



# Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia



# Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia



**JUAN MANUEL SANTOS CALDERÓN**

Presidente de la República

**BEATRIZ ELENA URIBE BOTERO**

Ministra de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

**SANDRA BESSUDO LION**

Alta Consejera Presidencial para la Gestión Ambiental, la Biodiversidad y el Cambio Climático

**CARLOS CASTAÑO URIBE**

Viceministro de Ambiente

**RICARDO JOSÉ LOZANO PICÓN**

Director General Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

**LUZ MARINA ARÉVALO SÁNCHEZ**

Subdirectora Ecosistemas e Información Ambiental – IDEAM

**EDITORES**

Armando Hilario Sarmiento López

Andrés Alejandro Etter Rothlisberger

José Julián González Arenas

Sergio Alonso Orrego Suaza

**FOTOGRAFÍAS DE LA CARÁTULA**

Lina María García Flórez

Wilson Giraldo Pamplona

Ronan Montañés Valencia

Sebastián Ramírez Echeverri

**DISEÑO CARÁTULA**

Grupo Comunicaciones – IDEAM

**DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**

Mauricio Ochoa P. - Editorial Scripto Ltda.

**IMPRESIÓN Y ACABADOS**

Editorial Scripto Ltda.

PBX: 756 20 03

Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM

Septiembre de 2011, Colombia

**ISBN: 978-958-8067-48-3**

**CÍTESE COMO:**

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.

2011, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total debe ser autorizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.

Este trabajo fue financiado por la Fundación Gordon y Betty Moore, proyecto "Capacidad Institucional Técnica y Científica para Apoyar Proyectos de Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación –REDD– en Colombia", Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), Fundación Natura.

Impreso en Colombia - *Printed in Colombia*

**MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL  
INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM**

**RICARDO JOSÉ LOZANO PICÓN**  
Director General

**CAROLINA CHINCHILLA TORRES**  
Secretaria General

**CONSEJO DIRECTIVO**

**BEATRIZ ELENA URIBE BOTERO**  
Ministra de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

**LUÍS ALFONSO ESCOBAR TRUJILLO**  
Representante de las CARs

**GERMÁN CARDONA GUTIÉRREZ**  
Ministro de Transporte

**OSCAR JOSÉ MESA SÁNCHEZ**  
Representante del Consejo Nacional de Ciencia y  
Tecnología

**HERNANDO JOSÉ GÓMEZ RESTREPO**  
Director Departamento Nacional de Planeación

**JORGE BUSTAMANTE ROLDÁN**  
Director del Departamento Administrativo Nacional de  
Estadística-DANE

**ADRIANA SOTO CARREÑO**  
Designada de la Presidencia de la República

**DIRECTIVAS**

**LUZ MARINA ARÉVALO SÁNCHEZ**  
Subdirectora de Ecosistemas e Información Ambiental

**OMAR FRANCO TORRES**  
Subdirector de Hidrología

**MARGARITA GUTIÉRREZ ARIAS**  
Subdirectora de Estudios Ambientales

**ERNESTO RANGEL MATILLA**  
Subdirector de Meteorología

**MARÍA TERESA MARTÍNEZ GÓMEZ**  
Jefe de Oficina Servicio de Pronóstico y Alertas

**ALICIA BARÓN LEGUIZAMÓN**  
Jefe de la Oficina de Informática (E)

**LILIANA MALAMBO MARTÍNEZ**  
Jefe Oficina Asesora de Planeación

**FERNEY BAQUERO FIGUEREDO**  
Jefe Oficina Asesoría Jurídica

**MARTHA DUARTE ORTEGA**  
Jefe Oficina de Control Interno (E)

**MARCELA SIERRA CUELLO**  
Coordinadora Grupo Comunicaciones

## **AUTORES**

José Julián González Arenas

Andrés Alejandro Etter Rothlisberger

Armando Hilario Sarmiento López

Sergio Alonso Orrego Suaza  
Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín

Cristian David Ramírez Sosa

Edersson Cabrera Montenegro

Diana Marcela Vargas Galvis

Gustavo Galindo Gracia

María Claudia García Dávila

María Fernanda Ordóñez Castro

## **COORDINACIÓN Y SUPERVISIÓN**

María Claudia García Dávila  
Coordinadora General

María Fernanda Ordoñez Castro  
Asistente de Coordinación

Armando Hilario Sarmiento López  
Coordinador Componente Proyecciones de Deforestación

José Julián González Arenas  
Equipo Técnico Componente Proyecciones de Deforestación

Andrés Alejandro Etter Rothlisberger  
Asesor Componente Proyecciones de Deforestación

Sergio Alonso Orrego Suaza  
Asesor Componente Proyecciones de Deforestación

## **AGRADECIMIENTOS**

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, agradece al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, a la Fundación Gordon y Betty Moore y a la Fundación Natura, y a las siguientes entidades que contribuyeron al logro de esta publicación, por el apoyo e información suministrada:

### **INSTITUCIONES**

- Pontificia Universidad Javeriana – Sede Bogotá
- Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín
- Clark University - Worcester, MA (USA)
- Proyecto SIMCI - UNODC

### **PERSONAS NATURALES**

- Ron Eastman - Clark Labs/ Clark University
- James Toledano - Clark Labs/ Clark University
- Paulo Arévalo - Pontificia Universidad Javeriana

**Proyecto “Capacidad Institucional, Técnica y Científica para Apoyar Proyectos de Reducción de Emisiones Por Deforestación y Degradación –REDD– en Colombia”**

**Comité Técnico**

**Andrea García Guerrero**

Coordinadora Grupo de Mitigación de Cambio Climático  
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

**Xiomara Sanclemente Manrique**

Directora de Ecosistemas  
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

**Luz Marina Arévalo Sánchez**

Subdirectora Ecosistemas e Información Ambiental Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales  
-IDEAM-

**María Margarita Gutiérrez Arias**

Subdirectora de Estudios Ambientales  
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

**Ana Cristina Villegas Restrepo**

Oficial de Proyecto  
Fundación Gordon y Betty Moore

**Elsa Matilde Escobar Ángel**

Directora Ejecutiva  
Fundación Natura

**Álvaro Javier Duque Montoya**

Profesor Asociado  
Departamento de Ciencias Forestales,  
Universidad nacional de Colombia

**Coordinación General**

María Claudia García Dávila  
María Fernanda Ordóñez Castro  
Juanita González Lamus  
Carlos Alberto Noguera Cruz  
Henry Alterio González

**Equipo Técnico Carbono**

Álvaro Javier Duque Montoya  
Adriana Patricia Yepes Quintero  
Diego Alejandro Navarrete Encinales  
Juan Fernando Phillips Bernal  
Lina María Carreño Correa  
Keneth Roy Cabrera Torres  
Esteban Álvarez Dávila  
Walter Gil Torres

**Equipo Técnico Procesamiento Digital de Imágenes**

Edersson Cabrera Montenegro  
Diana Marcela Vargas Galvis  
Gustavo Galindo García  
Lina Katherine Vergara Chaparro  
Ana María Pacheco Pascagaza  
Juan Carlos Rubiano Rubiano  
Paola Giraldo Rodríguez  
Edilia González Mateus  
Luisa Fernanda Pinzón Flores  
Edwin Iván Granados Vega  
Paola Margarita Pabón Otálora  
Karol Constanza Ramírez Hernández  
Daniel Alberto Aguilar Corrales  
Henry Omar Augusto Castellanos Quiroz  
Helio Carrillo Peñuela

**Equipo Técnico Proyecciones de Deforestación**

Andrés Alejandro Etter Rothlisberger  
Armando Hilario Sarmiento López  
José Julián González Arenas  
Sergio Alonso Orrego Suaza  
Cristian David Ramírez Sosa

**Equipo Técnico Componente Tecnológico**

María Liseth Rodríguez Montenegro  
Eduin Yesid Carrillo Vega  
Emilio José Barrios Cárdenas

**Equipo Técnico Proyecto Piloto REDD**

Adriana Patricia Yepes Quintero  
William Giovanni Laguado Cervantes  
Johana Herrera Montoy

## CONTENIDO GENERAL

<b>PRESENTACIÓN</b> .....	9
<b>OBJETIVOS</b> .....	11
<b>CAPITULO 1:</b> <b>ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES AGENTES Y DETERMINANTES DE LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA</b> .....	13
INTRODUCCIÓN .....	15
AGENTES Y DETERMINANTES DE LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA.....	16
<b>CAPITULO 2:</b> <b>MODELOS Y SISTEMAS PARA CARACTERIZAR Y PROYECTAR LA TRANSFORMACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS DE BOSQUE</b> .....	21
INTRODUCCIÓN .....	23
CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE CAMBIO EN LA COBERTURA Y EL USO DE LA TIERRA.....	25
TENDENCIAS EN LA MODELACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LOS BOSQUES.....	26
RETOS Y LIMITACIONES DE LOS MODELOS DE CAMBIO.....	28
<b>CAPITULO 3:</b> <b>EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS Y SISTEMAS PARA MODELAR Y PROYECTAR LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA</b> .....	29
INTRODUCCIÓN .....	31
PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA MODELACIÓN Y PROYECCIÓN ESPACIAL DE LA DEFORESTACIÓN A NIVEL NACIONAL .....	32
DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS Y SISTEMAS DE MODELACIÓN EVALUADOS ..	36
EVALUACIÓN DE TÉCNICAS Y SISTEMAS DE MODELACIÓN .....	39

RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA MODELACIÓN Y PROYECCIÓN ESPACIAL DE LA DEFORESTACIÓN .....	39
MODELACIÓN ESPACIAL DE LA DEFORESTACIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA.....	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA MODELACIÓN Y PROYECCIÓN DE LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA .....	54
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	59
<b>ANEXOS</b> .....	63

## PRESENTACIÓN

La satisfacción de las necesidades del ser humano conlleva la alteración de su entorno, y entre otros aspectos determina cambios en las coberturas y los usos de la tierra (Harris 1987; Wolman 1993; Márquez 2001; Etter *et al.* 2008). El cambio en la cobertura y el uso de la tierra es un proceso generalizado, acelerado y significativo que en muchos casos puede traer consecuencias negativas para los seres humanos (Agarwal *et al.* 2001). Durante los últimos cincuenta años la transformación de los ecosistemas tropicales, causada principalmente por procesos de deforestación y expansión de la frontera agropecuaria, ha ocasionado impactos sin precedentes en la biodiversidad, el clima y otros servicios ecosistémicos (Upadhyay *et al.* 2006; Uriarte, Schneider y Rudel 2010b). Alrededor de un 35 por ciento del CO<sub>2</sub> producido por actividades humanas se deriva de los cambios en el uso y cobertura de la tierra. Los bosques de tierras bajas de Colombia han sido transformados substancialmente, como lo evidencia la cifra de reducción neta aproximada del 15 por ciento desde 1970 calculada por Etter (1998). Como resultado, este tipo de cambios han generado perturbaciones climáticas, socioeconómicas y políticas que a su vez han afectado la calidad de vida de la población en todo el mundo (Turner *et al.* 2007; Uriarte, Schneider y Rudel 2010b).

Entender el funcionamiento de estos procesos se ha convertido en uno de los principales objetivos de la investigación a nivel mundial, en que la transformación de los bosques tropicales ha recibido especial atención (Geist y Lambin 2001). Sin embargo, son muchos los interrogantes que aún persisten acerca de los determinantes que definen la dinámica de cambio de estos ecosistemas (Geist y Lambin 2002; Bürgi *et al.* 2004). La necesidad por aclarar el funcionamiento de estas dinámicas, se fundamenta en el interés por tratar de modelar de forma precisa su comportamiento, y eventualmente llegar a proyecciones en el tiempo.

El modelamiento se ha convertido en una herramienta cada vez más importante para el análisis de estos impactos (Upadhyay *et al.* 2006). Modelar los cambios en el uso y cobertura de la tierra es crítico para formular políticas ambientales y estrategias de manejo efectivas (Agarwal *et al.* 2001). Actualmente, existen numerosas aproximaciones tanto desde lo teórico como desde lo metodológico, que pueden o no incorporar la dimensión espacial de forma explícita. Sin embargo, debido a que estas transiciones constituyen procesos complejos que ocurren en múltiples escalas espaciales y temporales, al tiempo

que exhiben propiedades emergentes que resultan de la acción acumulada de múltiples agentes (Turner *et al.* 2007), cualquier iniciativa para modelar siempre tendrá implícito un alto grado de simplificación. Por definición cualquier modelo se queda corto al tratar de incorporar todos los aspectos de la realidad, pero también provee información valiosa acerca del comportamiento del sistema dentro de un rango de condiciones (Veldkamp y Lambin 2001).

En Colombia, la mayor parte de la deforestación actualmente se localiza en terrenos propiedad del Estado, y se da por colonización no planeada y generalmente ilegal (Etter *et al.* 2006c). Poco se sabe del cambio al interior de los diferentes ecosistemas. Los estudios existentes son principalmente descriptivos y limitados en cuanto a su capacidad para predecir la dinámica futura de las transformaciones (Etter *et al.* 2006b). Existe entonces la necesidad de desarrollar modelos con una base teórica sólida, que puedan ser probados de forma empírica utilizando datos reales y que tengan una buena capacidad predictiva (Etter *et al.* 2006b).

En el contexto de los Proyectos para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD), los modelos suelen orientarse a conocer la cantidad o localización futura de los cambios en la cobertura forestal (Acharh *et al.* 2009). Esta información es fundamental para el establecimiento de una línea base espacio-temporal de deforestación en una región de referencia, en el área del proyecto y en la franja que se presume ocurrirán potenciales fugas (BioCarbon Fund 2008). Finalmente, constituye un paso clave para la estimación de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como consecuencia de la deforestación (Kim 2010).

El presente documento compila los resultados del análisis y evaluación de los procesos de deforestación en Colombia. El capítulo I presenta una revisión general de la literatura nacional e internacional para identificar los principales determinantes de los procesos de transformación de los ecosistemas de bosque tropical colombiano. En el capítulo II se lleva a cabo una síntesis de las principales revisiones de literatura disponibles en el tema de modelos empleados para caracterizar y proyectar la transformación de los bosques, analizando las alternativas metodológicas más pertinentes para el caso colombiano y los proyectos REDD. En el capítulo III se evalúan los resultados del ejercicio de modelación y de la proyección espacial de la deforestación en Colombia, obtenidos a partir del uso de diferentes herramientas metodológicas y del trabajo a diferentes escalas espaciotemporales. Finalmente, el capítulo IV contiene un conjunto de recomendaciones para mejorar, a partir de la optimización del proceso de modelación, la elaboración de escenarios de referencia, escenarios de emisiones y líneas base para la implementación de proyectos REDD en Colombia.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

Analizar los determinantes y evaluar un conjunto de aproximaciones metodológicas para modelar y proyectar la deforestación en Colombia.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

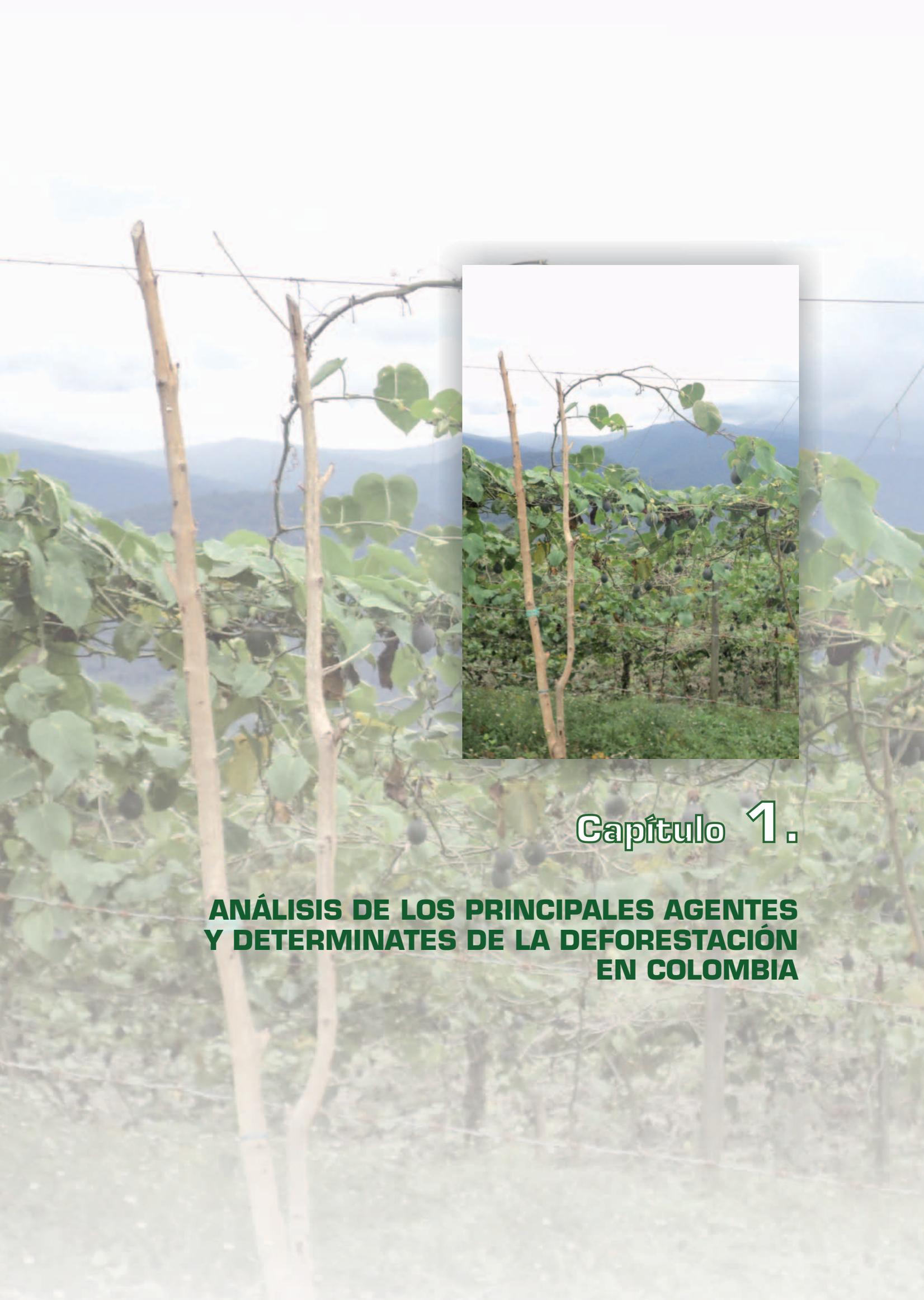
Identificar y describir los principales determinantes de la deforestación en Colombia

Identificar un conjunto de modelos aplicables a la modelación de los procesos de transformación de los bosques colombianos.

Evaluar un conjunto de aproximaciones metodológicas para modelar y proyectar los procesos de transformación de los ecosistemas de bosque en Colombia.

Dar recomendaciones para mejorar la modelación y proyección de la deforestación en Colombia.





## Capítulo 1.

# **ANÁLISIS DE LOS PRINCIPALES AGENTES Y DETERMINANTES DE LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA**



## INTRODUCCIÓN

En Colombia diferentes entidades gubernamentales han intentado identificar los principales determinantes de la deforestación. La Política Nacional Ambiental (Min. Ambiente *et al.* 1994), señaló como principales causas la expansión de la frontera agrícola, actividades lícitas e ilícitas, así como la extracción de madera para satisfacer el consumo de leña. La Política de Bosques (Min. Ambiente *et al.* 1996) discriminó en orden de importancia las siguientes causas de la deforestación a nivel nacional: expansión de la frontera agropecuaria, colonización, construcción de obras de infraestructura, cultivos ilícitos, consumo de leña, incendios forestales y producción de madera para la industria y el comercio. El Plan Nacional de Desarrollo Forestal (Min. Agricultura *et al.* 2000), identificó como causas de la deforestación la expansión de actividades agropecuarias no sostenibles, el uso intensivo de leña, la construcción de obras de infraestructura, las actividades mineras, los factores de orden público y el establecimiento de cultivos ilícitos. En el año 2004, el Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia establece como determinantes fundamentales de la deforestación la expansión de la frontera agrícola y los incendios. Finalmente, el documento Visión Colombia 2019 (DNP 2007) atribuye los procesos de deforestación a la expansión de la frontera agropecuaria y la colonización, incluidos los cultivos ilícitos, seguidos en importancia por la extracción de madera y los incendios forestales.

Aunque existen discrepancias en la importancia relativa de los determinantes identificados, se alude de manera reiterada a la expansión de la frontera agrícola, incluyendo los cultivos ilícitos, y a la extracción de madera con fines comerciales o para uso doméstico. Sin embargo, ninguna de las entidades aporta datos que soporten de forma contundente sus argumentos, ni se discrimina el análisis de la deforestación por regiones. En el país existen diferencias regionales en las características biofísicas que configuran patrones distintos del uso de la tierra. Por tanto, es dable pensar en diferencias en las dinámicas de la deforestación a escalas subnacionales (Etter *et al.* 2006).

La identificación y análisis de las causas directas y subyacentes de la pérdida o deterioro de la cobertura boscosa, es un paso necesario para modelar y proyectar la deforestación, que debe partir de una base teórica y conceptual sólida. En este sentido existen dos marcos principales de aproximación a los determinantes de la deforestación. Geist y Lambin (2001) proponen una síntesis conceptual de las relaciones entre causas directas y subya-

centes, el uso de la tierra y las cobertura terrestres, con base en una amplia revisión de estudios de deforestación tropical<sup>1</sup>. Kaimowitz y Angelsen (1998) plantean una aproximación teórica similar para estudiar la deforestación<sup>2</sup>. Sin embargo, en su propuesta se parte de la identificación de los agentes de la deforestación (pequeños agricultores, ganaderos, leñadores, etc.) y de su importancia relativa en la dinámica mediante el análisis de los procesos de “toma de decisiones”.

En el presente capítulo se desarrolla un análisis descriptivo de los principales agentes, causas directas y causas subyacentes de la transformación de los bosques en el territorio nacional (modificado de BioCarbon Fund 2008 e IDESAM *et al.* 2008).

## AGENTES Y DETERMINANTES DE LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA

### AGENTES DE TRANSFORMACIÓN DE LOS BOSQUES

Se identifican cuatro grandes grupos de agentes importantes para el análisis de los procesos de transformación de la cobertura boscosa a nivel nacional: Agricultores, Ganaderos, Empresas mineras y Actores armados. Los comportamientos o decisiones de los diferentes grupos, pueden llegar a determinar tanto procesos de deforestación como procesos de recuperación de bosques.

#### *Agricultores*

Este grupo de agentes incluye campesinos y otros productores agrícolas de pequeña, mediana y gran escala asentados en áreas rurales. Se distinguen tres subgrupos de agentes acorde con una producción agrícola de tipo empresarial, subsistencia (colonos y otros pequeños agricultores) o ilícita. Aproximadamente, 43% de la población rural colombiana mayor de 5 años se dedica a actividades agrícolas y pecuarias (DANE 2005). Los cambios en el uso de la tierra derivados de las actividades de este grupo de agentes, constituyen una de las principales causas de la deforestación en el territorio nacional. Esto se explica por la competencia entre las coberturas forestales y los usos agrícolas por el recurso tierra. Los agricultores generalmente se ven incentivados a deforestar si una baja productividad de la tierra no les permite materializar las expectativas de ganancias.

1 La definición de deforestación adoptada por los autores incluye tanto la conversión de bosques a otras coberturas terrestres, así como la degradación de ecosistemas forestales (Geist y Lambin 2001).

2 Los autores no utilizan una definición específica de deforestación. Emplean el término para describir situaciones en los que la cobertura forestal se removió totalmente por un largo período de tiempo. Sin embargo, también usan el término en situaciones de pérdida de biomasa y otros tipos de degradación (Kaimowitz y Angelsen 1998).

## **Ganaderos**

En esta categoría agrupa los agentes dedicados principalmente a la ganadería extensiva (ganado bovino). Se incluyen tanto las personas que mantienen ganado con fines productivos, como aquellas que buscan asegurar la tenencia de la tierra mediante la introducción de ganado en pie. La ganadería en el país posee un inventario aproximado de 23 millones de cabezas, en aproximadamente 40 millones de hectáreas, y genera casi 950.000 empleos, lo que lo convierte en el sector agropecuario que más aporta (25%) a la generación de empleo rural (FEDEGAN 2006).

## **Empresas mineras**

Agrupa los agentes dedicados a la actividad minera formal, incluyendo la exploración petrolera. Aunque el principal impacto de estos agentes no es necesariamente la deforestación, sus actividades si tienen un efecto indirecto en la cobertura boscosa, específicamente debido a las alteraciones generadas por la construcción de vías de acceso, que permiten la llegada de otras clases de agentes transformadores.

## **Actores armados**

Los grupos armados son agentes claves en los procesos de transformación de los ecosistemas forestales colombianos. La presencia de actores armados en un área en condiciones de enfrentamiento directo conduce a migración interna, lo cual conlleva el abandono de tierras y a la posible recuperación de los bosques si la duración del conflicto es razonablemente extensa<sup>3</sup>. Sin embargo, también es factible que algunos de los actores armados se dediquen a actividades agropecuarias, principalmente cultivos ilícitos, en las áreas que ejercen control, lo cual puede conllevar procesos de deforestación. Igualmente, la presencia de actores armados afecta el ejercicio de las instituciones del estado y puede limitar el efectivo control sobre los usos del suelo aún en áreas legalmente protegidas.

# **PRINCIPALES DETERMINANTES DE LA DEFORESTACIÓN**

## **Causas directas**

Las causas directas de la deforestación, se relacionan con actividades humanas que afectan directamente el medio natural (Geist y Lambin 2001). Agrupan los factores que operan a escala local, diferentes a las condiciones iniciales estructurales o sistémicas, los cuales se originan en el uso de la tierra y que afectan la cobertura forestal mediante el aprovechamiento del recurso arbóreo, o su eliminación para la dar paso a los usos agropecuarios (Ojima *et al.* 1994; Geist y Lambin 2001; Kanninen *et al.* 2008). La tabla 1 resume los

3 En algunos casos la población desplazada podría moverse a sitios en los que existan ecosistemas forestales, y sobre éstos aumente una presión de tipo antrópico.

principales determinantes de la transformación de los ecosistemas forestales identificados para Colombia, comparándolos con la clasificación hecha por Geist y Lambin (2001; 2002).

**Tabla 1. Principales determinantes de la transformación de los bosques colombianos identificados por el componente de Proyecciones del proyecto<sup>4</sup>.**

Variable/determinante	Agente relacionado	Equivalencia clasificación Geist y Lambin (2001, 2002)
Expansión de la frontera agropecuaria (actividades lícitas e ilícitas).	Agricultores, Ganaderos, Actores armados.	Causa directa: Expansión agrícola (agricultura, ganadería, colonización, etc.)
Minería (efectos indirectos por construcción de vías de acceso).	Empresas mineras.	Causa directa: Extensión de las infraestructuras (Empresa privada).
Variables biofísicas (características de los suelos, clima, etc.).	No aplica.	Causa directa: Otros factores (factores ambientales que predisponen)
Variables demográficas (crecimiento, densidad, estructura, etc.).	Agricultores, Ganaderos	Causa subyacente: Factores demográficos (crecimiento, migración, distribución, ciclo de vida, etc.)
Crecimiento de los precios de los <i>commodities</i> en los mercados internacionales	Agricultores, Ganaderos, Actores armados, Empresas mineras.	Causa subyacente: Factores económicos (Variables especiales)
Mercado laboral.	Agricultores, Ganaderos, Empresas mineras.	Causa subyacente: Factores económicos.
Políticas agrarias y de tierras (ausencia, incentivos perversos, etc.).	Agricultores, Ganaderos, Actores armados, Empresas mineras.	Causa subyacente: Factores políticos y institucionales (políticas formales, derechos de propiedad, etc.)
Tecnologías de la producción	Agricultores, Ganaderos, Actores armados, Empresas mineras.	Causa subyacente: Factores tecnológicos (cambios agrotecnológicos, factores de producción, etc.)

### Causas subyacentes

Las causas subyacentes o procesos sociales son factores que refuerzan las causas directas de la deforestación o degradación forestal (Kaimowitz y Angelsen 1998; Geist y Lambin 2001; Geist y Lambin 2002). Agrupan complejas variables sociales, políticas, económicas, tecnológicas, y culturales, que constituyen las condiciones iniciales en las relaciones estructurales existentes entre sistemas humanos y naturales (Geist y Lambin 2001)<sup>5</sup>.

Históricamente, la economía nacional ha sido afectada por varios factores importantes, los cuales han modificado los impactos causados por el ser humano en el ambiente biofísico (modificado de Etter *et al.* 2008):

<sup>4</sup> Las variables se listan sin orden de importancia. Se trata de variables interrelacionadas.

<sup>5</sup> En términos espaciales, las causas subyacentes podrían operar a nivel local, o indirectamente desde lo nivel nacional o incluso lo global (Geist y Lambin 2001). Debido a que las relaciones son menos directas y a que la información disponible es escasa o de baja calidad, resulta más difícil establecer vínculos claros entre los factores subyacentes y la deforestación y degradación (Kaimowitz y Angelsen 1998).

- Consolidación de la tendencia de urbanización, impulsada por la creciente industrialización en las ciudades principales.
- Saturación de tierras de pequeños propietarios en la región Andina, con el subsecuente incremento en la migración a las zonas de frontera de los bosques de tierras bajas de la Amazonía y las faldas de los Andes.
- Desarrollo y aumento estable del crecimiento del narcotráfico que ha invadido progresivamente las fronteras agrícolas.
- Creciente conflicto armado reforzado por actividades económicas ilegales.
- Cambio paralelo y substancial en las políticas acerca del ambiente.
- Incursión progresiva en los mercados internacionales con una economía dictada cada vez más por el entorno macroeconómico global.
- Políticas proteccionistas parcializadas a un número limitado de productos agropecuarios.
- Ausencia de una política fiscal que promueva el uso eficiente de la tierra.
- Distribución desigual de la tenencia de la tierra.
- Problemas estructurales de movilidad social con efectos importantes en los mercados laborales.

Todos estos factores han tenido consecuencias importantes en las coberturas terrestres, incluyendo cambios en los patrones de colonización y el abandono de ciertas áreas (Etter *et al.* 2006). Estas dinámicas pueden iniciar o reforzar tanto procesos activos de deforestación como de regeneración de la cobertura boscosa (Grau y Aide 2008). Los procesos de expansión agropecuaria (lícitos e ilícitos), que proliferan sin control bajo el modelo económico y el ambiente sociopolítico reinante, mantienen la deforestación como la tendencia de uso dominante en el país. La falta de mecanismos políticos adecuados permite a los grandes terratenientes mantener y expandir su control sobre el territorio, fenómeno que generalmente está asociado a prácticas violentas e ineficientes de uso de la tierra que convierten grandes zonas de bosque en pastizales con una baja densidad de animales o en sistemas agrícolas poco productivos (Grau y Aide 2008). Simultáneamente, los pequeños agricultores, desplazados y con un mínimo apoyo estatal, se ven obligados a ampliar la frontera agropecuaria o a migrar a las zonas urbanas, lo que en algunos casos genera procesos de recuperación de la cobertura boscosa en las tierras abandonadas.





## **CAPITULO 2.**

**MODELOS Y SISTEMAS PARA CARACTERIZAR  
Y PROYECTAR LA TRANSFORMACIÓN  
DE LOS ECOSISTEMAS DE BOSQUE**



## INTRODUCCIÓN

Los modelos que permiten entender y predecir, así sea de manera parcial, el cambio en el uso de la tierra y las coberturas terrestres, se caracterizan por su inherente complejidad. Complejidad que generalmente se deriva de la necesidad de considerar, y acoplar dinámicas antrópicas y biofísicas de una forma espacialmente explícita. No obstante, una variedad amplia de modelos econométricos, ecológicos y basados en agentes se han propuesto para encontrar soluciones a problemas relacionados con un manejo socialmente óptimo de la tierra, proyectar el efecto futuro sobre ecosistemas naturales y la biósfera, de cambios en el uso de la tierra y las coberturas terrestres o simplemente para ganar conocimiento acerca de éstas interacciones desde diferentes perspectivas (Veldkamp y Lambin 2001; Verburg *et al.* 2002; Turner *et al.* 2007).

Existe un amplio espectro metodológico para caracterizar y proyectar el cambio en el uso y la cobertura de la tierra. Sin embargo, cada aproximación presenta una serie de características y restricciones que deben ser evaluadas de forma rigurosa al momento de seleccionar la más adecuada para tratar de entender y predecir las dinámicas de transformación de interés, conforme a los contextos espaciales y temporales que les son particulares.

La racionalidad al momento de construir un modelo de cobertura y/o uso de la tierra tiene tres objetivos: i) actuar como banco de pruebas para entender las fuerzas determinantes y las dinámicas del cambio; ii) entender las implicaciones económicas y ambientales futuras de los actuales procesos de conversión, y iii) servir como medio para proyectar el impacto de cambios políticos en las tendencias actuales (Pijanowski *et al.* 2002). En todos los casos, el modelo debe ser capaz de predecir el cambio basándose en la evaluación de las condiciones presentes (Eastman *et al.* 2005).

La mayoría de los modelos de cambio en el uso/cobertura se orientan fundamentalmente a entender y predecir el proceso de deforestación, debido a su papel significativo en los ciclos globales del carbono y el agua, la pérdida de biodiversidad y la degradación de la tierra (Schneider 2008). Otra parte importante de la modelación intenta entender tipos de transiciones complejas como la expansión urbana y agrícola, la expansión del área cubierta con pastos, así como la recuperación de la cobertura forestal (Uriarte, Schneider y Rudel 2010a). No obstante, sin importar su objetivo específico, los modelos de cambio en el

uso y cobertura permiten verificar mediante el análisis de escenarios la estabilidad de los sistemas socio-ambientales. Estos modelos tienden a aplicar herramientas de modelación estadística avanzada, con datos espacialmente explícitos para simular los procesos basándose en un conjunto de reglas idealizadas de comportamiento. Mientras que los modelos estadísticos asumen por lo general que los cambios en el uso y cobertura son estacionarios, los modelos de simulación representan los cambios en el tiempo y en relación con alteraciones en las propiedades de un sistema (Turner *et al.* 2007).

Entre los aspectos más importantes que se deben considerar en un modelo de cambio en el uso/cobertura están: i) la forma en que se especificarán los determinantes (*drivers*) y sus interacciones en diferentes escalas; ii) cómo predice la localización de los cambios versus su impacto en términos de cantidad (Veldkamp y Lambin 2001). La creciente demanda de modelos espacialmente explícitos ha conducido al desarrollo de múltiples aproximaciones metodológicas (Veldkamp y Lambin 2001; Verburg *et al.* 2002; Schneider 2008). Las aproximaciones espaciales por lo general usan modelos del tipo autómatas celulares, que simulan el cambio en el uso de la tierra en función de los usos existentes en un área circundante o vecindario, cuya relación la determina un conjunto de relaciones definidas discrecionalmente por el modelador (Verburg *et al.* 2002). La proyección de cambios en el uso de la tierra se suele realizar con dos tipos principales de modelos (Lambin 1997; Stephenne y Lambin 2001; Mas *et al.* 2004): i) modelos empíricos basados en la extrapolación de patrones de cambio observados en un pasado reciente; ii) modelos de simulación basados en la comprensión exhaustiva de los procesos que originan el cambio. La predicción espacial de cambios en el uso/cobertura es posible utilizando los tipos de modelos de la primera categoría.

En la modelación de cambios en ecosistemas forestales se hace énfasis en la transición de bosque a no bosque o deforestación, y mucho menos atención, por la complejidad del fenómeno mismo, se le concede a los procesos de recuperación de la cobertura forestal. De acuerdo con Kaimowitz y Angelsen (1998), los modelos de deforestación tienen diferentes objetivos. Algunos intentan explicar las causas de la deforestación histórica, mientras otros intentan predecir dónde, cuándo o cuánta deforestación ocurrirá en el futuro. Otro objetivo de los modelos de deforestación consiste en el análisis, *a priori*, de la forma en que intervenciones políticas influyen la pérdida de la cobertura forestal. Aunque los distintos objetivos de los modelos de deforestación necesariamente se superponen, algunos métodos y variables son más efectivas para alcanzar objetivos particulares (Lambin 1994; Lambin 1997; Kaimowitz y Angelsen 1998; Mas *et al.* 2004; Achard *et al.* 2009).

El presente capítulo contiene una síntesis de los resultados de la revisión de literatura para el tema de modelos de transformación del uso y cobertura de la tierra, con énfasis en los procesos de deforestación y los sistemas disponibles para su estudio en el territorio nacional.

## CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE CAMBIO EN LA COBERTURA Y EL USO DE LA TIERRA

Existen diferentes aproximaciones a la hora de clasificar los modelos para representar los cambios en el uso y cobertura de la tierra. Upadhyay *et al.* (2006) proponen una estructura general enfocada a los relacionados con los ecosistemas de bosque. Los autores hacen una diferenciación entre los modelos de acuerdo a la(s) disciplina(s) en la(s) cual(es) fueron desarrollados, y los modelos de acuerdo a la aproximación metodológica. Teniendo en cuenta la revisión hecha por los autores, los modelos del primer grupo pueden dividirse en Económicos o Multidisciplinares. Los modelos del segundo grupo son clasificados en cuatro categorías: Modelos conceptuales, Modelos Analíticos, Modelos de programación y de simulación lineal/no lineal, y Modelos empíricos de regresión.

### MODELOS DE ACUERDO A LA DISCIPLINA

Los modelos económicos suelen aplicar técnicas de optimización basadas en análisis integrales a nivel microeconómico, o modelos de equilibrio general en una escala macroeconómica (Kaimowitz y Angelsen 1998; Achard *et al.* 2009). Son los modelos que han recibido más atención, particularmente en la modelación de la deforestación. Los modelos multidisciplinarios se suelen desarrollar para incorporar al análisis las interacciones ecológicas y/o la variable espacio. Los modelos espacialmente explícitos de cambio en el uso de la tierra, que incorporan variables socioeconómicas y biofísicas, se consideran importantes para la proyección de escenarios y la realización de experimentos que mejoren el entendimiento de procesos significativos de cambio en el uso de la tierra (Veldkamp y Lambin 2001; Upadhyay *et al.* 2006).

### MODELOS DE ACUERDO A LA APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

Los modelos conceptuales utilizan diagramas causales y de flujo de las diferentes variables, lo cual constituye el primer paso en cualquier ejercicio de modelación (Lambin 1994; Upadhyay *et al.* 2006). Los modelos analíticos no utilizan datos pero facilitan la representación de teorías dentro de un marco riguroso que permite a los investigadores obtener conclusiones a partir de los supuestos del modelo (Kaimowitz y Angelsen 1998; Upadhyay *et al.* 2006). Los modelos de programación proveen una interfaz entre el comportamiento humano y los procesos biofísicos en términos de la extracción de recursos y cambios en las existencias. Los modelos dinámicos de simulación explican los sistemas complejos con un número reducido de ecuaciones diferenciales o reglas de comportamiento, que permiten explorar de forma rápida los efectos probables de la continuación de las prácticas actuales de uso de la tierra o de cambios en los parámetros culturales o ecológicos asociados (Achard *et al.* 2009). Finalmente, los modelos empíricos estadísticos buscan identificar de forma explícita las causas del cambio en el uso/cobertura, a través de técnicas de análisis multivariado que permiten dilucidar la contribución que hacen las variables exógenas bajo diferentes condiciones socioeconómicas (Upadhyay *et al.* 2006). Sin importar la clasificación que se utilice, el análisis de regresión es la metodología más utilizada (Kaimowitz y Angelsen 1998).

## TENDENCIAS EN LA MODELACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE LOS BOSQUES

### MÉTODOS

A nivel internacional, la metodología más utilizada tanto para análisis espacialmente explícitos como para no explícitos, sigue siendo la regresión. Sin embargo, en décadas recientes ha aumentado el desarrollo de otro tipo de modelos matemáticos enfocados a abordar desde una perspectiva diferente las mismas problemáticas. Tal es el caso de los modelos de programación y simulación; entre ellos, cabe destacar a los modelos de autómatas celulares y de redes neuronales como los que más acogida están empezando a tener al interior de la comunidad científica. En Colombia, también predomina el uso de modelos de regresión para caracterizar y proyectar las dinámicas de cambio observadas. La mayoría de los estudios en la transformación de los bosques colombianos han estado influenciados por la Ecología del Paisaje. Este tipo de trabajos suelen analizar los cambios en el uso y cobertura de la tierra a escala de paisaje, combinando en modelos multidisciplinarios información obtenida de sensores remotos, y datos estadísticos de variables biofísicas y antrópicas. Un grupo más reducido de investigaciones, apoyado en insumos y métodos similares, se han orientado a tratar de explicar y predecir espacialmente estos patrones de transformación para las escalas nacional y regional. Los trabajos desde la teoría económica son mucho más escasos.

### VARIABLES EXPLICATIVAS Y ÁREAS DE ESTUDIO

A nivel internacional, la Amazonía brasileña sigue siendo el área de estudio más explorada por investigadores interesados en modelar la transformación del bosque tropical. Entre las variables explicativas más empleadas están las vinculadas al nivel de accesibilidad, las características de la población y la dinámica de las actividades agropecuarias. En el caso colombiano, la mayoría de la investigación en la temática se han concentrado en caracterizar los procesos históricos de deforestación de bosques de tierras bajas en la región Andina y Amazónica; son escasos los estudios dirigidos a predecir espacialmente, y a escala regional y nacional, la dinámica de ésta u otras transiciones. Esto se debe principalmente a que son comunes las restricciones en términos de disponibilidad y calidad de la información necesaria para modelar las transformaciones. Entre las principales causas analizadas por estas investigaciones se encuentran la accesibilidad (distancia a carreteras y ríos), la expansión de la frontera agropecuaria (incluyendo cultivos ilícitos), los procesos demográficos (tasas de crecimiento, densidad de población), el nivel de gobernanza y los efectos de las políticas nacionales e internacionales.

### MODELACIÓN ESPACIAL DEL CAMBIO

Existen numerosas aproximaciones diferentes para modelar de forma espacialmente explícita los procesos de cambio de la cobertura y el uso de la tierra. En la actualidad, prácticamente cualquier modelo espacial está vinculado a uno o más Sistemas de Información

Geográfica (Eastman *et al.* 2005). Este tipo de modelos generalmente están compuestos por tres componentes principales: un submodelo de cambio en la demanda, un submodelo de potencial de transición, y un submodelo de asignación de cambio. El modelamiento del *cambio en la demanda* busca establecer cuánto del cambio tendrá lugar en un período de tiempo específico. El submodelo de *potencial de transición* busca determinar qué tan probable es que la tierra cambie de un tipo de cobertura a otro, basándose en factores como la aptitud de la tierra para la transición en cuestión y la presencia de determinantes del cambio. Finalmente, los submodelos de *asignación de cambio* se ocupan de identificar cuáles serán las regiones específicas que van a cambiar, dada la demanda y las superficies de cambio potencial (Eastman *et al.* 2005).

## DESEMPEÑO DE LAS TÉCNICAS Y SISTEMAS DE MODELACIÓN

Los estudios comparativos ilustran el amplio rango de resultados posibles que pueden obtenerse de la implementación de un conjunto de modelos científicamente rigurosos (Pontius *et al.* 2008). De la misma forma, los resultados de la comparación del desempeño entre modelos pueden variar, dependiendo del análisis estadístico que se utilice para la evaluación (Eastman *et al.* 2005).

De acuerdo con el estudio de Eastman *et al.* (2005)<sup>6</sup>, la técnica de Redes Neuronales obtuvo buenos resultados en todas las pruebas de evaluación. La Regresión logística, una de las más utilizadas, tuvo un buen desempeño al momento de determinar potenciales de transición relativos, pero resultó ineficiente cuando se usó para tratar de establecer potenciales de transición absolutos. Finalmente, la técnica de Pesos de Evidencia tampoco obtuvo buenos resultados debido a que no cuenta con mecanismos para medir los efectos de interacción (Eastman *et al.* 2005).

En términos de su capacidad para predecir espacialmente el cambio, los resultados del estudio de Pontius *et al.* (2008) muestran que en la gran mayoría de los sistemas analizados<sup>7</sup>, el porcentaje de error es mayor que la cantidad de cambio predicha de forma correcta por los modelos utilizados. Las mejores predicciones se obtuvieron para los lugares donde la cantidad de cambio neto observado en el mapa de referencia fue mayor. Mas y colaboradores (2010) evalúan los mapas de predicción difusa (fuzzy) simulados por el software DINAMICA-EGO y el Land Change Modeler (LCM) del programa IDRISI™. Los resultados muestran que los paisajes simulados de manera más realista, generalmente se obtienen a expensas de reducir la exactitud en la localización. En este aspecto, el software DINAMICA-EGO obtuvo mejores resultados que el LCM. Posteriormente, Mas y colaboradores (2011) llevan a cabo un ejercicio similar para comparar el desempeño de los sistemas CLUE, DINAMICA, CA\_MARKOV y LCM. Los autores concluyen que CA\_MARKOV y DINAMICA son los programas que ofrecen mayor flexibilidad para desarrollar modelos

6 Los procedimientos analíticos de modelación comparados fueron: Bayclass, BPN Neural Network, Mahalclass, Fuzclass, All Combinations Likelihood, Average, Product, Bayes / WofE, Belief, Bayclass with Prior Probability, All Combinations Probability, y Regresión logística.

7 Los sistemas analizados fueron: GEOMOD, SLEUTH, Land Use Scanner, Environment Explorer, Regresión logística, SAMBA, LTM, CLUE-S, y CLUE.

personalizados. IDRISI y DINAMICA obtuvieron los mejores resultados en cuanto a documentación y entorno gráfico.

## MODELOS Y SISTEMAS EN EL CONTEXTO REDD

Achard *et al.* (2009) indican que los modelos utilizados para proyectos de Reducción de Emisiones por Deforestación y degradación (REDD), suelen orientarse a conocer la cantidad o localización futura de los cambios en la cobertura forestal. Sin embargo, la modelación en el contexto REDD sigue siendo un campo poco explorado. Los estudios comparativos son escasos (Ver por ejemplo Kim 2010) y se limitan principalmente a algunas aproximaciones de tipo metodológico como la regresión logística, las redes neuronales y los modelos de autómatas celulares. Los resultados de la revisión indican que los sistemas de modelación que más se utilizan actualmente para modelar escenarios en REDD son el módulo Land Change Modeler del software IDRISI™ (GEOMOD, Redes Neuronales y Regresión Logística) y el programa DINAMICA-EGO (Autómata Celular). Las dos alternativas presentan ventajas y desventajas que deben ser evaluadas por los modeladores a la hora de seleccionar la que mejor se ajuste a sus necesidades.

## RETOS Y LIMITACIONES DE LOS MODELOS DE CAMBIO

Son varios los retos asociados a la generación de modelos de cambio en el uso/cobertura de la tierra. La disponibilidad de información en cantidad suficiente y confiable para la validación del modelo, es probablemente una de las restricciones más relevantes. Aquellos modelos que dependen de cantidades importantes de datos primarios, se suelen caracterizar por generar una información limitada en duración y/o extensión geográfica. Debido a que la localización y magnitud de los cambios son el resultado de decisiones humanas, las principales dificultades están relacionadas con la complejidad inherente a las interacciones entre los seres humanos y los factores ambientales analizados (Lambin 1994; Mas *et al.* 2004). En el caso de los modelos empíricos, la limitación más importante es que los cambios en las coberturas y los determinantes de la deforestación no se encuentran necesariamente en la misma ubicación; adicionalmente, es común la influencia de otros factores que son impredecibles y que alteran los procesos de deforestación. Por lo tanto, sin importar el tipo de modelo que se emplee, las proyecciones a largo plazo de las relaciones entre el cambio y las variables explicativas no resultan confiables (Mas *et al.* 2004).

A pesar de que la predicción de la localización del cambio en la cobertura forestal es relativamente sencilla si se asume cierto nivel de continuidad en las tendencias históricas observadas, la alta dinámica y complejidad de los procesos de transformación del uso y la cobertura de la tierra no garantiza que los modelos empleados para generar estas proyecciones logren el nivel de precisión esperado. Los estudios analizados que destacan un alto nivel de precisión en sus modelos, siguen presentando un alto margen de error en términos reales. Por ende es prácticamente imposible desarrollar modelos de los procesos de cambio en el uso y cobertura de la tierra, y de forma más específica del fenómeno de deforestación, que presenten un alto poder de predicción (Mas *et al.* 2004).



## **CAPITULO 3.**

### **EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS Y SISTEMAS PARA MODELAR Y PROYECTAR LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA**



## INTRODUCCIÓN

El presente capítulo sintetiza los resultados del ejercicio de modelación (Período 1990-2010) y de la proyección de la cantidad y localización de la deforestación en Colombia para el período 2010-2030. Incluye un análisis espacial sub-nacional para el departamento de Antioquia (1980-2000) y un conjunto de conclusiones y recomendaciones para mejorar, a partir de la optimización del proceso de modelación, la elaboración de escenarios de referencia, escenarios de emisiones y líneas base para el caso colombiano.

Los capítulos I y II contienen una síntesis de los determinantes de la deforestación y de las alternativas teóricas y metodológicas disponibles para modelar y proyectar la transformación de los bosques colombianos, con énfasis en el contexto de los Proyectos para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD). Los resultados de este análisis indican que la regresión logística, las redes neuronales y los pesos de evidencia están entre las mejores alternativas para modelar y espacialmente la transición de Bosque a No Bosque. De igual manera, se pudo identificar a los programas IDRISI™ y DINAMICA - EGO como los más utilizados a nivel internacional debido a que presentan ventajas comparativas en relación con los demás sistemas de modelamiento disponibles, y especializados en el cambio del uso y la cobertura de la tierra.

La modelación de la deforestación tiene fundamentalmente dos objetivos principales, identificar las tendencias en la magnitud de la deforestación esperada en mediano plazo e identificar patrones espaciales de localización y dispersión del fenómeno. En el caso colombiano, la modelación espacialmente explícita se abordó desde dos escalas: nacional y sub-nacional. El nivel nacional abarcó todo el territorio continental de Colombia. El análisis sub-nacional se dividió en dos: un análisis regional para construir el consolidado nacional y un ejercicio independiente localizado en el departamento de Antioquia, donde se caracterizaron y analizaron los patrones espaciales y temporales, y las variables (motoras) que explican la deforestación en el departamento. El análisis a nivel nacional abarcó el período 1990-2010. Para el departamento de Antioquia se realizó la modelación del período 1980-2000. Sin embargo, la proyección de la deforestación se desarrolló únicamente para el nivel nacional (período 2010-2030).

La metodología y aproximación teórica utilizadas varían de acuerdo al nivel analizado. El análisis sub-nacional en Antioquia utilizó un modelo econométrico de regresión logísti-

ca para identificar los determinantes de la deforestación observada en el departamento. Para el nivel nacional se comparó el desempeño de un modelo de regresión logística, la modelación mediante redes neuronales y la técnica de pesos de evidencia. Las pruebas llevadas a cabo para evaluar de forma comparativa las técnicas y sistemas de modelación, se enfocaron principalmente en conocer diferencias en cuanto a los niveles de precisión, las variables explicativas incorporadas, y la capacidad predictiva en cuanto a cantidad y localización del cambio en la cobertura de bosque.

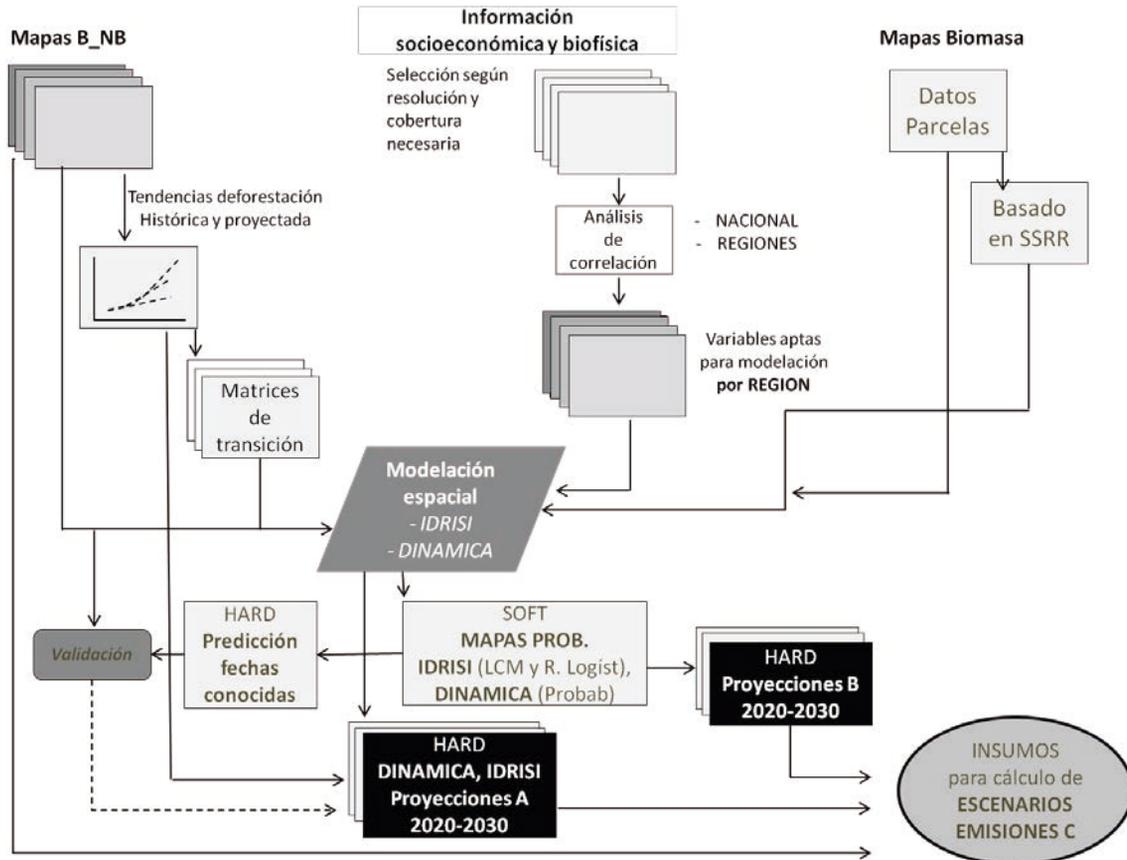
## PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA MODELACIÓN Y PROYECCIÓN ESPACIAL DE LA DEFORESTACIÓN A NIVEL NACIONAL

La figura 1 muestra el diagrama general de los pasos seguidos para caracterizar y proyectar el cambio en la cobertura de bosque a escala nacional y sub-nacional (Regiones de deforestación), para resoluciones de píxel de 250 metros y 1 kilómetro. Se partió del aprovechamiento de los insumos generados por los demás componentes del proyecto (mapas de cobertura, mapas de biomasa, mapas de contenidos de carbono), complementados con información biofísica y socioeconómica disponible y pertinente, obtenida de diferentes fuentes oficiales. Para el caso de la etapa de modelación y proyección del cambio, el detalle de los procedimientos varía de acuerdo al software utilizado<sup>8</sup>.

Aunque las capas de coberturas forestales derivadas de imágenes Landsat y ALOS tenían una resolución de 30m, la mayor parte de las variables explicativas tanto biofísicas (suelos, clima) y todas las socioeconómicas a ser utilizadas en la modelación, no cumplían con el suficiente nivel de detalle, lo que obligó a re-muestrear todas las capas de información a una resolución uniforme de 250m (tamaño de celda de 6.25 ha) y 1km (tamaño de celda de 100 ha).

8 Para conocer el detalle de los procedimientos de las herramientas de modelación utilizadas, se recomienda consultar el manual del IDRISI Taiga (Eastman 2009) y el del software DINAMICA – EGO (Soares y Rodrigues 2009).

Figura 1 Diagrama general de procedimientos para la modelación espacial del cambio en la cobertura de bosque a nivel nacional

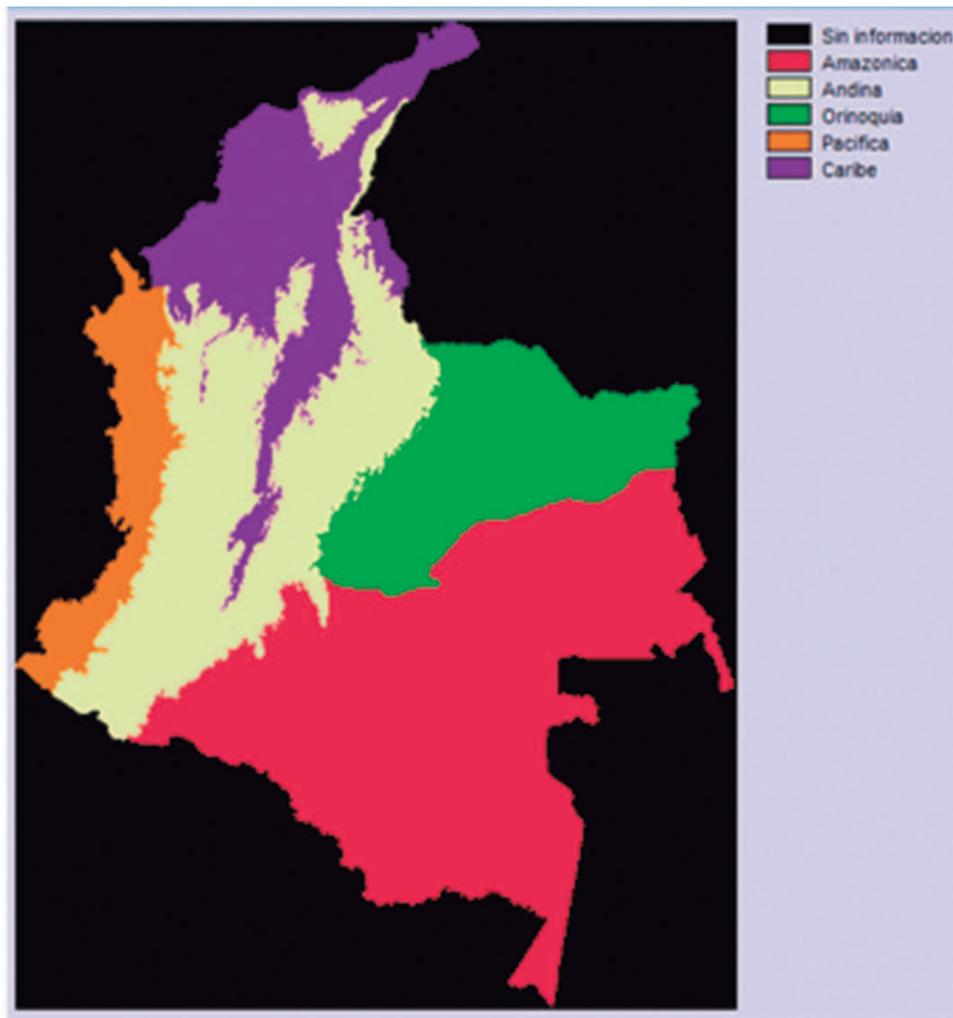


## ETAPAS DE LA MODELACIÓN

### Definición de regiones de deforestación

Teniendo en cuenta la heterogeneidad geográfica del país, ejercicios anteriores de modelación han mostrado la necesidad, ya sea de desarrollar análisis nacionales que incluyan una variable regional o bien análisis regionales independientes (Etter *et al.* 2006). Con este fin se definieron cinco “regiones de deforestación” basadas en las regiones naturales propuestas por Etter *et al.* (2006): Amazonia, Andes, Caribe (Incluyendo Magdalena y Catatumbo), Orinoquia y Pacífico (figura 2).

Figura 2 Regiones de deforestación utilizadas para la modelación nacional de la transformación de los ecosistemas de bosque en Colombia (Modificado de Etter *et al.* 2006)



### *Identificación y selección de variables independientes*

Se llevó a cabo la búsqueda, selección y estructuración en bases de datos de la información social, económica y biofísica pertinente para la modelar y proyectar los procesos de transformación de los bosques a escala nacional y sub-nacional. El alcance de esta actividad dependió de la pertinencia, cobertura, accesibilidad y calidad de la información disponible para los principales determinantes de la deforestación identificados (Ver Capítulo I). Por lo tanto, luego del proceso de selección, el set inicial de variables identificadas se tradujo en un conjunto más reducido que contenía las variables espacialmente explícitas que fueron incorporadas al proceso de modelación.

## Estandarización de las capas

Los pasos desarrollados para estandarizar las capas requeridas en la modelación fueron los siguientes<sup>9</sup>:

- Re-muestreo de las capas de coberturas forestales (Bosque/No Bosque) y de las de las variables socioeconómicas y biofísicas a una resolución de píxel de 250 metros (6.25 ha) y 1 kilómetro (100 ha).
- Sustracción de las áreas sin información de todos los períodos para los que se construyeron capas de cobertura de Bosque/No Bosque (1990, 2000, 2005, 2010).
- Sustracción de las áreas de ecosistemas naturales no boscosos<sup>10</sup> (Etter *et al.* 2006).
- Sustracción de límite continental nacional único<sup>11</sup>.
- Recorte por regiones de deforestación.
- Conversión al formato utilizado por el sistema de modelación respectivo (raster de IDRISI o DINAMICA).

## Reconstrucción de tendencias históricas de las tasas de cambio de la cobertura de bosque

Una vez estandarizadas, las capas de Bosque-No Bosque (1990, 2000, 2005, 2010) sirvieron de insumo para reconstruir las tendencias históricas de cambio en la cobertura de bosque. Se llevaron a cabo los cálculos de las tasas históricas de cambio tanto para el total nacional como para cada región de deforestación.

## Evaluación de las variables independientes

Con el fin de identificar posibles problemas de colinearidad (Green 1979), se realizaron análisis de correlación entre todas las variables explicativas tanto para el conjunto total de datos a nivel nacional, como para cada “región de deforestación” de forma independiente. Esto permitió identificar para cada caso pares de variables con índices de correlación superiores al 70%, entre las cuales se eliminó la que en teoría sería menos informativa.

9 Es importante tener en cuenta que estas modificaciones a las capas originales producidas por el proyecto, dirigidas a mejorar la modelación, también se traducen en diferencias en la cantidad y distribución de la cobertura de bosque que reporta el componente de Proyecciones en el presente informe, con respecto a la misma información producida por el componente de PDI. Esta diferencia es significativamente mayor para el trabajo con una resolución de 250 metros, debido a que se emplearon las versiones no definitivas de los mapas de Bosque/No bosque generados por el proyecto.

10 Esta categoría agrupa todas aquellas coberturas naturales que nunca han sido bosque (como por ejemplo los páramos, sabanas naturales, etc.).

11 Debido a que provenían de fuentes diferentes, las capas de las variables explicativas presentaban límites diferentes, razón por la cual fue necesario utilizar un único recorte para todas.

## Modelación y proyección espacial

Se llevaron a cabo pruebas de modelación para cada una de las regiones de deforestación utilizando el módulo software IDRISI Taiga™ (Modelo de redes neuronales y modelo de regresión logística) y el programa DINAMICA-EGO (Modelo de pesos de evidencia). En cada ejercicio se probaron combinaciones diferentes de las variables explicativas previamente escogidas para encontrar las que mejor explicaran las transiciones analizadas. Una vez obtenido un resultado considerado satisfactorio, éste se utilizaba para modelar, y proyectar mediante escenarios (Pesimista, Optimista y/o Moderado) las cantidades y la localización (hard y soft<sup>12</sup>) de la transición de Bosque a No Bosque en cada región para el período 2010-2030. Finalmente, los resultados de las proyecciones a escala regional fueron consolidados en estimaciones para todo el territorio nacional.

### Definición de escenarios de deforestación

Con el objetivo de dar flexibilidad al ejercicio de modelación, se definieron tres escenarios posibles de deforestación, creados a partir del análisis de las tendencias identificadas para cada una de las regiones (tabla 2).

Tabla 2. Escenarios de deforestación definidos por el componente de Proyecciones

Escenario	Descripción
OPTIMISTA	Escenario conservacionista. Buen nivel de implementación de políticas de conservación.
PESIMISTA	Escenario no conservacionista. Se maximiza el uso de las áreas de bosque. Las políticas de conservación no existen o no son implementadas adecuadamente.
MODERADO	Estado intermedio entre el escenario Optimista y Pesimista.

### Documentación de procesos

Todos los procedimientos y resultados obtenidos en las diferentes pruebas de modelación regional, fueron documentados en bitácoras para permitir su posterior revisión y/o replicación.

## DESCRIPCIÓN DE LAS TÉCNICAS Y SISTEMAS DE MODELACIÓN EVALUADOS

De acuerdo a los objetivos propuestos en este proyecto, se pretende responder a dos interrogantes fundamentales sobre el proceso de deforestación en Colombia: identificar la magnitud esperada del fenómeno y localizar las áreas y patrones espaciales donde se espera que el fenómeno ocurra.

12 Una predicción tipo hard representa un escenario específico de cambio. Una predicción tipo soft es un mapa continuo de vulnerabilidad al cambio y provee una evaluación más exhaustiva de todos los posibles escenarios (Clark Labs 2010).

Para lograr estos objetivos se probaron y evaluaron cuatro métodos o técnicas de modelación, tres de los cuales son útiles para simular patrones espaciales y uno para simular la magnitud de la deforestación. Para los tres primeros se utilizaron las herramientas implementadas en dos programas de SIG (IDRISI Y DINÁMICA-EGO) y para el último se adoptó un método de proyección de la tendencia basado en un modelo logístico.

## REDES NEURONALES – IDRISI TAIGA

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son estructuras de mapeo no lineal basadas en el funcionamiento del cerebro humano. Se empleó el Multi Layer Perceptron (MLP) del módulo Land Change Modeler (LCM)<sup>13</sup> en el software IDRISI Taiga para modelar la transición de bosque a no bosque utilizando la técnica de redes neuronales. El MLP es una de las arquitecturas RNA más populares actualmente por su capacidad para modelar relaciones complejas entre variables (Mas *et al.* 2004). Cuando se utiliza en la modelación de potenciales de transición de coberturas de la tierra, áreas conocidas de cambio son utilizadas por el MLP como zonas de entrenamiento para revelar la relación entre un set de variables explicativas y los niveles de activación de los nodos de salida de la red. Una vez finalizado el entrenamiento, nuevos datos son alimentados a la red, y los niveles de activación pueden ser mapeados para cada clase. Por lo tanto, los mapas de nivel de activación pueden utilizarse para representar el grado de apoyo que el modelo encuentra para el cambio de cobertura considerado (Eastman *et al.* 2005).

## PESOS DE EVIDENCIA – DINAMICA-EGO

En el contexto del cambio en la cobertura de la tierra, la técnica de los Pesos de Evidencia es una aproximación en la que suelen utilizarse probabilidades empíricas para calcular potenciales de transición usando la agregación Bayesiana (Eastman *et al.* 2005). Los Pesos de Evidencia representan la influencia de cada una de las variables en la probabilidad espacial de ocurrencia de una transición. En DINAMICA-EGO, el método se emplea para producir un mapa de probabilidades de transición que muestra las áreas donde el cambio es más propenso a ocurrir (Soares y Rodrigues 2009).

## REGRESIÓN LOGÍSTICA - IDRISI

La Regresión Logística es una técnica popular de modelación debido a que permite relacionar datos de presencia/ausencia de coberturas de la tierra con información disponible para variables explicativas, obteniéndose un valor de probabilidad que puede ser interpretado como un potencial de transición (Eastman *et al.* 2005). Con el fin de complementar los ejercicios de modelación espacial se aplicaron modelos logísticos utilizando la función

13 El LCM es un componente que aún se encuentra en fase experimental; sin embargo resulta una herramienta útil para analizar, modelar y predecir el cambio en la cobertura y uso de la tierra en un determinado lugar (Eastman, 2005).

*logisticreg* de IDRISI para poder explicar la extensión de área de bosque al año 2010 utilizando como variable dependiente: i) la presencia de bosque en el año 2000; ii) la presencia de bosque en en el año 2010; iii) la deforestación del período 2000-2010, y iv) la deforestación del período 1990-2010. La finalidad de este ejercicio fue establecer la diferencia en capacidad predictiva frente a la extensión de bosque al año 2010.

## MODELACIÓN DE TENDENCIAS DE DEFORESTACIÓN

Adicional a los modelos espacialmente explícitos, se elaboraron escenarios potenciales del comportamiento de la deforestación a partir de los datos observados para los periodos 1990, 2000, 2005 y 2010, para cada una de las regiones en las que se dividió el país. Estos escenarios se generaron utilizando un modelo tipo logístico (función sigmoideal), el cual permite simular una curva de comportamiento del fenómeno parametrizada a partir de los datos observados. El modelo logístico tiene implícita una asíntota o límite superior. Dado que el área en cobertura forestal tiene un límite (el área total en bosques del país) y que se puede trabajar bajo el supuesto que parte de esta área no es deforestable (áreas protegidas), se puede utilizar el modelo logístico para simular el comportamiento de la deforestación, a partir de datos observados.

Para parametrizar el comportamiento de la deforestación se utiliza el siguiente modelo logístico:

$$D_t = \frac{A_{deforest}}{1 + Ke^{bt}} \quad ; \text{ Donde,}$$

$D_t$ : área deforestada en el momento t  
 $A_{deforest}$ : área total susceptible de ser deforestada  
K: relación entre el área disponible y el área deforestada  
e: base de los logaritmos naturales  
b: tasa de crecimiento del área deforestada  
t: tiempo (años)

Los parámetros K y b se calculan a partir de la información disponible para los años anteriores (dos observaciones) y se supone que b se mantiene constante en el tiempo.

# EVALUACIÓN DE TÉCNICAS Y SISTEMAS DE MODELACIÓN

## SIMULACIÓN DE LA CANTIDAD DE CAMBIO

Se compararon tres aproximaciones para calcular las tasas futuras de deforestación: i) Proyección lineal (geométrica) utilizando las tendencias históricas observadas en cada una de las regiones de deforestación, ii) Proyección no lineal mediante cadenas de Markov<sup>14</sup> para cada región, y iii) Proyección mediante modelo logístico<sup>15</sup>. Las tasas resultantes fueron comparadas utilizando los escenarios definidos por el componente (Pesimista, Optimista y/o Moderado).

## SIMULACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DEL CAMBIO

Se compararon los mapas de simulación espacial de la cobertura futura de bosque generados por las diferentes técnicas y sistemas de modelación evaluados.

## NIVELES DE PRECISIÓN Y VARIABLES EXPLICATIVAS

Se compararon los niveles de precisión y variables explicativas obtenidos para los mejores resultados generados en cada técnica de modelación.

# RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA MODELACIÓN Y PROYECCIÓN ESPACIAL DE LA DEFORESTACIÓN

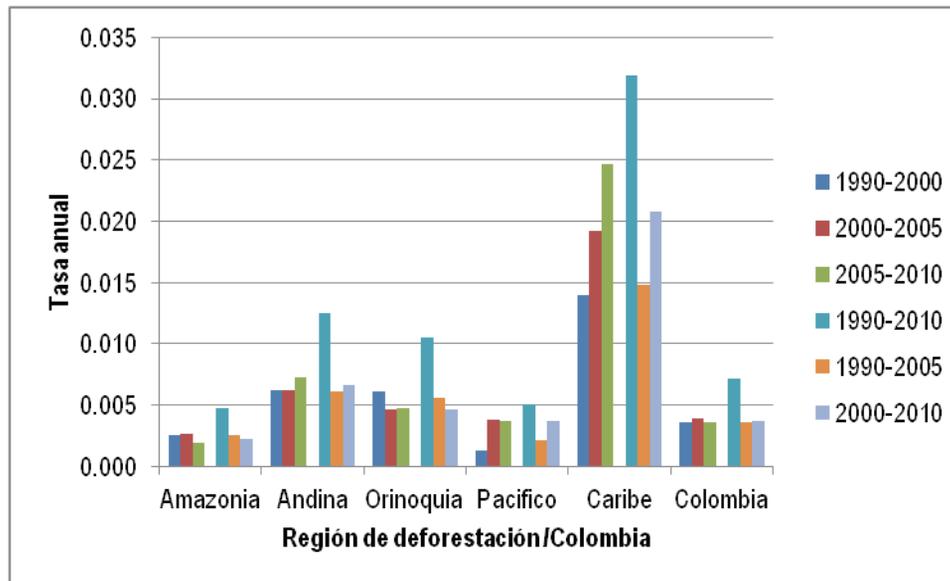
## TENDENCIAS HISTÓRICAS DE LAS TASAS DE CAMBIO DE LA COBERTURA DE BOSQUE

La figura 3 muestra las tendencias históricas de las tasas de pérdida anual de cobertura de bosque para el total nacional y las cinco regiones de deforestación analizadas. Aunque es clara una tendencia general de disminución de la cobertura de bosque durante todo el período conocido (1990-2010), que se refleja en la tasa de cambio calculada para la escala nacional, también pueden observarse diferencias en el comportamiento histórico del cambio a escala regional. En todos los períodos analizados, las tasas más altas se presentaron en las regiones Caribe y Andina, y las más bajas en las regiones Amazónica y Pacífico.

14 Un proceso de tipo Markoviano es aquel en el que el estado de un sistema en un tiempo 2 puede ser predicho por el estado del sistema en el tiempo 1, dada una matriz de probabilidades de transición de cada cobertura a todas las demás. El proceso no es una extrapolación lineal debido a que los potenciales de transición cambian a través del tiempo conforme las diferentes transiciones alcanzan un estado de equilibrio (Eastman 2009).

15 Una proyección lineal es la extrapolación a futuro de tendencias históricas de deforestación (BioCarbon Fund 2008).

Figura 3. Tasas anual de pérdida de bosque (Años 1990, 2000, 2005, 2010). Tasas implícitas anuales para el total nacional y las regiones de deforestación



## NIVELES DE PRECISIÓN

La mayoría de los sistemas de modelación utilizados cuentan con un indicador explícito del nivel de precisión obtenido a la hora de modelar espacialmente la transición de bosque a no bosque<sup>16</sup>. En la modelación regionalizada con IDRISI, sólo la región Caribe obtuvo valores de precisión por debajo del porcentaje sugerido por sus desarrolladores como mínimo aceptable. El resto de las regiones registraron valores entre el 77 y el 100 por ciento. En el caso de la regresión logística, los mejores resultados de la modelación presentaron valores del ROC por encima del 80 por ciento.

A pesar de los buenos resultados obtenidos, ninguno de los indicadores de precisión se consideró por sí solo como una medida confiable del desempeño de la técnica de modelación empleada. Con el objetivo de tener un indicador más riguroso, se llevaron a cabo pruebas de validación espacial de los modelos simulados contra los mapas empíricos generados por el proyecto para los períodos modelados<sup>17</sup>. Los resultados indican que la regresión logística en IDRISI (figura 4) permitió reproducir de forma más realista los patrones de cambio de la cobertura de bosque, en comparación con las técnicas de redes

16 El MLP de IDRISI Taiga presenta un indicador del nivel de precisión de la modelación expresado en un porcentaje que de acuerdo a sus desarrolladores debe estar por encima del 75% para considerarse como aceptable. La regresión logística cuenta con el valor ROC para conocer el desempeño del modelo.

17 El *Land Change Modeler* de IDRISI Taiga cuenta con una herramienta para determinar la calidad de la predicción del cambio, mediante la ejecución de una tabulación cruzada entre el último mapa de cobertura real (UCR), el mapa generado mediante la predicción tipo hard (P), y un mapa real para el año proyectado (CR) (Eastman 2009). La imagen de salida del proceso de validación ilustra la exactitud de los resultados del modelo. Por su parte, DINAMICA-EGO cuenta con un procedimiento análogo en el que emplea un análisis de similitud (Soares y Rodrigues 2009). En el caso de la regresión logística, se llevó a cabo la predicción a un período conocido para analizar el desempeño del modelo en términos espaciales.

neuronales y pesos de evidencia, utilizadas respectivamente por el LCM de IDRISI (Figura 5) y DINAMICA-EGO (Figuras 6 y 7).

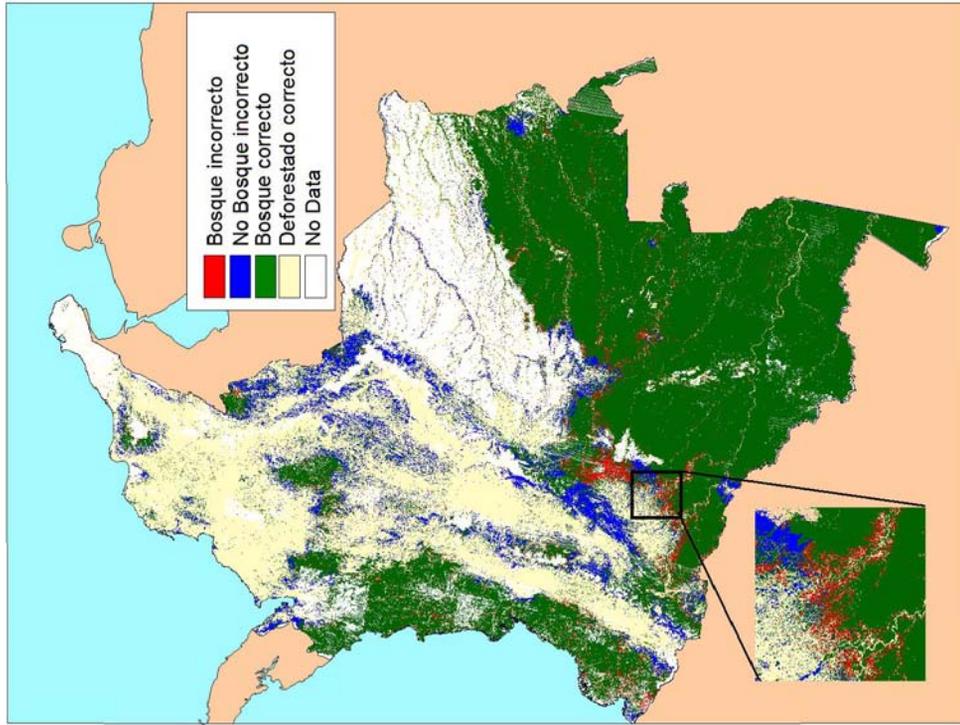
La validación de los modelos de regresión logística se realizó identificando la ubicación de los bosques para el año 2010, según cada modelo utilizando la cantidad de bosque para esa fecha con base en el mapa de bosque 2010 y una ordenación de acuerdo a las probabilidades de cada modelo siguiendo el proceso utilizado por Etter *et al.* (2006). La tabla 3 presenta los niveles de error obtenidos para cada uno de los modelos. La versión espacializada para los modelos Bosque 2000 y Deforestación 1990-2010 del error se muestra en la figura 4.

**Tabla 3. Nivel de error de los mapas generados mediante regresión logística en IDRISI Taiga**

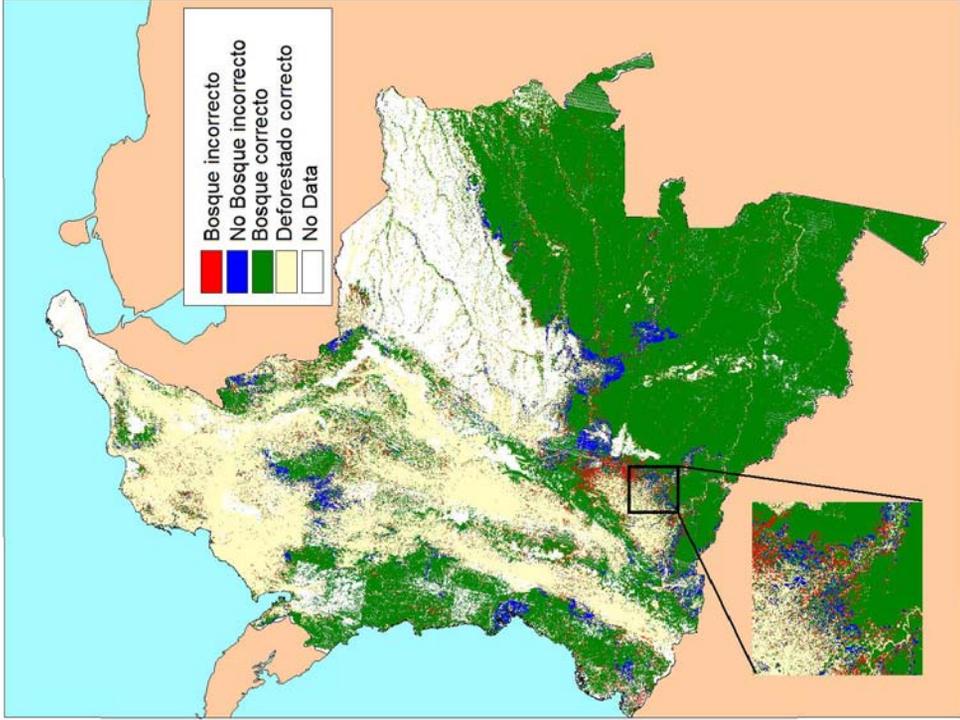
Modelo	Bosque Falso (%)	No Bosque Falso (%)
Bosque en el Año 2010	21	37
Bosque en el Año 2000	27	56
Deforestación período 1990-2010	14	26
Deforestación período 2000-2010	16	32

Figura 4. Mapa ejemplo de validación de la capacidad de predicción espacial del modelo de regresión logística.

- a. Predicción de la deforestación a 2010 con base en la presencia de bosque el año 2000.
- b. Predicción de la deforestación a 2010 con base en la deforestación del período 1990-2010



a.



b.

Figura 5. Mapa ejemplo de validación de la exactitud del modelo de cambio de Bosque a No Bosque.  
 Software IDRISI Taiga. Nivel Sub-nacional. Región Amazónica.  
 Modelación 2000-2005. Año Predicción: 2010

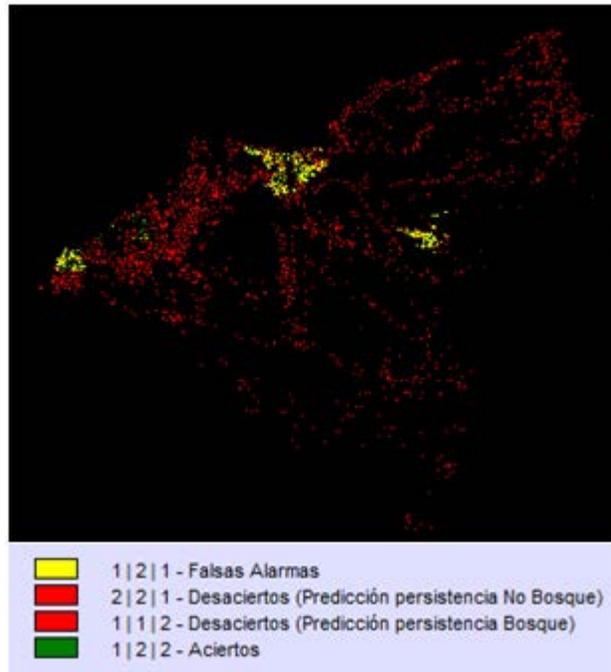
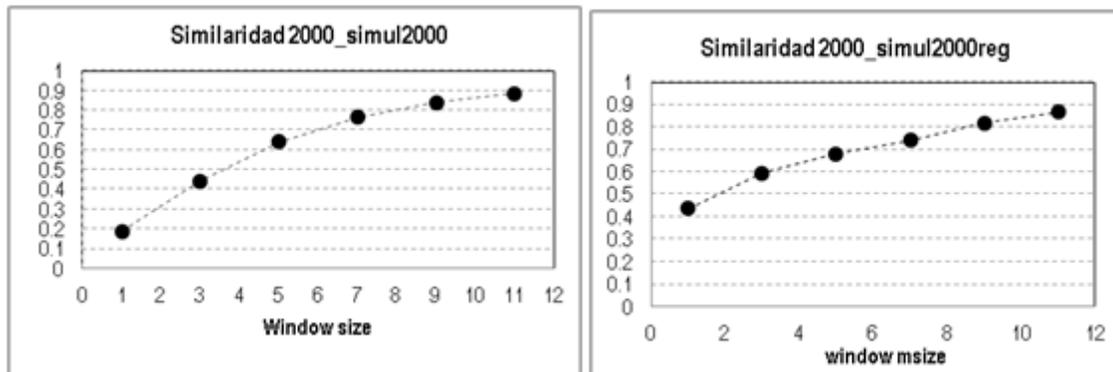


Figura 6 Mapa ejemplo de validación de la exactitud del modelo de cambio de Bosque a No Bosque.  
 Software DINAMICA-EGO. Simulación de la deforestación a 2010  
 con base en la presencia de bosque el año 2005



Figura 7. Ejemplo del análisis de similitud entre simulaciones y mapas empíricos para el año 2000 basado en modelación 1990-2000. a) Nacional, b) por regiones de deforestación. Software DINAMICA-EGO



## VARIABLES EXPLICATIVAS

El número y combinaciones de las variables que resultaron explicativas en la modelación de los procesos de cambio, varió de acuerdo a la técnica empleada, la resolución utilizada (250 metros o 1Km), y la región y el período analizados (Anexo 1). Mientras que en la modelación con pesos de evidencia y regresión logística se empleó gran parte del set de variables independientes disponibles, la modelación con redes neuronales en IDRISI resultó ser más sensible a la cantidad y combinaciones de las variables incorporadas. En los dos primeros sistemas un mayor número de variables incrementó la precisión de los modelos; en IDRISI sólo un número muy reducido de variables obtuvo buenos niveles de precisión. Los cambios de resolución también afectaron significativamente la modelación; la resolución de 250 metros obtuvo los mejores niveles de precisión que la desarrollada con resolución de 1 kilómetro.

La selección del tipo de variables independientes se basó en una revisión de literatura y análisis previo llevado a cabo para el contexto colombiano (Ver Capítulo I). Los modelos utilizaron variables explicativas (biofísicas y antrópicas) para las que se contó con información y que no presentaron colinearidad superior a 0.7. Se destaca la importancia de las variables relacionadas con accesibilidad (por ejemplo distancia a centros urbanos, ríos, vías, etc.), climáticas (por ejemplo precipitación), socioeconómicas (por ejemplo áreas de cultivos lícitos e ilícitos), entre otras.

Aunque existen variables que resultaron explicativas de los procesos de cambio en más de una región, es evidente que cada zona presenta características diferentes que requieren un número y combinación de variables particular para explicar los procesos de transformación del bosque. Adicionalmente, el período utilizado para modelar y posteriormente proyectar el fenómeno de deforestación, tiene una influencia importante debido a que existen diferencias en la dinámica de los patrones espaciales entre los diferentes períodos.

Finalmente, es importante señalar que sin importar la técnica o el sistema utilizados, el nivel de cobertura y la calidad de la información disponible para las variables independien-

tes es un factor crucial para llevar a cabo ejercicios de modelación acertados. En el caso colombiano, la información disponible y de calidad es escasa y/o poco precisa en términos espaciales, lo cual dificulta llevar a cabo una aproximación realista a las dinámicas de transformación de los bosques a nivel regional o nacional.

## SIMULACIÓN DE LA CANTIDAD DE CAMBIO

La tabla 4 presenta un ejemplo de los diferentes escenarios generados para el año 2030, con base en los tres métodos empleados para simular las tasas de cambio de la cobertura de bosque. Los resultados indican que las tasas simuladas mediante el modelo logístico son las que mejor se ajustan a las tendencias históricas de cambio observadas para las diferentes regiones de deforestación, al tiempo que presentan la suficiente flexibilidad cuando se busca proyectar los posibles cambios futuros en la dinámica del bosque en el territorio nacional. Tanto la simulación lineal como la derivada de las cadenas de Markov, no exhiben un comportamiento que pueda considerarse coherente con la compleja y cambiante realidad del país.

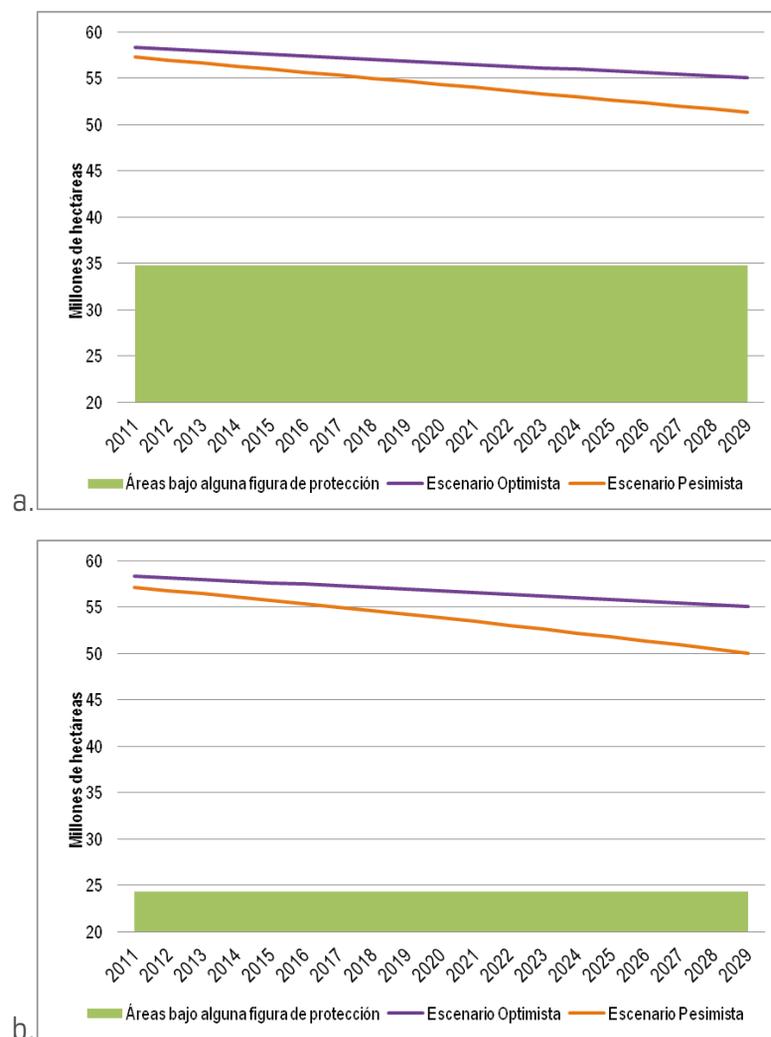
**Tabla 4. Métodos de cálculo evaluados para simular las tasas de cambio anual de la cobertura de bosque. Escenarios al año 2030 para las regiones de deforestación y el total nacional**

Método de cálculo de la tasa de deforestación	Región	Escenario (Año 2030)		
		PESIMISTA	MODERADA <sup>1</sup>	OPTIMISTA
Lineal (geométrica)	Amazónica	0.0027	0.0024	0.0019
	Andina	0.0073	0.0067	0.0061
	Orinoquia	0.0062	0.0053	0.0047
	Pacífica	0.0039	0.0025	0.0014
	Caribe	0.0247	0.0192	0.0140
	Nacional	0.0089	0.0072	0.0056
No lineal (Cadenas de Markov)	Amazónica	0.0038	0.0034	0.0019
	Andina	0.0129	0.0100	0.0078
	Orinoquia	0.0202	0.0114	0.0044
	Pacífica	0.0059	0.0039	0.0031
	Caribe	0.0261	0.0207	0.0177
	Nacional	0.0138	0.0099	0.0070
Tasas implícitas -Modelo logístico	Amazónica	0.0063	-	0.0023
	Andina	0.0065	-	0.0054
	Orinoquia	0.0061	-	0.0042
	Pacífica	0.0043	-	0.0011
	Caribe	0.0137	-	0.0056
	Nacional	0.0063	-	0.0028

<sup>1</sup>En la caso del modelo logístico, se descartó el escenario moderado para dar más flexibilidad a la simulación.

La figura 8 muestra el área de bosque nacional simulada para el período 2010-2030 utilizando los escenarios Pesimista y Optimista generados a partir de la modelación mediante regresión logística (Anexo 2). El modelo tiene en cuenta las áreas de bosque (áreas en verde de la gráfica) que por política de estado presentan una restricción para su aprovechamiento (Parques Nacionales Naturales, reservas de las CAR y Resguardos). Las gráficas muestran cómo se comportará el área de bosque si se asume que el total de las áreas protegidas permanecerán sin ser aprovechadas y si las zonas de Resguardos serán o no aprovechadas en su totalidad. Mientras que en los escenarios optimistas no se espera que cambie significativamente el área de bosque en el año 2030 (alrededor de 55 millones de hectáreas), en los pesimistas se proyecta la disminución de alrededor de 1.3 millones de hectáreas más (para un total de 8.6 millones de hectáreas) si no se garantiza la conservación del total del bosque ubicado en Resguardos.

**Figura 8 Simulación del área de bosque nacional (2010-2030) utilizando un modelo logístico.**  
**a. Alternativa en el que todas las zonas protegidas (parques nacionales y reservas de las CAR) y áreas de resguardos no son explotadas.** **b. Alternativa en el que todas las zonas protegidas (parques nacionales y reservas de las CAR) y sólo el 50% del bosque en las áreas de resguardos no son explotadas**



## SIMULACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DEL CAMBIO

Como parte del proceso de modelación, cada una de las técnicas evaluadas (redes neuronales, regresión logística, pesos de evidencia) genera inicialmente un mapa de potenciales de transición<sup>18</sup>, con base en el cual se distribuyen posteriormente las áreas de bosque que serán deforestadas. Cuando existe un conocimiento previo de los determinantes y los patrones históricos de cambio, el mapa de potenciales de transición constituye un primer indicador del desempeño que tendrá un modelo en términos espaciales. Luego de comparar los mapas de potenciales de transición generados por las tres técnicas evaluadas, se encuentra que la regresión logística permite representar con una mayor fidelidad la distribución espacial esperada del cambio de bosque a no bosque en las diferentes regiones del territorio nacional (figuras 9 y 10). Sin embargo, también pueden observarse diferencias importantes de acuerdo al tipo de variable dependiente considerada en la modelación. Cuando se usa como variable dependiente el área de bosque (Figuras 9b. y 10b.), el modelo incrementa significativamente el área de bosque más susceptible a ser deforestada.

Una vez establecidos los potenciales de transición, es posible proyectar espacialmente el cambio en el área de bosque de dos formas: i) un mapa en el que se presente un escenario específico de cambio (predicción tipo *hard* o dura) y ii) un mapa continuo de vulnerabilidad al cambio que permita representar de forma más flexible los posibles escenarios futuros de transformación (tipo *soft* o suave). Nuevamente, cada técnica de modelación genera un resultado diferente en ambos casos. Sin embargo, sin importar la técnica que se utilice, las proyecciones tipo *hard*, al presentar un único escenario posible, son las menos recomendadas por la incertidumbre asociada al fenómeno de deforestación. Las figuras 11 y 12 presentan ejemplos de mapas tipo *hard* generados mediante los sistemas IDRISI y DINAMICA-EGO respectivamente.

Como se evidencia al generar los mapas de potenciales de transición y luego de llevar a cabo la validación espacial de las proyecciones utilizando períodos de los que se tenía información de la cobertura del bosque (ver sección titulada Niveles de precisión), la capacidad de las técnicas de redes neuronales y de pesos de evidencia para simular con precisión la distribución espacial del cambio, es limitada en comparación con la de la regresión logística. Por esta razón, y para contar con una predicción más flexible, se optó por emplear ésta última para generar simulaciones de deforestación futura tipo *hard*, utilizando el modelo de deforestación del período 1990-2010 y el modelo de presencia de bosque en 2010 (figura 13).

**18** El modelo interpreta la relación entre las variables explicativas y los cambios en la cobertura de bosque en el período analizado, asignándole a cada píxel de bosque un valor entre 0 y 1; los valores más cercanos a uno representan un mayor potencial de que se presente el cambio de bosque a no bosque (Eastman 2009).

Figura 9. Mapas de potenciales de transición generados mediante el modelo de regresión logística a. Usando como variable dependiente la deforestación 1990-2010 b. Usando como variable dependiente el área de bosque del año 2010

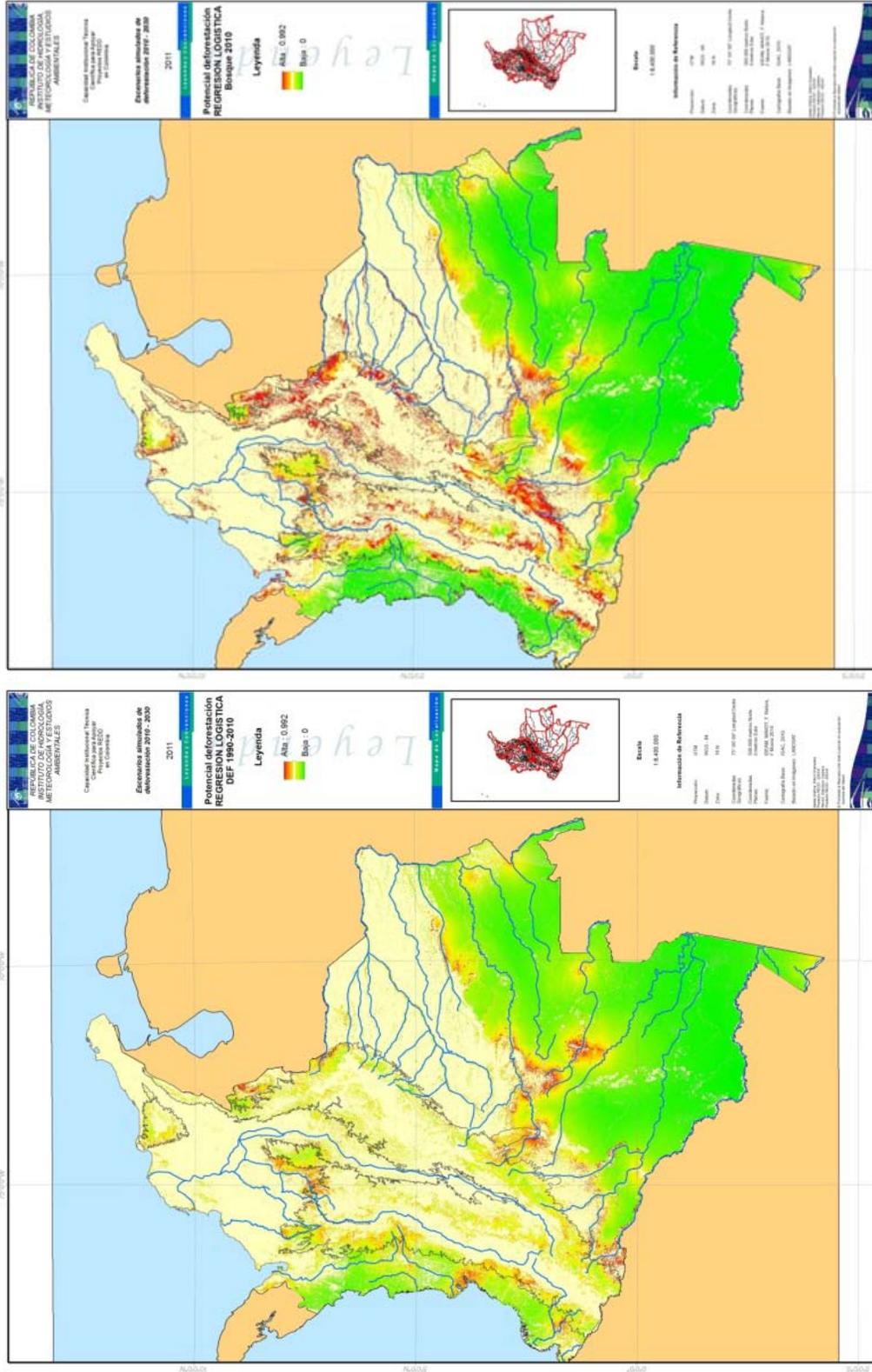
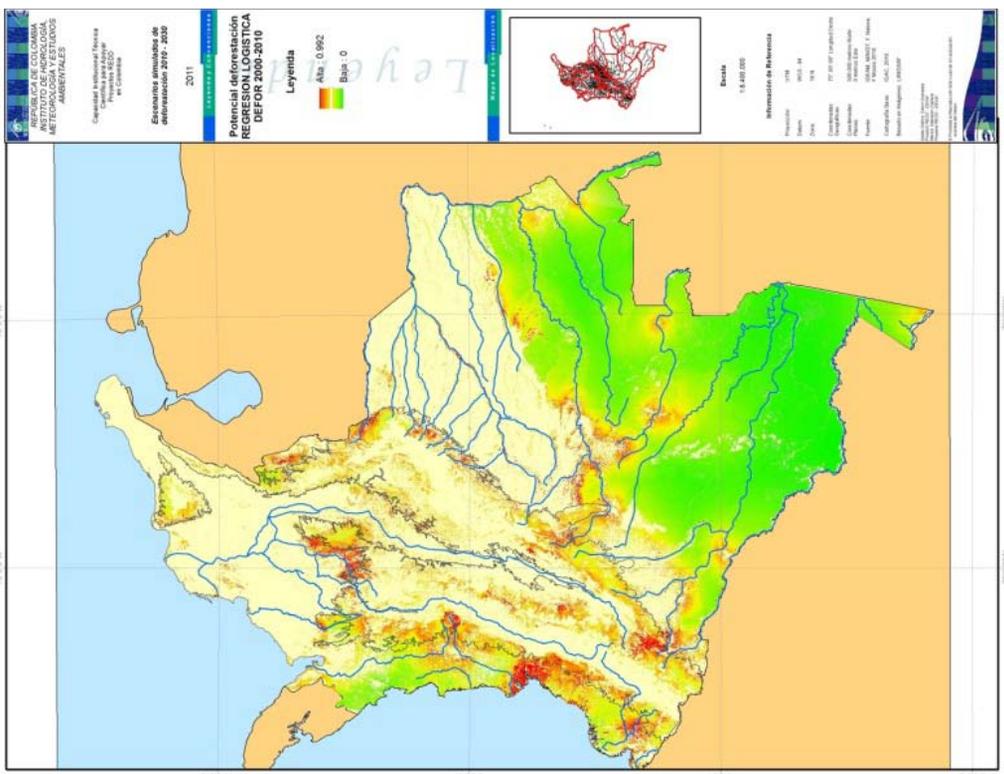
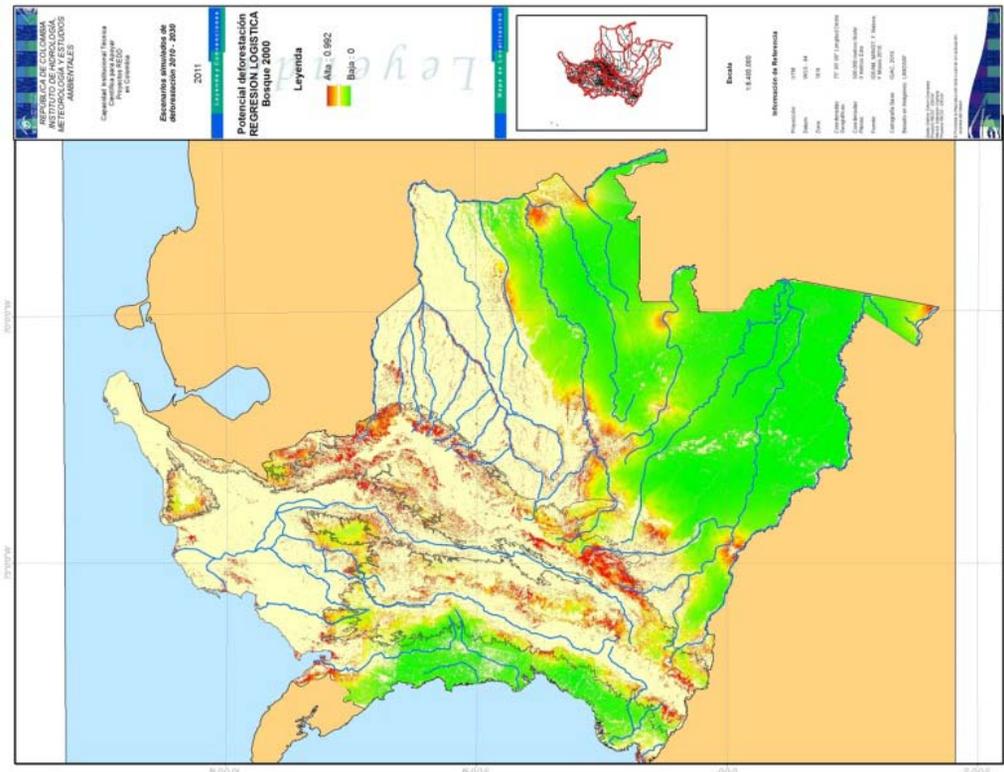


Figura 10. Mapas de potenciales de transición generados mediante el modelo de regresión logística a. Usando como variable dependiente la deforestación 2000-2010 b. Usando como variable dependiente el área de bosque del año 2000

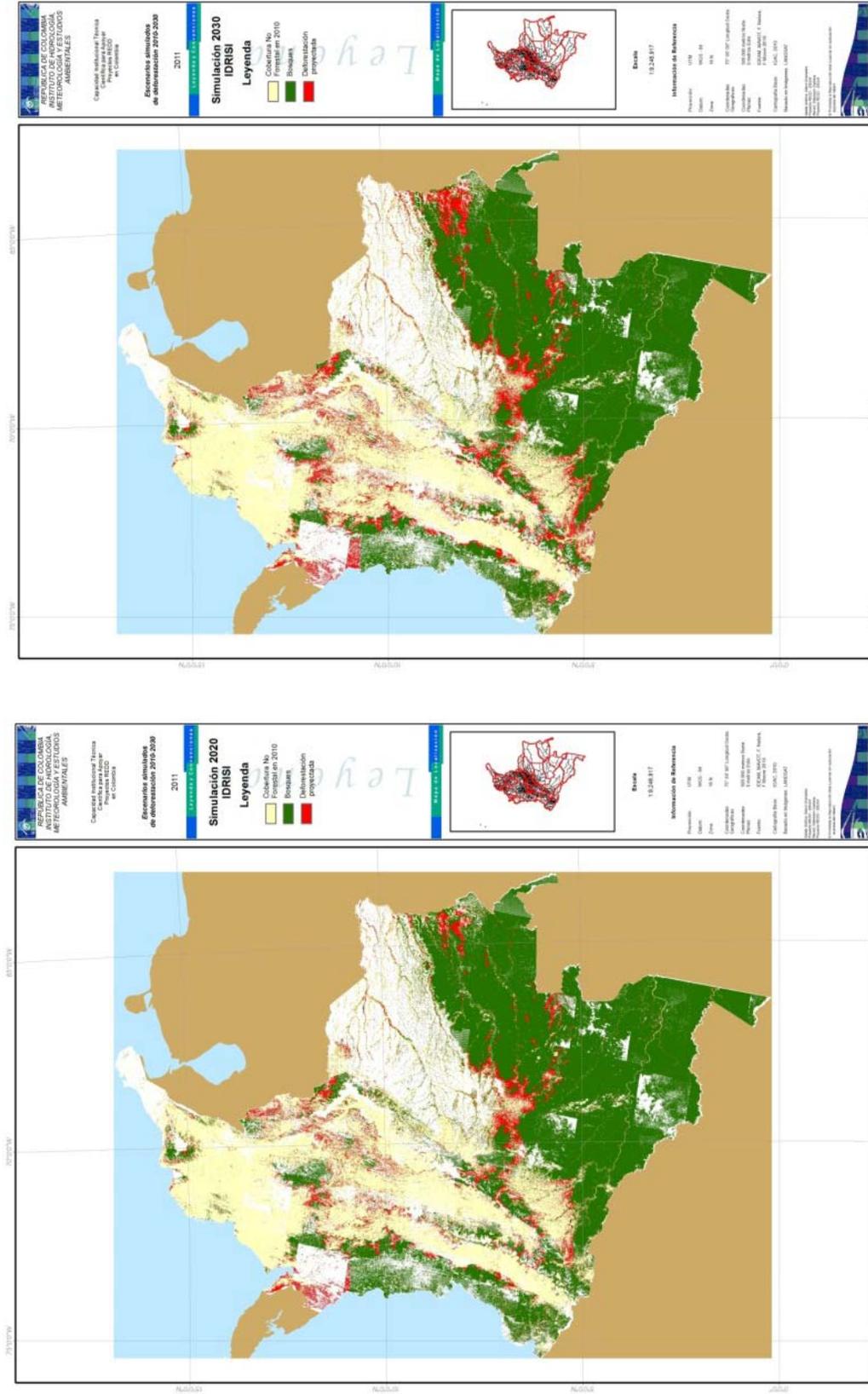


a.



b.

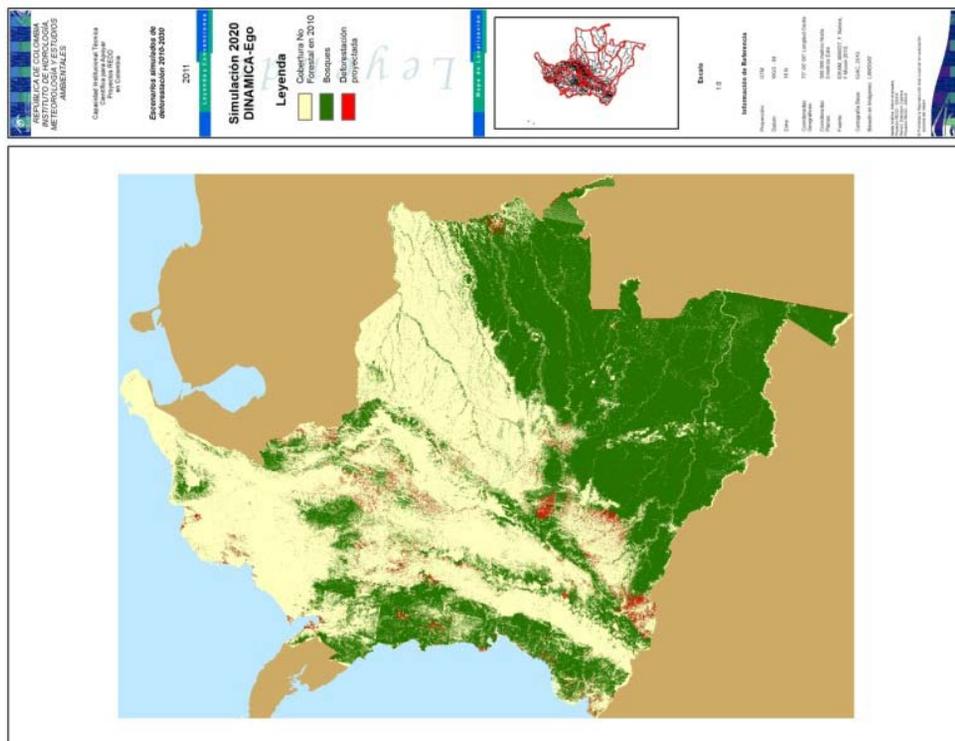
Figura 11. Ejemplo de proyecciones de deforestación (tipo hard) generadas mediante un modelo de redes neuronales en el sistema IDRISI Taiga. a. Año 2020. b. Año 2030.



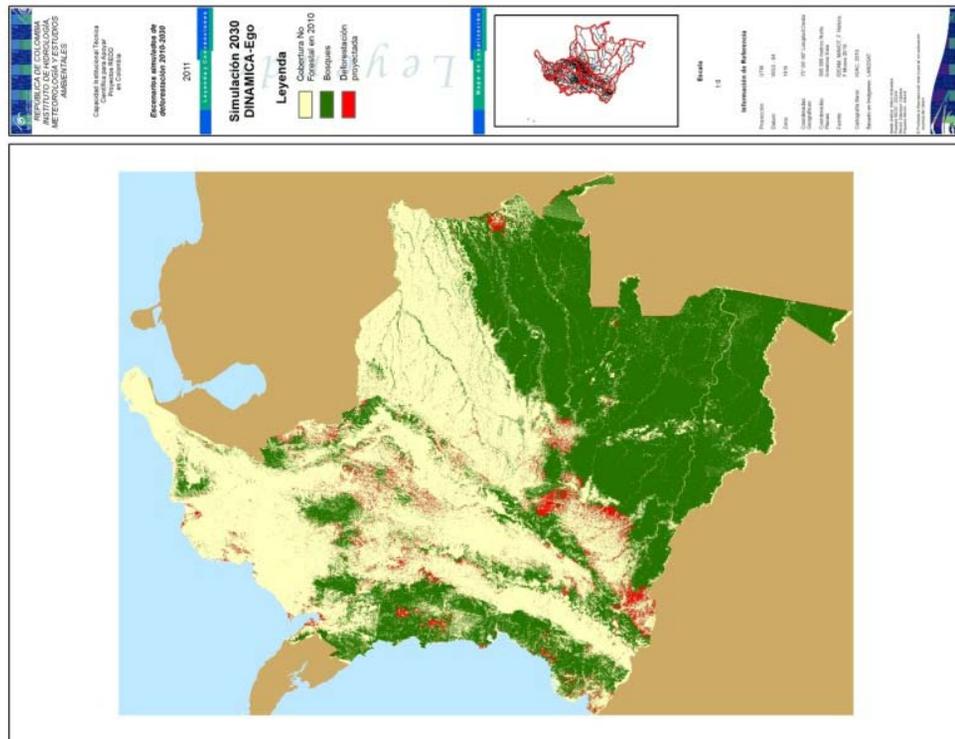
a.

b.

Figura 12. Ejemplo de proyecciones de deforestación (tipo hard) generadas mediante un modelo de pesos de evidencia en el sistema DINAMICA-EGO. a. Año 2020. b. Año 2030.

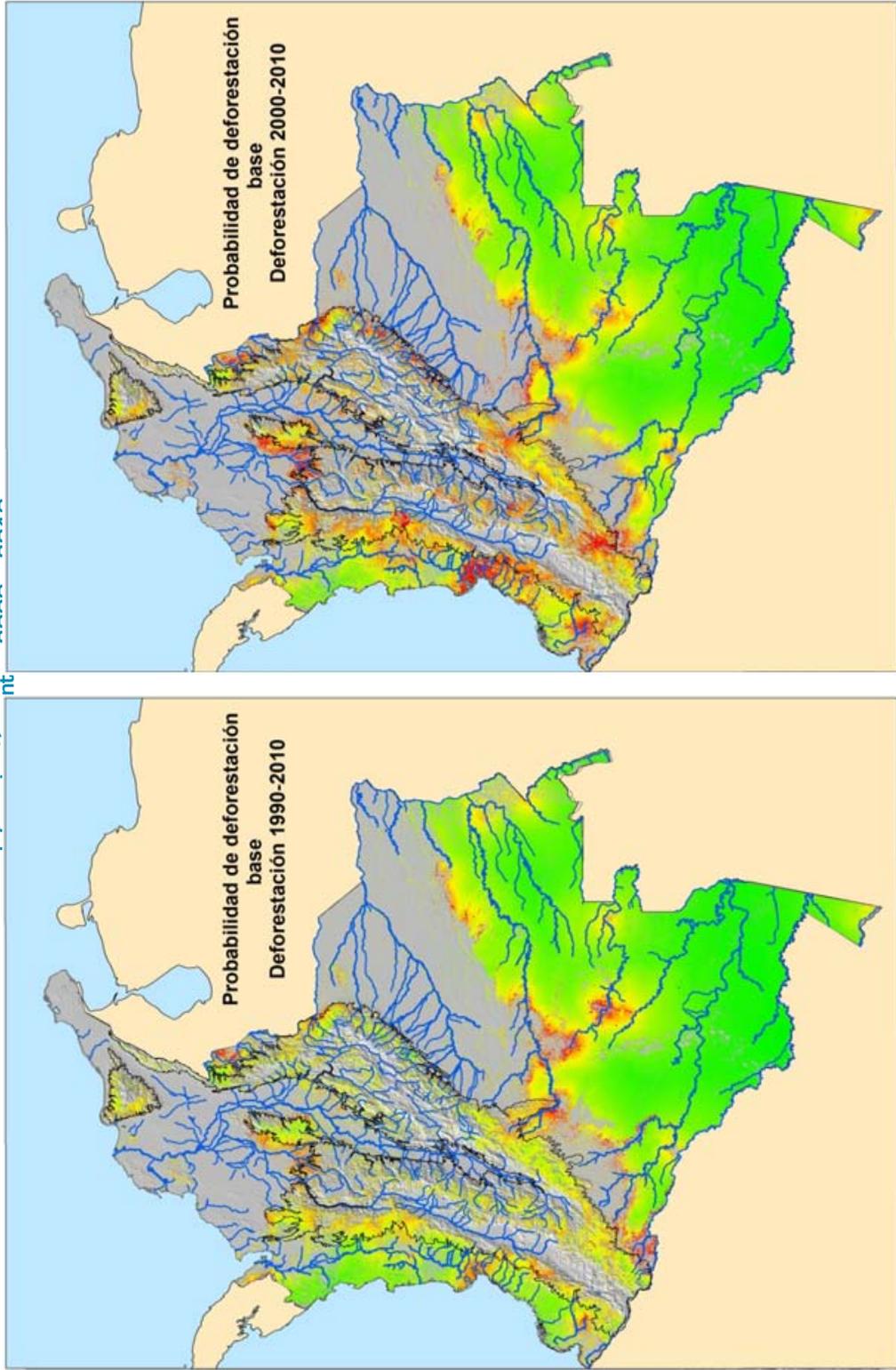


a.



b.

Figura 13. Mapas de probabilidades de deforestación (vulnerabilidad) generados mediante un modelo de regresión logística. a. Usando como base la deforestación entre 1990 y 2010. b. Usando como base la



b.

a.

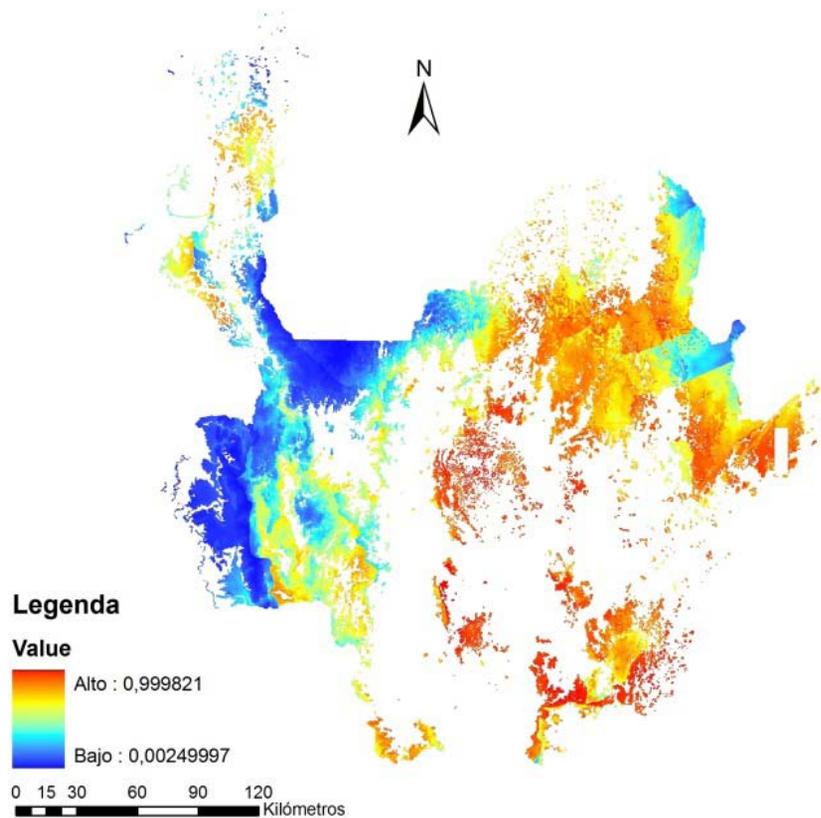
Como lo muestra la figura 13, los mapas de vulnerabilidad también se ven afectados por el período que se utiliza como base para modelar. De acuerdo con el mapa *soft* generado con base en el período 2000-2010, se presentarán procesos más agresivos de deforestación en la región Pacífica, Caribe y Andina, en comparación con los presentados por el mapa de vulnerabilidad generado usando las tendencias del período 1990-2010. Por lo tanto, es fundamental tener en cuenta que cualquier ejercicio de modelación tiene asociado un nivel de incertidumbre significativo derivado tanto de la calidad de la información utilizada como insumo para su construcción, y de la escala, la técnica y el sistema empleados, como del período usado para tratar de establecer la dinámica del cambio en el uso/cobertura de la tierra. Como lo demuestran los diferentes ejercicios llevados a cabo en este estudio, estos factores deben ser considerados detenidamente al momento de escoger la mejor alternativa para modelar y proyectar espacialmente los procesos de transformación de los bosques en el caso colombiano.

## MODELACIÓN ESPACIAL DE LA DEFORESTACIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA

Modelos estadísticos basados en teoría económica de uso de la tierra rural, se estimaron en función de variables espacialmente explícitas para identificar los determinantes de la deforestación observada en Antioquia durante el período analizado<sup>19</sup>. Una exhaustiva búsqueda permitió acopiar información digital sobre potenciales determinantes biofísicos y socio-económicos de la deforestación que ocurrió en Antioquia en un período aproximado de dos décadas. Los valores de elasticidad, que se interpretan como el cambio porcentual en la probabilidad de deforestación al cambiar en uno por ciento el valor de una variable, permitieron identificar como principales determinantes de la deforestación observada en Antioquia a la distancia acumulada de menor costo a una metrópoli regional, el índice de necesidades básicas insatisfechas de la población rural, la precipitación del trimestre más cálido o del trimestre más seco, la temperatura media anual y la población rural, 1980. Valores obtenidos del área bajo la curva ROC superiores a 0.86, sugieren una excelente capacidad de discriminación de los dos mejores modelos estadísticos estimados. Los dos mejores modelos se usaron en el cálculo de superficies continuas de probabilidad de deforestación para todas aquellas áreas cubiertas por bosques en 1980 (figura 14). Los resultados indican que la metodología utilizada permite identificar los principales determinantes de la deforestación y su importancia relativa a nivel sub-nacional. Adicionalmente, las pruebas con diferentes resoluciones permiten recomendar un tamaño de píxel de 30 metros como el más adecuado para este tipo de análisis a nivel sub-nacional.

19 El documento "Modelación Económica de la Deforestación en Antioquia, 1980-2000", producido por el equipo técnico del componente, contiene el desarrollo detallado de la modelación econométrica de la deforestación en el departamento de Antioquia para el período 1980-2000. Solo se presenta aquí un breve resumen de los resultados.

Figura 14. Ejemplo de superficie de probabilidad de deforestación generada por la modelación econométrica en el departamento de Antioquia (1980-2000).



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA MODELACIÓN Y PROYECCIÓN DE LA DEFORESTACIÓN EN COLOMBIA

La deforestación es un fenómeno socioeconómico relativamente complejo que está afectado por condiciones estructurales asociadas a las condiciones de desarrollo de cada país; también relacionado con variables geográficas y biofísicas que determinan la magnitud y localización del fenómeno. Tal como se evidencia en la literatura existente, no existe un único modelo que permita predecir con niveles aceptables de confiabilidad ni la magnitud ni la localización detallada del proceso.

En la evaluación realizada con los datos disponibles para Colombia, se encontró que no existe un conjunto de variables socioeconómicas que expliquen adecuadamente el comportamiento de la deforestación, a través de las técnicas estadísticas utilizadas. Esto no quiere decir que no exista una relación entre las variables usadas y el fenómeno, más bien que no se cuenta con la información en escalas temporales y espaciales adecuadas para elaborar un modelo confiable.

Con las técnicas evaluadas, se encontró que aún la escala de análisis tiene repercusiones en los resultados del modelo; en escalas espaciales más generales los resultados del modelo fueron menos precisos. Sin embargo, la mayor parte de la información socioeconómica solo está disponible en escalas pequeñas. Por tanto, en futuros ejercicios se recomienda elaborar modelos para aquellas regiones donde se concentra la mayor parte del fenómeno, de tal manera que los modelos se construyan en escalas adecuadas para contar con niveles aceptables de confiabilidad.

Dependiendo del objetivo de la modelación, es crítico contar con niveles de calidad diferentes en los mapas de predicción. Cuando se busca identificar áreas con una mayor propensión al cambio, conviene buscar aquel que presente el mejor ajuste entre los cambios modelados y los reales, en cuyo caso un mapa difuso (tipo *soft*) puede resultar la mejor opción. Cuando el objetivo es modelar un escenario particular, la precisión en la localización espacial del cambio no es necesariamente un punto crítico (Mas *et al.* 2010).

## GENERALES

El propósito de la modelación estadística y espacial de la cobertura forestal y sus dinámicas es poder construir predicciones acerca de la cantidad y ubicación futura de los eventos de deforestación (y regeneración/recuperación) enmarcadas dentro de unos niveles de certidumbre. A partir de ellas aplicar las predicciones para proyectar emisiones y/o capturas de C, u otras aplicaciones. Esto implica:

- Modelar mapas de probabilidades de cambio/persistencia para períodos con evidencia empírica que permitan medir la capacidad de discriminación del modelo y medir el desempeño del modelo.
- Identificar variables predictivas de los cambios y persistencia en los bosques
- Predecir cambios a fecha(s) posterior(es) al período modelado que tengan evidencias empíricas.
- Generar hipótesis plausibles del comportamiento de las variables predictivas hacia el futuro.
- Proyectar a fechas futuras bajo diferentes escenarios de cambio las cantidades y ubicaciones de la deforestación.

La información necesaria para modelar un evento debe cumplir una serie condiciones que generalmente solo se cumplen parcialmente:

- Conocer los niveles de precisión de los datos. La resolución y calidad de la información de las variables tanto dependientes como predictivas.
- Variables (biofísicas y socioeconómicas) utilizadas deben corresponder a una fecha anterior cercana al momento inicial del período correspondiente al evento.

- Poder representarse espacialmente a una escala espacial similar a la que está representada la capa de información del evento (bosque, deforestación, etc.).

Además en este proceso hay otros potenciales problemas para lograr los propósitos:

- Los modelos utilizados.
- Identificar un nivel de regionalización de la información que permita eliminar ruidos debidos a este aspecto.

## MODELACIÓN

- La modelación es dependiente de los datos y del modelo en sí.
- En términos generales las predicciones derivadas de los modelos no fueron satisfactorias, pues mostraron niveles medios a bajos de capacidad predictiva. Esto fue menos crítico en términos de predecir la cantidad de los cambios, que en cuanto a la ubicación geográfica de ellos. Existen diferencias en los resultados de los dos modelos aplicados (IDRISI y Dinamica-EGO) similares a los reportados en la literatura (Mas *et al.* 2011). IDRISI –LCM presenta una coincidencia algo mayor en la predicción espacial “1 a 1” de los eventos de deforestación. Sin embargo, Utilizando un nivel de tolerancia ampliando las ventanas de coincidencia a las celdas vecinas al cambio DINAMICA permite presentar patrones más realistas de la deforestación.
- Es difícil pensar en utilizar los datos y escenarios generados por este proceso de modelación, para comprometer decisiones políticas de negociación.

## DIFICULTADES ENCONTRADAS

- No se tiene (tuvo) un conocimiento de la precisión de los mapas de deforestación que permita incorporar este dato en el análisis del desempeño de los modelos.
- El conjunto de variables predictivas que se utilizaron para la modelación, no cumple adecuadamente con los supuestos planteados arriba (resoluciones espaciales y temporales).
- Un aspecto que se trató de controlar en el proceso de modelación fue la variabilidad regional del comportamiento de los procesos de cambio/persistencia mediante el mapa de regiones de deforestación. Sin embargo, es posible que este aspecto requiera ser revisado, pues la variabilidad interna de esas regiones puede aún ser alta: así parece ser en los Andes (zonas altas y bajas; vertientes internas y externas; etc.; y en la Amazonia (sector occidental y oriental).

Las exigencias de los proyectos REDD no pueden cumplirse sino parcialmente con los resultados obtenidos:

- Cantidades aproximadas de deforestación esperada por regiones pero con un margen de error insuficientemente identificado.
- Ubicación general de las áreas con mayores probabilidades de experimentar eventos importantes de deforestación.
- No podemos calcular confiablemente los cambios (reducciones) en las emisiones.

## SIGUIENTE PASO

- El principal aspecto es el que atañe los mejoramientos de la calidad de la información (principalmente económica y social).



## LITERATURA CITADA

- ACHARD, F., S. BROWN, R. DEFRIES, G. GRASSI, M. HEROLD, D. MOLLICONE, D. PANDEY, Y C. SOUZA EDS., 2009. A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals caused by deforestation, gains and losses of carbon stocks in forest remaining forest, and forestation, Alberta, Canadá: GOFCC-GOLD Project Office. Disponible en: [http://unfccc.int/files/methods\\_science/redd/methodologies/other/application/pdf/sourcebook\\_version\\_nov\\_2009\\_cop15-1.pdf](http://unfccc.int/files/methods_science/redd/methodologies/other/application/pdf/sourcebook_version_nov_2009_cop15-1.pdf) [Accedido Septiembre 29, 2010].
- AGARWAL, C., G.M. GREEN, J.M. GROVE, T.P. EVANS, Y C.M. SCHWEIK, 2001. A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice. USDA Forest Service General Technical Report NE-297. Center for the Study of Institutions, Population, and Environmental Change, Indiana University, Bloomington (IN) and USDA Forest Service, Northeastern Research Station, South Burlington (VT).
- BIOCARBON FUND, 2008. Methodology for Estimating Reductions of GHG Emissions from Mosaic Deforestation. Disponible en: [http://www.communitycarbonforestry.org/BioCarbon%20Fund-REDD\\_Mosaic\\_Methodology.pdf](http://www.communitycarbonforestry.org/BioCarbon%20Fund-REDD_Mosaic_Methodology.pdf) [Accedido Mayo 28, 2010].
- BÜRGI, M., HERSPERGER, A.M. Y SCHNEEBERGER, N., 2004. Driving forces of landscape change-current and new directions. *Landscape Ecology*, 19(8), págs.857–868. Disponible en: [www.springerlink.com/index/m703504n78j6h252.pdf](http://www.springerlink.com/index/m703504n78j6h252.pdf) [Accedido Septiembre 9, 2010].
- CLARK LABS, 2010. Modeling REDD Baselines using IDRISI's Land Change Modeler. Disponible en: [http://www.clarklabs.org/applications/upload/IDRISI\\_Focus\\_Paper\\_REDD.pdf](http://www.clarklabs.org/applications/upload/IDRISI_Focus_Paper_REDD.pdf).
- DANE, 2005. Datos de tipo de actividad económica para la población mayor de cinco años. En Censo 2005 Colombia.
- DNP, 2007. Documento Visión Colombia 2019: Consolidar una gestión ambiental que promueva el desarrollo sostenible. Disponible en: <http://www.dnp.gov.co/PortalWeb/Portals/0/archivos/documentos/2019/Documentos/101040-CARTILLA%20AMBIENTAL.pdf> [Accedido Agosto 23, 2010].

- EASTMAN, R., 2009. IDRISI TAIGA guide to GIS and image processing.
- EASTMAN, R., FOSSEN, M. Y SOLORZANO, L., 2005. Transition Potential Modeling for Land Cover Change. En D. Maguire, M. Batty, y M. Goodchild, eds. GIS, Spatial Analysis and Modeling. USA: Redlands, California: ESRI Press, págs. 357-386.
- ETTER, A., 1998. Mapa General de Ecosistemas de Colombia (1:2000000). En M. Chaves y N. Arango, eds. Informa Nacional sobre el Estado de los Biodiversidad en Colombia. Bogotá, Colombia: Alexander von Humboldt.
- ETTER, A., MCALPINE, C. Y POSSINGHAM, H., 2008. Historical Patterns and Drivers of Landscape Change in Colombia Since 1500: A Regionalized Spatial Approach. *Annals of the Association of American Geographers*, 98(1), págs.2-23. Disponible en: <http://www.informaworld.com/openurl?genre=article&doi=10.1080/00045600701733911&magic=crossrefID404A21C5BB053405B1A640AFFD44AE3>.
- ETTER, A., C. MCALPINE, S. PHINN, D. PULLAR, Y H. POSSINGHAM, 2006b. Unplanned Land Clearing of Colombia Rainforests: Spread like Disease? *Landscape and Urban Planning*, 77, págs.240-254.
- ETTER, A., C. MCALPINE, D. PULLAR, Y H. POSSINGHAM, 2006c. Modelling the Conversion of Colombia Lowland Ecosystems since 1940: Drivers, Patterns and Rates. *Journal of Environmental Management*, 79, págs.74-87.
- ETTER, A., C. MCALPINE, K. WILSON, S. PHINN, Y H. POSSINGHAM, 2006. Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 114(2-4), págs.369-386. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com> [Accedido Agosto 9, 2010].
- FEDEGAN, 2006. Plan Estratégico de la Ganadería Colombiana 2019. Disponible en: [http://portal.fedegan.org.co/Documentos/pega\\_2019.pdf](http://portal.fedegan.org.co/Documentos/pega_2019.pdf) [Accedido Agosto 30, 2010].
- GEIST, H. Y LAMBIN, E., 2002. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *BioScience*, 52(2), págs.143-150. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/1314248> [Accedido Mayo 4, 2010].
- GEIST, H. Y LAMBIN, E., 2001. What DrivesTropical Deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causesof deforestation based on subnational case study evidence, Disponible en: [http://www.pik-potsdam.de/members/cramer/teaching/0607/Geist\\_2001\\_LUCC\\_Report.pdf](http://www.pik-potsdam.de/members/cramer/teaching/0607/Geist_2001_LUCC_Report.pdf) [Accedido Mayo 28, 2010].
- GRAU, H.R. Y AIDE, M., 2008. Globalization and land-use transitions in Latin America. *Ecology and Society*, 13(2), pág.16. Disponible en: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art16/> [Accedido Agosto 19, 2010].
- GREEN, R.H., 1979. *Sampling Design and Statistical Methods for Environmental Biologists*, New York, USA.
- HARRIS, M., 1987. *Caníbal y reyes los orígenes de las culturas*, Madrid, España: Alianza Editor.

- KAIMOWITZ, D. Y ANGELSEN, A., 1998. Economic models of tropical deforestation a review, Center for International Forestry Research. Disponible en: [http://www.cifor.cgiar.org/publications/pdf\\_files/Books/model.pdf](http://www.cifor.cgiar.org/publications/pdf_files/Books/model.pdf) [Accedido Junio 16, 2010].
- KANNINEN, M., D. MURDIYARSO, F. SEYMOUR, A. ANGELSEN, S. WUNDER, Y L. GERMAN, 2008. ¿Crecen los arboles sobre el dinero? Implicaciones de la investigación sobre deforestacion en las medidas para promover la REDD, Indonesia: CIFOR. Disponible en: [http://www.cifor.cgiar.org/publications/pdf\\_files/Books/BKanninen0801SP.pdf](http://www.cifor.cgiar.org/publications/pdf_files/Books/BKanninen0801SP.pdf) [Accedido Junio 5, 2010].
- KIM, O., 2010. An Assessment of Deforestation Models for Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD). *Transactions in GIS*, 14(5), págs.631-654. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1467-9671.2010.01227.x> [Accedido Septiembre 2, 2011].
- LAMBIN, 1994. Modelling deforestation processes, a review, Luxembourg: Joint Research Centre, Institute for Remote Sensing Applications. European Space Agency.
- LAMBIN, E., 1997. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*, 21, págs.375-393.
- MÁRQUEZ, G., 2001. De la abundancia a la escasez: la transformación de ecosistemas en Colombia 1850-1995. En G. Palacio, ed. *Naturaleza en disputa: Ensayos de Historia Ambiental de Colombia 1850-1995*. Bogotá, Colombia: UNIBIBLOS.
- MAS, J.F., M. KOLB, T. HOUET, M. PAEGELOW, Y M.T.C. OLMEDO, 2011. Una comparación de programas de modelación de cambios de cobertura/uso del suelo. En *Anais XV Simpósio de Sensoriamento Remoto - SBSR*. Curitiba, Brasil, pág. p. 5801.
- MAS, J.F., PÉREZ, A. Y CLARKE, K., 2010. Assessing simulated land use/cover maps using similarity and fragmentation indices. En *ASPRS 2010 Annual Conference*. California, USA.
- MAS, J.F., H. PUIG, J.L. PALACIO, Y A. SOSA-LOPEZ, 2004. Modelling deforestation using GIS and artificial neural networks. *Environmental Modelling y Software*, 19(5), págs.461–471.
- MIN. AGRICULTURA, MIN. AMBIENTE, MIN. COMERCIO EXTERIOR, MIN. DESARROLLO, Y DNP, 2000. Plan Nacional de Desarrollo Forestal. Disponible en: [http://www.paramo.org/portal/files/recursos/Plan\\_desarrollo\\_forestal.pdf](http://www.paramo.org/portal/files/recursos/Plan_desarrollo_forestal.pdf) [Accedido Agosto 23, 2010].
- MIN. AMBIENTE, DNP y UPA, 1994. CONPES 2750: POLITICA NACIONAL AMBIENTAL. SALTO SOCIAL HACIA EL DESARROLLO HUMANO SOSTENIBLE. Disponible en: <http://www.dnp.gov.co/portalweb/portals/0/archivos/documentos/Subdireccion/Conpes/2750.pdf> [Accedido Agosto 23, 2010].
- MIN. AMBIENTE, DNP y UPA, 1996. Conpes 2834. Política de Bosques. Disponible en: <http://www.paramo.org/portal/node/382> [Accedido Agosto 23, 2010].
- OJIMA, D.S., GALVIN, K.A. Y TURNER, B.L., 1994. The global impact of land-use change. *BioScience*, 44(5), págs.300–304. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/1312379> [Accedido Julio 23, 2010].

- PIJANOWSKI, B. et al., 2002. Using neural networks and GIS to forecast land use changes: A land transformation model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6), págs.553-575.
- PONTIUS, R.G. et al., 2008. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change. *The Annals of Regional Science*, 42(1), págs.11-37. Disponible en: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s00168-007-0138-2> [Accedido Septiembre 2, 2011].
- SCHNEIDER, L., 2008. Plant invasions in an agricultural frontier: Linking satellite, ecological and household survey data. En *Land Change Science in the Tropics: Changing Agricultural Landscapes*. Kluwer Publishers, págs. 117-140.
- SOARES, B. Y RODRIGUES, W., 2009. Modelamiento de Dinámica Ambiental con Dinámica EGO.
- STEPHENNE, N. Y LAMBIN, E., 2001. A dynamic simulation model of land-use changes in Sudano-sahelian countries of Africa (SALU). *Agriculture, ecosystems y environment*, 85(1-3), págs.145-161.
- TURNER, B.L., LAMBIN, E. Y REENBERG, A., 2007. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), págs.20666-20671.
- UPADHYAY, T.P., SOLBERG, B. Y SANKHAYAN, P.L., 2006. Use of models to analyse land-use changes, forest/soil degradation and carbon sequestration with special reference to Himalayan region: A review and analysis. *Forest Policy and Economics*, 9(4), págs.349-371.
- URIARTE, M., SCHNEIDER, L. Y RUDEL, T., 2010a. Land Transitions in the Tropics: Going Beyond the Case Studies. *Biotropica*, 42(1), págs.1-2/56-62.
- URIARTE, M., SCHNEIDER, L. Y RUDEL, T., 2010b. Synthesis: Land Transitions in the Tropics. *Biotropica*, 42(1), págs.59-62.
- VELDKAMP, A. Y LAMBIN, E., 2001. Predicting land-use change. *Agriculture, Ecosystems y Environment*, 85(1-3), págs.1-6.
- VERBURG, P., W. SOEPBOER, A. VELDKAMP, R. LIMPIADA, V. ESPALDON, Y S. MASTURA, 2002. Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model. *Environmental Management*, 30(3), págs.391-405. Disponible en: <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s00267-002-2630-x> [Accedido Marzo 29, 2011].
- WOLMAN, G., 1993. Population, Land Use, and Environment: A Long History. En C. L. Jolly y B. Boyle, eds. *Population and Land Use in Developing Countries: Report of a Workshop*. USA: National Academies Press. Disponible en: <http://www.nap.edu/catalog/2211.html> [Accedido Abril 9, 2009].

## ANEXOS

**Anexo 1. Variables explicativas según la técnica y sistema de modelación empleadas para modelar y proyectar la deforestación a nivel nacional**

Técnica de modelación	Sistema de modelación	Variables explicativas
Redes neuronales	IDRISI Taiga - LCM	Distancia a capitales; Distancia a ríos principales; Distancia a áreas de No Bosque; Distancia a áreas de coca; Fertilidad de los suelos; Resguardos; Reservas naturales; Distancia a vías totales; distancia a capitales.
Regresión logística	IDRISI Taiga	Área Sembrada por municipio; Áreas de cultivos de coca; Crecimiento de la población; Distancia a cabeceras; Distancia a ríos totales; Densidad de población; Gasto público municipal; Distancia a áreas de producción de petróleo; Pendiente; Precipitación en el trimestre más seco; Precipitación en el trimestre más húmedo; Reservas naturales; Resguardos; Fertilidad de los suelos; Densidad cabezas de ganado en área de No bosque; Regiones de deforestación.
Pesos de evidencia	DINAMICA-EGO	Altitud; Distancia a capitales; Pendiente; Crecimiento de la población; Precipitación en el trimestre más seco; Precipitación en el trimestre más húmedo; Distancia a cabeceras; Fertilidad de los suelos; Distancia a ríos totales; Regiones de deforestación; Zonas de producción petrolera; Gasto público municipal; Distancia a vías totales; Áreas de cultivos de coca; Títulos mineros; Densidad de población; Reservas naturales; Reservas de las CAR; Resguardos.

**Anexo 2. Escenarios simulados de cambio en la cobertura de bosque (2010-2030). Modelo logístico**

Región de deforestación	Escenario	Área de Bosque en 2010 (ha)	Área de bosque (ha) Simulación Conservacionista 1			Área de bosque (ha) Simulación No conservacionista 2		
			2015	2020	2030	2015	2020	2030
Amazónica	Optimista	39260113	38852282	38414900	37462156	38844392	38388008	37348712
	Pesimista		37614397	36543330	34309561	37344931	35996464	32728613
Andina	Optimista	9849850	9608351	9326344	8790770	9612331	9334244	8810089
	Pesimista		9512976	9188260	8578125	9514891	9193947	8596528
Orinoquia	Optimista	2090438	2044932	1999743	1913831	2047356	2004471	1925060
	Pesimista		2001601	1944159	1836749	2011063	1958812	1864175
Pacífica	Optimista	6052525	5986538	5920277	5787375	5986216	5919490	5785199
	Pesimista		5945192	5844731	5643463	5944302	5842900	5638653
Caribe	Optimista	1383175	1288971	1210150	1089681	1329583	1292979	1251114
	Pesimista		1246820	1142900	1004636	1296210	1254142	1224218
Total Nacional	Optimista	58636100	57781073	56871414	55043813	57819878	56939192	55120174
	Pesimista		56320986	54663379	51372535	56111396	54246265	50052188

