1990). También permite la determinación de la deforestación a través

de mapas cobertura de la tierra y la realización de inventarios forestales; aunque no cubren grandes áreas y requieren tiempo y experticia (Olander, 2008).

En la Tabla 3, se presenta un resumen comparativo de los métodos utilizados para estimar las tasas de deforestación de un país a escala nacional, regional y local.

3. TRABAJOS RELACIONADOS EN COLOMBIA

El programa de Evaluación de Recursos Forestales de la FAO (FRA, por sus siglas en Inglés) ha venido desarrollando y utilizando desde 1980, métodos para la

evaluación de los cambios de la cobertura y estimación de las tasas de deforestación en los países latinoamericanos. Uno de los más métodos más utilizados es el sensado

remoto para elaborar mapas de cobertura de bosques y uso de suelos, que permiten

Tabla 3. Comparación entre métodos de estimación de deforestación

METODO	APLICACIÓN	BENEFICIOS	LIMITACIONES	COSTOS
ESTADISTICAS NACIONALES DE LA FAO	Estimaciones de la superficie forestal y las tasas netas de deforestación por país	Amplia cobertura de datos en el tiempo Estimaciones basadas en estudios de campo, inventarios forestales y opiniones de expertos Disponibles para todos los países	No proveen detalles de la degradación forestal Los evaluaciones realizadas por país son difíciles de validar Diferentes métodos para evaluar la deforestación	Sin costos.
SENSADO REMOTO	Estudios de deforestación y fragmentación vegetal. Elaboración de mapas de cambio de ocupación del suelo. Análisis de cobertura vegetal y uso del suelo	Permite determinar la degradación forestal Cubre áreas extensas, de difícil acceso. Gran disponibilidad de imágenes gratuitas	La nubosidad limita la adquisición oportuna, periódica y de calidad de las imágenes. En algunas explicaciones resulta costoso. Falta de estandarización en los métodos de procesamiento, validación y análisis.	Puede resultar costoso, depende del tipo de sensor
FOTOGRAFÍA AÈREA	Identificación de áreas degradadas Detección de cambios en la cobertura de la tierra Realización inventarios forestales Estimación de la superficie forestal y tasas de deforestación Generación de índices de vegetación	Permite estudios de deforestación a nivel de país No está limitada por la nubosidad Fotografías de alta resolución Permite una buena validación de los datos	Insuficiente calidad de datos Carencia de tecnología de fácil utilización No cubre grandes áreas Requiere tiempo y experticia Se requiere alta capacidad procesamiento	Costo moderado

Fuente: (Olander, 2008; Cabrera et al., 2011)

determinar las áreas deforestadas de los países.

En Colombia se han realizado estudios sobre la variación espacio-temporal,

utilizando imágenes provenientes de satélites y fotografías aéreas. El primer mapa de bosques de Colombia elaborado en 1966 se llevó a cabo a partir de fotografías aéreas y verificaciones en campo. El segundo fue elaborado en 1978 por el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), INDERENA (Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente) y CONIF (Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal) (Aulló, 2013).

En 1996 el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) elaboró el Mapa de Coberturas Vegetales, Uso y Ocupación del Territorio mediante el procesamiento de 67 imágenes de satélite Landsat TM, definiendo 10 grandes clases de cobertura e identificado un total de 39 unidades o tipos de vegetación, agrupados por regiones, condición edáfica y de humedad (Aulló, 2013).

Para los dos períodos comprendidos entre los años 2000 – 2002 y 2005 – 2009 el IDEAM junto a el SINA (Sistema Nacional Ambiental), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y Sistema de Parques Nacionales Naturales (PNN); elaboraron los mapas de cobertura terrestre para todo el país (Aulló, 2013).

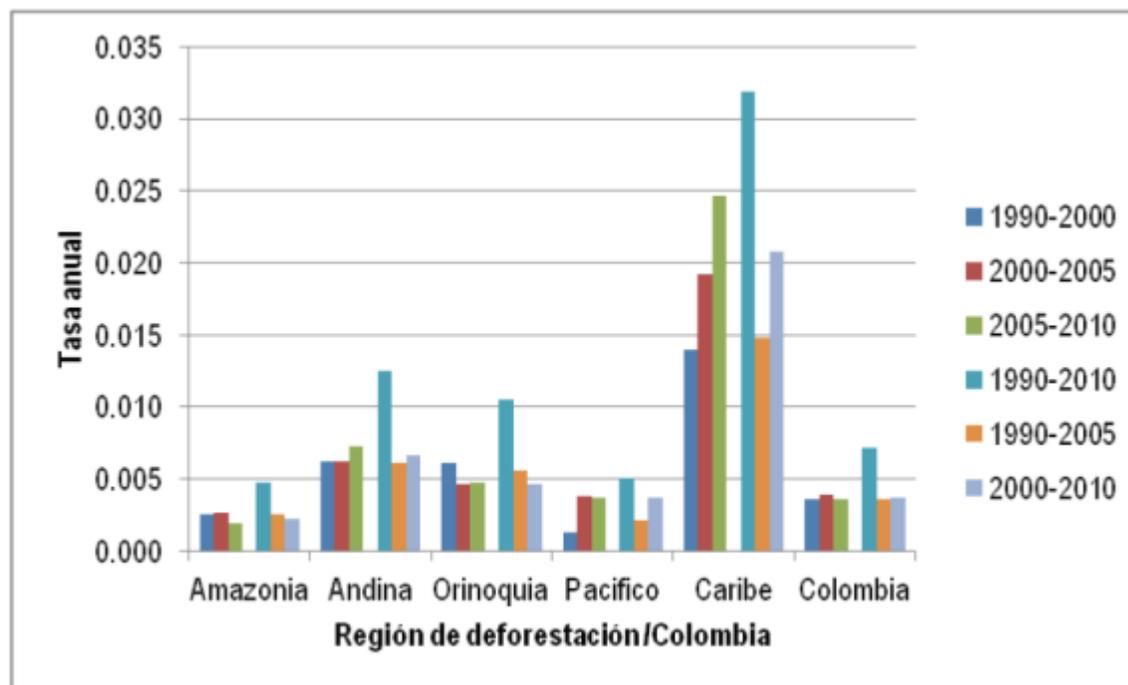
En los períodos 2000–2002 y 2005–2007 el Departamento de Risaralda elaboró los mapas de coberturas del Parque Natural Los Nevados, el Parque Nacional Natural Macizo del Tatamá y Santuario de Fauna y Flora Otún Quimbaya; para ello se utilizaron imágenes LANDSAT.

En Julio de 2011, la Corporación Nacional de Investigación y Fomento forestal (CONIF) y la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), llevaron a cabo una actualización de los mapas de usos de la tierra para catorce municipios del Departamento de Risaralda a escala 1:25.000, utilizando 18 imágenes del satélite RapidEye con una resolución de 5 metros (Aulló, 2013).

En la microcuenca El Llanito, localizada en el mismo municipio de Santander, se llevó a cabo un estudio comparativo de la vegetación y uso del suelo entre las décadas 1960 y 1990, utilizando sensores ópticos y verificación en campo. Basados en la metodología IGAC de 2000, se identificaron ocho tipos de coberturas vegetales, cinco coberturas para usos de suelos y cuatro coberturas hídricas, además se obtuvo: una deforestación de 4.635,26 ha de bosque natural, aumento de 663,83 ha de bosque secundario, incremento de 1.639,09 ha de pastos mejorados y ampliación del espejo de agua ciénaga El Llanito en 318,05 has (Castellanos *et al.*, 2011).

En el año 2011 el IDEAM, junto al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, publicó el resultado del “Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia”, esto lo hizo utilizando sensores remotos. El estudio arrojó la tasa anual de deforestación por regiones del país de los años 1990, 2000, 2005 y 2010 (Ver figura 1) (González *et al.*, 2011).

En la ciudad de Ibagué se llevó a cabo un análisis multitemporal sobre las áreas



verdes en la Microcuenca Hato de la Virgen, utilizando fotografías aéreas

digitales de los años 1993, 2003 y 2009, determinando la distribución espacial,

Figura 1. Tasas anual de pérdida de bosque (Años 1990, 2000, 2005, 2010). Tasas implícitas anuales para el total nacional y las regiones de deforestación.

Fuente: (González et al., 2011)

patrón y métrica. Los resultados obtenidos mostraron, que la microcuenca, presenta un alto grado de urbanización que aumenta con los años y los espacios que pueden conformar nuevas áreas verdes desaparecen constantemente (Díaz *et al.*, 2014).

En el Municipios de Palmira y Cerrito en el Valle del Cauca entre el 2013 y 2014, se desarrolló una metodología, para la generación de índices de vegetación con una revisita controlada, a partir de fotografías aéreas capturadas desde una cámara multiespectral, con el fin de que sirva de insumo para el monitoreo y seguimiento del cultivo de caña de azúcar (García *et al.*, 2014).

En el municipio de Barrancabermeja, se desarrolló un análisis multitemporal sobre el Humedal el castillo utilizando fotografías áreas de los años 1976, 1984, 1988, 1992 y 2004. El objetivo de este estudio era determinar la evolución temporal de la superficie del espejo de agua del humedal El Castillo, del cual se pudo concluir que esta se ajusta a un modelo de regresión cuadrática $R^2=0,972$ (Meza *et al.*, 2015).

En la Tabla 4 se registran otros trabajos realizados en el país por entidades no oficiales, relacionados con el procesamiento de imágenes para realizar análisis de cobertura, de suelos y áreas deforestadas.

Tabla 4. : Resumen de trabajos realizados en Colombia utilizando procesamiento de imágenes

TÍTULO	UBICACIÓN	TEMPORALIDAD	SATELITE	SENSORES UTILIZADOS	TIPO DE IMÁGENES	APLICACIÓN
ANÁLISIS DE LA DEFORESTACIÓN Y FRAGMENTACIÓN DE LA COBERTURA BOSCOSEA EN LA CUENCA DEL RÍO GARRAPATAS – ANDES COLOMBIANOS	La cuenca del río Garrapatas (Valle del Cauca, Colombia)	1989-2002	LADNSAT	TM Y ETM+	SATELITAL	Deforestación y Fragmentación de la vegetación natural
ANÁLISIS MULTIESPECTRAL MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT PARA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DEGRADADAS EN EL ÁREA CIRCUNDANTE A LA LAGUNA DE TOTA DEPARTAMENTO DE BOYACA	Laguna de Tota (Boyacá)	2009	LADNSAT	EMT	SATELITAL	Identificación de áreas degradadas
ANÁLISIS DE CAMBIOS EN LA OCUPACIÓN DEL SUELO OCURRIDOS EN SABANAS DE COLOMBIA ENTRE 1987 Y 2001, USANDO IMÁGENES LANDSAT	Sabanas de Colombia(Llanos Orientales)	1987-2001	LADNSAT	TM Y ETM+	SATELITAL	Cambios en la ocupación del suelo
ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL ESPEJO DE	Humedal el Castillo(Barrancabermeja, Santander)	1976, 1984, 1988, 1992, 2004	-	-	FOTOGRAFÍA AEREA	Variación espacial

AGUA DEL HUMEDAL EL CASTILLO, MUNICIPIO DE BARRANCA BERMEJA, SANTANDER, COLOMBIA						
ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL IMPACTO AMBIENTAL EN EL HUMEDAL CAPELLANÍA A TRAVÉS DEL USO DE IMÁGENES MULTISENSOR	Humedal Capellanía (Bogotá)	1950,1960-2014	LADNSAT	Multisensor	SATELITAL SPOT, LANDSAT, IKONOS, RADAR Y FOTOGRAFÍAS AEREAS	Medición deterioro ambiental
VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LA COBERTURA VEGETAL EN LA MICROCUENCA EL LLANITO, SANTANDER, COLOMBIA	El Llanito (Bucaramanga, Santander)	1960 y 1990	-	-	SATELITAL	Análisis de cobertura vegetal y uso del suelo
PEDAGOGÍA Y DIAGNÓSTICO SOBRE LA VARIACION DE LA COBERTURA VEGETAL, 1985-2011, PARA BOYACÁ	Boyacá	1985, 1988, 1992, 1998, 2003, 2007, 2011	LADNSAT	ETM	SATELITAL	Diagnóstico de la variación cobertura vegetal
METODOLOGÍA BÁSICA PARA LA GENERACIÓN DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN MEDIANTE IMÁGENES MULTIESPECTRALES AEROTRANSPORTADAS APLICADA EN CULTIVOS DE CAÑA DE	Palmira y Cerrito (Valle del Cauca)	2013-2014	-	-	FOTOGRAFÍA AEREA	Generación de índice de vegetación mediante imágenes multispectral para el monitoreo y seguimiento de la caña de azúcar.

AZÚCAR.

EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD TEMÁTICA DEL MAPA DE CAMBIO DE BOSQUE PARA LA REGIÓN AMAZÓNICA A COLOMBIA EN EL PERIODO 2010-2012	Región Amazónica (Colombia)	2010-2012	LANDSAT 7	ETM +	SATELITAL	Evaluación de exactitud temática de mapas de cambio de cobertura terrestre
ESTUDIO DE DEFORESTACION POR CULTIVOS ILCITOS EN EL DEPARTAMENTO DEL META	Parque Natural La Macarena	1988-2001 y 2011	LANDSAT 4 y LANDSAT 7	TM Y ETM+	SATELITAL	Analizar cambios en la cobertura vegetal
ESTIMACIÓN DE CONFLICTOS DE USO DE LA TIERRA POR DINÁMICA DE CULTIVOS DE PALMA AFRICANA, USANDO SENSORES REMOTOS. CASO: DEPARTAMENTO DEL CESAR	Cesar	1977,1991,2001 y 2007	LANDSAT	TM,ETM y MSS	SATELITAL	Cambios en las coberturas del suelo
TRANSFORMACIÓN FÍSICO-ESPACIAL DE LOS PAISAJES BOSCOSOS DEL SECTOR SUR DEL PARQUE NACIONAL NATURAL LOS KATIÓS (1989-2010)	Parque Nacional los Katíos	1989 y 2010	LANDSAT 5 y LANDSAT 7	TM Y ETM+	SATELITAL	Análisis de las transformaciones de las coberturas vegetales y los usos del suelo

<p>DETECCIÓN DE CAMBIOS DE LAS COBERTURAS ASOCIADAS A COMPLEJOS DE HUMEDALES Y SU RELACIÓN CON EL SUMINISTRO DE FUNCIONES Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS</p>	<p>135 cuencas hidrográficas (Colombia)</p>	<p>2002 Y 2007</p>	<p>— —</p>	<p>SATELITAL</p>	<p>Detección de cambios en la cobertura de la tierra</p>
<p>ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LAS ÁREAS VERDES EN UNA MICROCUENCA URBANA (IBAGUÉ-COLOMBIA), APOYADO EN LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA</p>	<p>Microcuenca Hato de La Virgen (Ibague, Tolima)</p>	<p>1993, 2003 y 2009</p>	<p>— —</p>	<p>FOTOGRAFÍA AEREA DIGITAL</p>	<p>Cambios en las coberturas del suelo</p>

Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

El sensado remoto es el método de evaluación de la deforestación más usado en Colombia, tanto por instituciones del gobierno, como para las no oficiales. Esto porque permite realizar análisis a gran escala región/país, y es la herramienta más óptima para elaboración de mapas de usos de bosques, usos de suelos y cambios de cobertura.

La fotografía aérea digital es una buena herramienta, para analizar áreas pequeñas; y cuando es necesario identificar especies dentro de una comunidad. Además gracias a la alta resolución espacial permite tener imágenes de gran detalle, muy útiles en la realización de inventarios forestales y estimación de áreas degradadas de bosques.

Los datos estadísticos de la FAO, son una herramienta poco usada en el país para

estimaciones de deforestación y degradación, pero si se sumaran a los estudios que utilizan fotografía aérea o sensado remoto, serían un buen referente para validar los métodos, análisis y datos obtenidos con la teledetección y fotografía aérea.

5. 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.
- Asner, G. (2009). *Tropical forest carbon assessment: integrating satellite and airborne mapping approaches*. En: Environmental Research Letters. No. 4 (2009) 034009 (11p).
- Aulló, M. (2013). *La teledetección como herramienta para la evaluación de la vulnerabilidad de ecosistemas forestales latinoamericanos frente al cambio climático: fragmentación y conectividad*. ESTADO DEL ARTE. 18,22p.
- 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).
- Ballhorn, U., Florian, S., Mason, 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.
- Castellanos, C. (2011). *Variación espacio temporal de la cobertura vegetal en la Microcuenca el llanito, Santander, Colombia*. Boletín Científico Centro de Museos. ISSN 0123 – 3068.
- DeFries R., Achard F., Brown S., Herold M., Murdiyarso D., Schlamadinger B. and DeSouza C. (2006). *Reducing greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries: Considerations for monitoring and measuring*. Report of the Global Terrestrial Observing System (GTOS) number 46. GOFCC-GOLD report 26.
- Díaz, M. (2014). *Análisis multitemporal de las áreas verdes en una microcuenca urbana (ibagué-colombia), apoyado en las tecnologías de la información geográfica*. Memorias XVI Simposio Internacional SELPER 2014.
- FAO, (Food and Agricultural Organization of the United Nations) (2001). *Global forest resources assessment 2000* FAO. Forestry paper. 140 479 p.
- FAO, (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2006). *Global forest resources assessment 2005-main report* FAO Forestry Paper No. 1.
- 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.

- Grainger, A. (1996). *An evaluation of the FAO tropical resource assessment*, 1990 Geogr. J. 162 73–9 p.
- González, J.J., Etter, A.A., Sarmiento, A.H., Orrego, S.A., Ramírez, C., Cabrera, E., Vargas, D., Galindo, G., García, M.C., Ordoñez, M.F. (2011). *Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Bogotá D.C., Colombia. 64 p.
- Knapp, P.A.; Warren, P.L.; and Hutchinson, C.F. (1990). *The use of large-scale aerial photography to inventory and monitor arid rangeland vegetation*. Journal of Environmental Management 31:29-38 p.
- Matthews, E. (2001) *Understanding the FRA 2000*. (Washington, DC: World Resources Institute).
- Ortega P., S.C., A. García-Guerrero, C-A. Ruíz, J. Sabogal. & J.D. Vargas (eds.) (2010). *Deforestación Evitada. Una Guía REDD + Colombia*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; Conservación Internacional Colombia; Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF); The Nature Conservancy; Corporación Ecovera; Fundación Natura; Agencia de Cooperación Americana (USAID); Patrimonio Natural - Fondo para la Biodiversidad y Áreas Protegidas y Fondo para la Acción Ambiental. Bogotá. 72p.nmx
- UNFCCC, (2006). *Background paper for the workshop on reducing emissions from deforestation in developing countries*. Part I. Scientific, socio-economic, technical and methodological issues related to deforestation in developing countries Working paper No.1 (a)
- 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.