

Artículo Original

Trayectorias de cambios en coberturas terrestres en una cuenca de los Andes colombianos: río Grande, 1986-2012¹

Cristian D. Ramírez S.² & Sergio A. Orrego S³.

Artículo recibido: 05 de febrero de 2015 / Artículo Aceptado: 15 de mayo de 2015

RESUMEN

Introducción. las trayectorias de cambios en coberturas terrestres responden a diversas dinámicas de uso de la tierra en regiones específicas y reflejan la estrecha relación entre sistemas humanos y ambientales que pueden afectar la provisión de bienes y servicios ecosistémicos. **Objetivo.** cuantificar los cambios en coberturas terrestres en la cuenca del río Grande, en el período 1986-2012 a partir de datos provenientes de sensores remotos con el fin de identificar diversas trayectorias de cambios. **Materiales y métodos.** se utilizaron series temporales de mapas de coberturas terrestres para identificar los cambios en el período 1986-2012, se construyeron matrices de transición y se espacializaron las principales trayectorias. **Resultados.** en la cuenca río Grande se observó una variación en coberturas terrestres tanto en el espacio como en el tiempo, y una expansión de la cobertura forestal durante el último período (1997-2012) debido al abandono de tierras dedicadas a usos agrícolas extensivos. **Conclusión.** la larga historia de ocupación de esta región, por actividades asociadas con la cobertura de pastos predominante, no parece impedir los procesos graduales de recuperación de bosques. Se hace importante preservar los remanentes de bosques actuales y establecer un equilibrio entre la producción agrícola y la presencia de funciones ecosistémicas, principalmente aquellas asociadas con la provisión de agua, debido a que este tipo de regiones de media-alta montaña proveen

¹ Artículo de investigación resultado del proyecto Determinantes Espacialmente Explícitos de Transiciones en Coberturas Terrestres con Significativo Impacto para la Provisión de Servicios Ecosistémicos, el cual hace parte del Programa de Investigación de la Gestión del Riesgo por Cambio Ambiental en Cuenclas Hidrográficas, convocatoria de Colciencias No 543-2011. Administrado por Unión Temporal Gestión del Riesgo Ambiental. Nit. 900.543.442-7, teléfono: +574 219 5849, +574 2198816, Calle 70 # 52-72 Of-707, Medellín, Colombia

² Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia-Medellín. davidsord2015@gmail.com

³ PhD. Forest Resources and Management. Oregon State University. Docente, Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia. saorrego@unal.edu.co

Autor para correspondencia: davidsord2015@gmail.com

de agua potable a las grandes ciudades de la región andina.

Palabras clave: Andes colombianos, cuenca, recuperación forestal, trayectorias, Sistemas de Información Geográfica - GIS.

Land cover change trajectories in a Colombian Andes´ basin: Río Grande, 1986-2012

▣ ABSTRACT

Introduction. Land-cover-change trajectories are related to different dynamics in the use of land in specific regions, and reveal a close relationship between human and environmental systems that may affect the ecosystem´s provision of goods and services.

Objective. Quantify land-cover changes in Río Grande basin between 1986 and 2012, based on data from remote sensors, in order to identify several land cover trajectories. **Materials and methods.** Time-series of classified Landsat images between 1986 and 2012 were used to identify land cover changes; transition matrices were constructed and the main trajectories were mapped. **Results.** In the Río Grande basin a variation in land cover, in both space and time, was observed, and in the last period (1997-2012) the forest cover was expanded by the abandonment of lands previously dedicated to extensive agricultural uses. **Conclusion.** The long history of occupation of this region,

with activities of land use associated with the predominant pasture coverage, does not seem to prevent the gradual processes of forest recovery. It is important to preserve the remnants of existing forests and to establish a balance between agricultural production and the presence of ecosystem functions, particularly those associated with the provision of water, because regions such as the middle-high mountains provide drinking water to large cities in the Andean region.

Key words: colombian Andes, watershed, forest recovery, trajectories, GIS-Geographical Information Systems.

Trajetórias de mudanças nas coberturas terrestres em uma bacia dos andes colombianos: rio grande, 1986-2012

▣ RESUMO

Introdução. As trajetórias de mudanças em coberturas terrestres respondem a diversas dinâmicas de uso da terra em regiões específicas, e refletem a estreita relação entre sistemas humanos e ambientais que podem afetar a provisão de bens e serviços ecossistêmicos. **Objetivo.** Quantificar as mudanças em coberturas terrestres na bacia do rio Grande, no período 1986-2012 a partir de dados provenientes de sensores remotos com o fim de identificar diversas trajetórias de mudanças. **Materiais e métodos.** Se utilizaram séries temporais

de mapas de coberturas terrestres para identificar las mudanças no período 1986-2012; se construíram matrizes de transição e espacialização das principais trajetórias.

Resultados. Na bacia rio Grande, se observou uma variação em coberturas terrestres tanto no espaço como no tempo, e uma expansão da cobertura florestal durante o último período (1997-2012) devido ao abandono de terras dedicadas a usos agrícolas extensivos.

Conclusão. A longa história de ocupação desta região, por atividades associadas com a cobertura de pastos predominante, não parece impedir os processos graduais de recuperação de bosques. Se faz importante preservar os remanentes de bosques atuais e estabelecer um equilíbrio entre a produção agrícola e a presença de funções ecossistêmicas, principalmente aquelas associadas com a provisão de água, devido a que este tipo de regiões de meia-alta montanha fornecem água potável às grandes cidades da região Andina.

Palavras chave: Andes colombianos, bacia, recuperação florestal, trajetórias, Sistemas de Informação Geográfica-GIS

■ INTRODUCTION

El cambio en el uso de la tierra históricamente ha sido el resultado y la causa de diversas interacciones entre los sistemas sociales y naturales, que configuran una estrecha interacción sociedad-ambiente, caracterizada por una alta diversidad de trayectorias de cambio a través del espacio y el tiempo (Verburg, Berkel, Doorn, Eupen, Harm A. R. M. Van Den Heiligenberg, 2009). Esta ha sido una de las preocupaciones de mayor

interés para la comunidad científica y los formuladores de políticas que buscan manejar sosteniblemente los recursos naturales, puesto que los cambios en coberturas y usos de la tierra (Land Use Land Cover Change, LULCC por sus siglas en inglés) afectan el bienestar humano por la alteración en la provisión de servicios ecosistémicos (Bieling, Plieninger & Schaich, 2013; Du, Liu & Zeng, 2008) y por tanto se vuelven cruciales para la sociedad en un contexto global y local de sostenibilidad (Turner, Lambin & Reenberg, 2007).

Ante la dificultad de encontrar patrones discernibles y generalizables, la cuantificación específica de LULCC constituye uno de los principales indicadores de magnitud y duración de interacciones entre actividades humanas y ambientes naturales (Zhou, Li & Kurban, 2008). Este es un insumo fundamental en procesos posteriores de modelación de cambios, específicamente en transiciones importantes como la deforestación (Mertens & Lambin, 2000; Munroe, Southworth & Tucker, 2004; Wyman & Stein, 2010) o la recuperación forestal (Crk, Uriarte, Corsi & Flynn, 2009); y es posible incluso relacionar dichos cambios de manera directa con los impactos antrópicos y las variables específicas que los gobiernan, a escalas locales y en diferentes períodos de tiempo (Nagendra, Southworth & Tucker, 2003).

El análisis de coberturas terrestres se ha centrado generalmente en procesos que causan la deforestación y a menudo no se tienen en cuenta las demás trayectorias que coexisten en el paisaje, cuyos determinantes pueden tener también una variación espacio-temporal, tal como ocurre con la deforestación (Aguilar, Câmara & Escada,

2007]. Las demás transiciones no son contempladas en la mayoría de estudios, pese a que hace ya más de una década se ha señalado que dichos cambios son de una alta complejidad temporal y espacial (Mertens & Lambin, 2000).

Los cambios en coberturas terrestres pueden ser identificados fácilmente a través de la comparación de mapas sucesivos de coberturas terrestres. Monitoreo que se ha hecho posible gracias al avance en sistemas de información geográfica, métodos de procesamiento digital de imágenes satelitales y la mayor disponibilidad de series temporales y espaciales de imágenes. A partir de estas series de imágenes es posible identificar trayectorias claras de LULCC en lugares geográficos de interés (Bieling, Plieninger & Schaich, 2013; Lira, Tambosi, Ewers & Metzger, 2012; Lu, Li, Moran & Hetrick, 2013; Mertens & Lambin, 2000; Zhou, Li & Kurban, 2008).

A nivel nacional y regional se han abordado comúnmente cuestiones como: la extensión e importancia relativa de ciertos cambios (Etter, Mcalpine, Phinn, Pullar & Possingham, 2006a; 2006b; Etter, Mcalpine, Pullar & Possingham, 2006; Rodríguez, Armenteras, Molowny-Horas & Retana, 2011), la presencia de cambios que constituyen un interés especial para políticas de desarrollo (Armenteras, Rodríguez & Retana, 2009) y el monitoreo y evaluación de patrones diferenciables de cambios (Etter, McAlpine, Wilson, Phinn & Possingham, 2006; Rodríguez, Armenteras, Molowny-Horas & Retana 2011). Sin embargo, en Colombia generalmente se ha puesto poca atención en la interacción y la existencia de diversas trayectorias LULCC y el análisis se ha centrado más en establecer

porcentajes de cambio y tasas de cambio para procesos particulares como deforestación.

En Colombia se han realizado esfuerzos por entender las causas directas y subyacentes de la deforestación (González et al., 2011; Orrego, 2009; Ramírez & Orrego, 2011), y en algunos casos se han determinado los cambios en coberturas terrestres y sus causas, haciendo énfasis en patrones discernibles de cambios (Etter, Mcalpine, Phinn, Pullar & Possingham, 2006^a; 2006b; Etter, Mcalpine, Pullar & Possingham, 2006; Etter, Mcalpine, Wilson, Phinn & Possingham, 2006). Sin embargo generalmente existen problemas relacionados con la existencia y manejo de diferentes fuentes de información de las cuales provienen los mapas de coberturas, y se han encontrado tendencias, incluso contradictorias, debido a la variación en la definición de bosque y a otros detalles metodológicos que indican un predominio de recuperación forestal (Sánchez-Cuervo, Aide, Clark & Etter, 2012) o de la deforestación (Cabrera et al., 2011) en el país.

Generalmente se clasifica la cobertura terrestre en dos categorías: bosque, no bosque (Cabrera et al., 2011; González et al., 2011), lo cual no permite discernir patrones específicos de cambios a nivel local, y por tanto limita la posibilidad de identificar directamente cambios asociados con el paisaje y las actividades humanas que se desarrollan a escala local. A nivel de cuenca, es escasa la información sobre extensión de coberturas terrestres, como un insumo importante para el ordenamiento del territorio de las cuencas estratégicas del país, en las cuales los LULCC podrían poner en peligro la disponibilidad de los servicios ecosistémicos y la sostenibilidad general de la población.

El objetivo de este artículo es cuantificar los procesos de cambio en coberturas terrestres en la cuenca del río Grande con base en datos provenientes de sensores remotos e identificar patrones característicos de trayectorias en coberturas. Entender estos cambios se considera una acción importante para planificar intervenciones políticas específicas a nivel de cuenca, como información base para orientar acciones específicas (mantener los recursos naturales o desincentivar usos alternativos de la tierra), en ecosistemas de media montaña que tienen una innegable y alta importancia para la provisión de servicios ecosistémicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio es la cuenca hidrográfica del río Grande (figura 1), con aproximadamente 1.300km²(área calculada en ArcGIS™ v.10.0). Localizada en el norte del departamento de Antioquia, provee agua al área metropolitana

del Valle de Aburrá. La cuenca hace parte de la cuenca hidrográfica del río Porce; su área se inscribe en jurisdicción de los municipios de: San Pedro de los Milagros, Entreríos, Belmira, Don Matías y Santa Rosa de Osos, en el altiplano de la Subregión Norte. Se considera una cuenca estratégica por la provisión de servicios ecosistémicos al Área Metropolitana de Valle de Aburrá (AMVA) y a la ciudad de Medellín, especialmente por los servicios asociados con el aprovisionamiento de agua potable para consumo humano y energía eléctrica. La región del Altiplano Norte de Antioquia se caracteriza por una topografía que varía desde plana en algunos sitios como el Llano de Ovejas, hasta escarpada en las partes más altas de las montañas; pero en general predomina una topografía ondulada de colinas suaves. Los suelos son derivados de ceniza volcánica o descomposición de la cuarzodiorita, de baja fertilidad, sometidos a intenso lavado, muy ácidos, deficientes en fósforo y calcio, y con un contenido de materia orgánica medio a alto (Lopera & Bernal,1972).

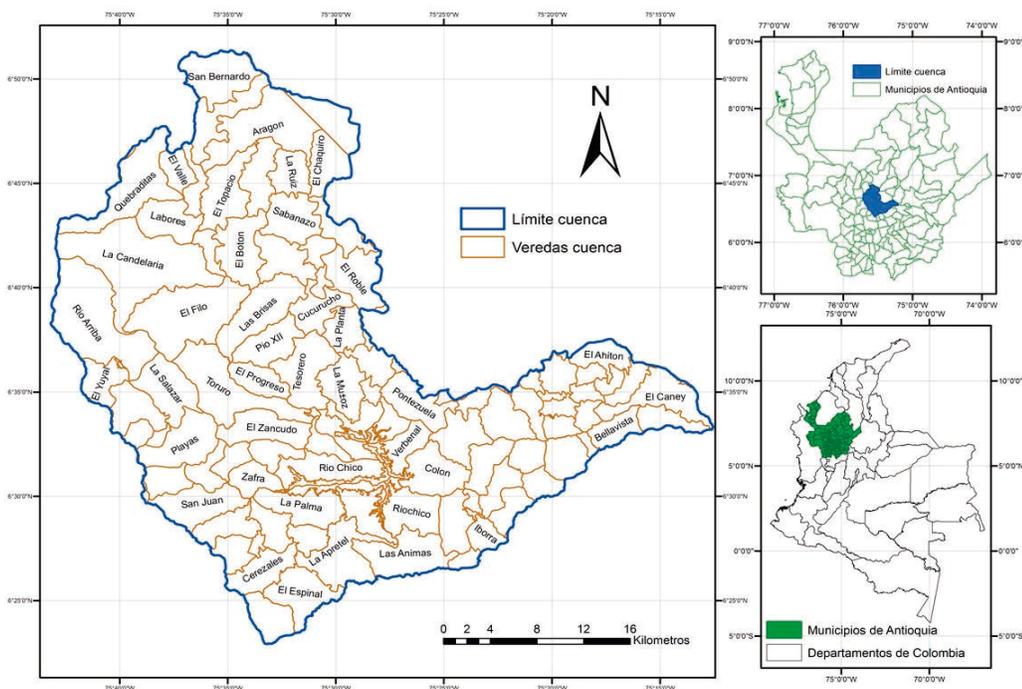


Figura 1. Localización de la cuenca del río Grande, Antioquia, Colombia

La región pertenece a la zona de vida bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) de la clasificación de Holdridge con algunas áreas que pertenecen a las formaciones de bosques muy húmedo montano (bmh-M) y bosque pluvial montano bajo (bp-MB). Para 1972 se tienen registros de que la mayor parte del área se encontraba en pastos nativos con pequeñas áreas en bosque primario, la agricultura era ya escasa con excepción de algunas áreas en los municipios de San Pedro, Don Matías y Entreríos, que se dedicaban principalmente al cultivo de papa, maíz y pastos de corte (Lopera & Bernal 1972).

■ DATOS

La información de coberturas terrestres en la cuenca del río Grande, períodos 1986-1997, 1997-2012 y 1986-2012, se obtuvo de un análisis multitemporal de coberturas terrestres, por procesamiento digital de tres imágenes de satélite disponibles para el período de lluvias: dos imágenes (TM86 y TM97) del satélite Landsat 5, del 8 de septiembre de 1986 y 24 de octubre de 1997, y una imagen (ETM12) del satélite Landsat 7, con fecha del 7 de septiembre de 2012.

Para la definición de coberturas se definieron nueve tipos distintos de coberturas: bosque, bosque plantado, espejos de agua, pasto, rastrojos, suelo desnudo, territorio artificializado, vegetación de páramo y una categoría sin información, que corresponde a áreas con nubes y sombras de nubes, o áreas que presentan un bandeo (gaps) por la falla óptica que presenta desde el año 2003 el sensor Landsat 7 Scan Line Corrector (SLC-off). Las imágenes se procesaron con un

clasificador subpixel conocido como Support Vector Machine-SVM, en el cual el valor espectral de cada pixel corresponde a una combinación lineal o no lineal de las coberturas o clases puras definidas (*endmembers*) y que se hallan en cada pixel⁴. Luego se realizó post-procesamiento que consistió en la limpieza y mejora del aspecto general del resultado de la clasificación.

La información de coberturas terrestres obtenida de la clasificación de las imágenes de satélite se empleó para consolidar archivos vectoriales de cambios en coberturas para toda la cuenca del río Grande, y tres períodos de tiempo: 1986-1997, 1997-2012 y 1986-2012. Se construyeron matrices de transición con los principales cambios observados en la cuenca, y se calcularon las probabilidades de transición de coberturas en cada período. Ello permitió realizar una descripción general de las principales trayectorias de cambios en la cuenca y develar el porcentaje de área del total de la cuenca que representan estas categorías. Las transiciones entre coberturas de bosque y no bosque se asignaron al mapa de intersección de los tres años de análisis, usando las categorías de bosque (B) y no bosque (NB) definidas en un estudio previo en Camerún (Mertens & Lambin 2000), y que han sido categorías usadas en otros estudios con propósitos similares (Mena 2008; Munroe et al., 2004, Nagendra et al., 2003). Se calculó para cada período el porcentaje con respecto a la superficie total de la cuenca de las áreas en cada una de las transiciones, y luego estas se representaron espacialmente.

4 Los productos del procesamiento se validaron con tres criterios: i) matriz de confusión con un análisis orientado a objetos (OOA por sus siglas en inglés); ii) coeficiente Kappa; iii) producer's/user's accuracy. El procedimiento general estandarizado de interpretación de las imágenes se presenta en el proyecto de investigación del cual se deriva el presente artículo, financiado por Colciencias.

■ RESULTADOS

Se presentan los mapas de coberturas terrestres para la cuenca del río Grande, años 1986, 1997 y 2012 (figura 2). Las matrices de cambios para distintas coberturas terrestres y los períodos 1986-1997 y 1997-2012 se presentan en las tablas 1 y 2, respectivamente. En el primer período, de 26.227,15 ha de bosques existentes en 1986, once años después permanecieron en esa cobertura 19.695,51 ha, es decir, 75,1% del área original (tabla 1). Para el mismo período, un total de 3.193,63 ha en bosques se convirtieron a pastos, con una probabilidad

de transición de 0,12. No obstante, el área total en pastos se redujo levemente en 3,61% [84.828,87 ha versus 81.760,73 ha, tabla 1], y corresponde a cambios a bosques y rastrojos, principalmente. Se presentó un aumento en el área correspondiente a espejos de agua, al variar de 407,83 ha en 1986 a 1.320,99 ha en 1997, lo que se explica por la construcción del proyecto hidroeléctrico y embalse río Grande II (figura 2). En general, entre 1986 y 1997, se observó un aumento neto en el área cubierta con pastos y con vegetación de páramo, así como una disminución neta en las coberturas bosque, rastrojo y suelo desnudo.

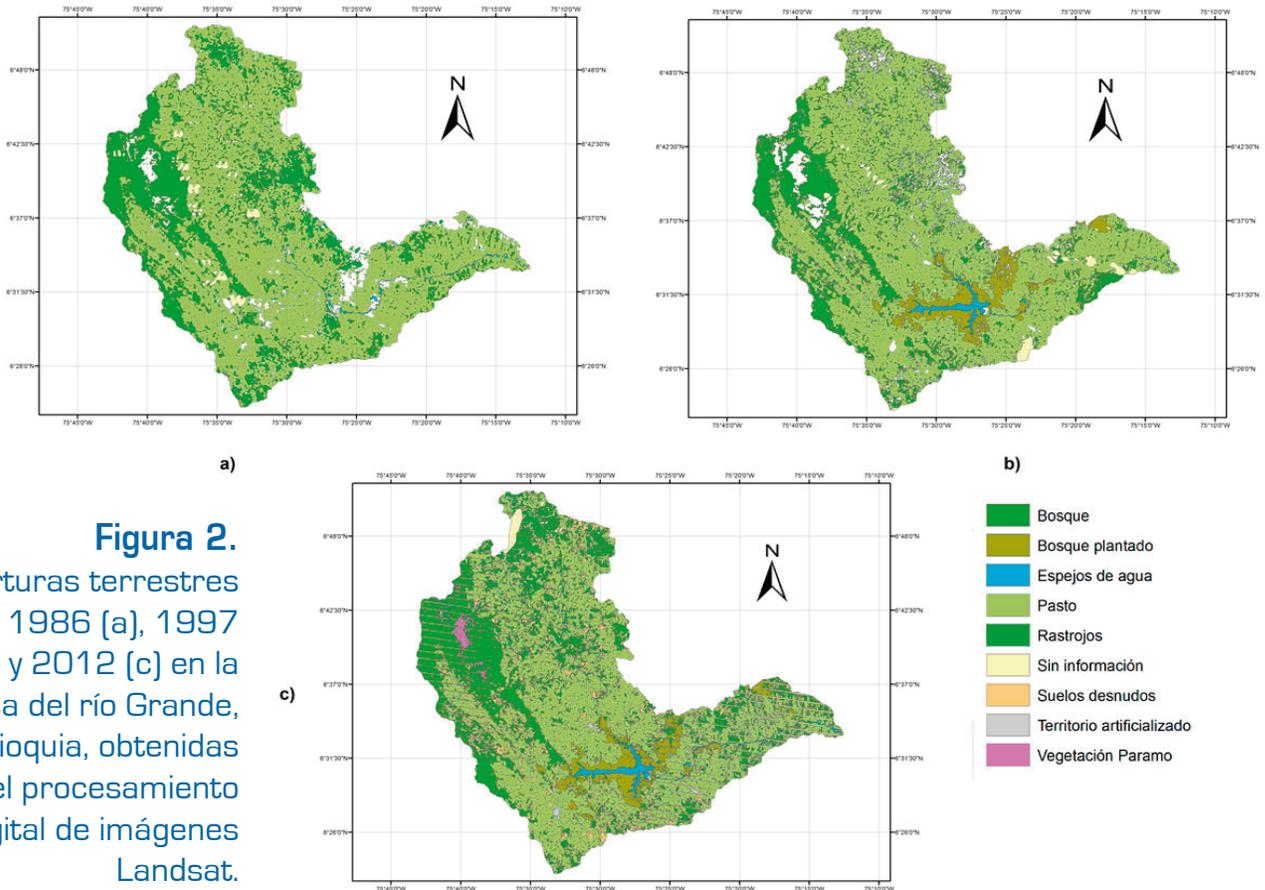


Figura 2.
Coberturas terrestres 1986 (a), 1997 (b) y 2012 (c) en la cuenca del río Grande, Antioquia, obtenidas del procesamiento digital de imágenes Landsat.

Tabla 1. Matriz de cambios [ha] en las coberturas terrestres y probabilidades de transición en la cuenca del río Grande, Antioquia, 1986-1997.

Cobertura, 1986	Cobertura, 1997									
	B	BP	EA	P	R	SI	SD	TA	VP	Total
B	19.695,51 (0,751)	435,15 (0,017)	17,12 (0,001)	3.193,63 (0,122)	585,82 (0,022)	585,82 (0,022)	9,02 (0,000)	1,44 (0,000)	916,28 (0,035)	26.227,15
BP	295,10 (0,074)	2.955,20 (0,737)	43,52 (0,011)	515,76 (0,129)	44,64 (0,011)	150,47 (0,038)		2,48 (0,001)		4.007,16
EA	7,26 (0,018)	7,35 (0,018)	343,48 (0,842)	35,92 (0,088)		13,82 (0,034)				407,83
P	3.299,60 (0,039)	3.162,30 (0,037)	760,22 (0,009)	72.335,12 (0,853)	2.008,17 (0,024)	2.928,65 (0,035)	90,98 (0,001)	200,22 (0,002)	43,61 (0,001)	84.828,87
R	956,89 (0,127)	487,69 (0,065)	25,35 (0,003)	2.946,54 (0,392)	2.535,13 (0,337)	511,38 (0,068)	511,38 (0,004)	10,46 (0,001)	7,65 (0,001)	7.513,57
SI	658,21 (0,208)	133,98 (0,042)	59,30 (0,019)	1.960,45 (0,619)	117,35 (0,037)	224,79 (0,071)	1,03 (0,000)	4,17 (0,001)	8,55 (0,003)	3.167,83
SD	20,97 (0,027)	68,08 (0,088)	27,37 (0,035)	613,48 (0,792)	16,07 (0,021)	20,34 (0,026)	6,54 (0,008)	1,35 (0,002)		774,20
TA	1,14 (0,004)	30,02 (0,099)	44,62 (0,147)	50,95 (0,168)	1,43 (0,005)	3,69 (0,012)		172,11 (0,566)		303,96
VP	24,15 (0,021)			108,88 (0,096)	24,61 (0,022)	36,78 (0,032)			938,74 (0,828)	1.133,16
Total	24.958,84	7.279,76	1.320,99	81.760,73	5.333,21	5.263,09	140,05	392,22	1.914,83	128.363,73

Las categorías de coberturas terrestres son: bosque (B), bosque plantado (BP), espejos de agua (EA), pasto (P), rastrojo (R), sin información (SI), suelo desnudo (SD), territorios artificializados (TA), vegetación de páramo (VP). Entre paréntesis se presentan las probabilidades de transición de coberturas. Los valores de la diagonal principal indican las probabilidades que una cobertura no cambie en el período, mientras que los valores por fuera de la diagonal representan la probabilidad de cambio. Los valores en color rojo representan deforestación y aquellos en color verde corresponden a recuperación de la cobertura forestal.

Para el período 1997-2012 la matriz de cambios (tabla 2) indicó que el área total en bosques incrementó 3,55% (24.958,85 a 25.843,25 ha), explicado por la conversión de 4.258,61 ha de pastos a bosques. La probabilidad de permanencia de los bosques fue 0,75, similar al período 1986-1997. Un total de 1.770,55 y 1.395,5 ha en bosques se convirtieron a pastos y rastrojos, respectivamente. Las probabilidades de estas dos transiciones fueron 7,1% y 5,6%,

siendo menor y mayor, respectivamente, a las correspondientes probabilidades en el período 1986-1997. El área total cubierta con rastrojos aumentó de 5.333,21 a 9.954,25 ha (incremento del 86,6%), contrario a la disminución observada en el período 1986-1997. En general se observó un aumento neto en el área cubierta con suelo desnudo, rastrojo y bosques y una disminución neta en las coberturas vegetación de páramo y pastos.

Tabla 2. Matriz de cambios [ha] en las coberturas terrestres y probabilidades de transición en la cuenca del río Grande, Antioquia, 1997-2012

Cobertura, 1997	Cobertura, 2012									
	B	BP	EA	P	R	SI	SD	TA	VP	Total
B	18.715,13 (0,750)	345,38 (0,014)	13,31 (0,001)	1.770,55 (0,071)	1.395,50 (0,056)	2.085,28 (0,084)	616,68 (0,025)	0,27 (0,000)	16,76 (0,001)	24.958,85
BP	141,66 (0,019)	5.438,43 (0,747)	124,49 (0,017)	447,23 (0,061)	385,07 (0,053)	516,30 (0,071)	216,09 (0,030)	10,48 (0,001)		7.279,76
EA	1,11 (0,001)	11,95 (0,009)	1.265,35 (0,958)	3,88 (0,003)	5,29 (0,004)	32,99 (0,025)	0,28 (0,000)	0,14 (0,000)		1.320,99
P	4.258,61 (0,052)	718,03 (0,009)	87,16 (0,001)	56.591,80 (0,692)	5.364,52 (0,066)	6.999,96 (0,086)	7.634,03 (0,093)	92,32 (0,001)	14,31 (0,000)	81.760,73
R	584,49 (0,110)	17,80 (0,003)	0,54 (0,000)	1.834,06 (0,344)	1.698,44 (0,318)	447,01 (0,084)	700,49 (0,131)		50,37 (0,009)	5.333,21
SI	1.318,08 (0,250)	124,64 (0,024)	19,58 (0,004)	1.625,36 (0,309)	854,93 (0,162)	907,50 (0,172)	388,71 (0,074)	1,89 (0,000)	22,40 (0,004)	5.263,09
SD	5,26 (0,038)	0,68 (0,005)	2,90 (0,021)	75,28 (0,538)	4,05 (0,029)	6,86 (0,049)	45,03 (0,322)			140,05
TA	0,18 (0,000)	3,92 (0,010)	0,54 (0,001)	148,06 (0,377)	3,09 (0,008)	23,51 (0,060)	14,51 (0,037)	198,41 (0,506)		392,22
VP	818,73 (0,428)			7,78 (0,004)	243,37 (0,127)	199,76 (0,104)	17,51 (0,009)		627,68 (0,328)	1.914,83
Total general	25.843,25	6.660,83	1.513,87	62.503,99	9.954,25	11.219,17	9.633,34	303,50	731,52	128.363,74

Para el período completo de análisis, 1986-2012, se observó que de 26.268,48 ha de bosques existentes al inicio del período, 19.093,3 ha permanecieron en bosques. Ello equivale a una probabilidad de ~73% de permanencia. Sin embargo, 2.112,10 y 1.485,38 ha en bosques se convirtieron a pastos y rastrojos, respectivamente; otras 612,63 ha en bosques se convirtieron a suelos desnudos. Se presentó una sustancial disminución en el área cubierta con pastos (84.846,7 ha en 1986 a 62.507,96 ha en 2012) debido a la transición de pastos a suelo desnudo (7.465,33 ha), rastrojos (5.988,19 ha), bosques (4.832,29 ha) y bosques plantados (3.298,36 ha). La probabilidad que un área cubierta en pastos persista en esa cobertura fue 64,6%. No obstante, los pastos

constituyen la cobertura dominante en la cuenca, representando 48% del área total. Para el período completo (1986-2012), se observó un aumento neto en el área cubierta con rastrojos, bosques y suelo desnudo, y una disminución neta de las áreas cubiertas con pastos y vegetación de páramo.

Los resultados de la espacialización de las transiciones en la cuenca del río Grande (figura 3) indican que las áreas en no bosque y que permanecieron como coberturas estables en pastos, rastrojos o páramo fueron 51.621,9, 868,9, y 572,4 ha, respectivamente (tabla 3). Es decir, esas áreas, equivalentes ~55% de la superficie de la cuenca, se mantuvieron en la misma cobertura en los años 1896, 1997 y 2012. Un total de 16.424,4 ha (tabla 3),

equivalente al 12,8% del área de la cuenca, que se encontraba en bosque en 1986 se mantuvo como tal en 1997 y 2012. Un total de 16.424,4 ha [tabla 3], equivalente

al 12,8% del área de la cuenca, que se encontraba en bosque en 1986 se mantuvo como tal en 1997 y 2012.

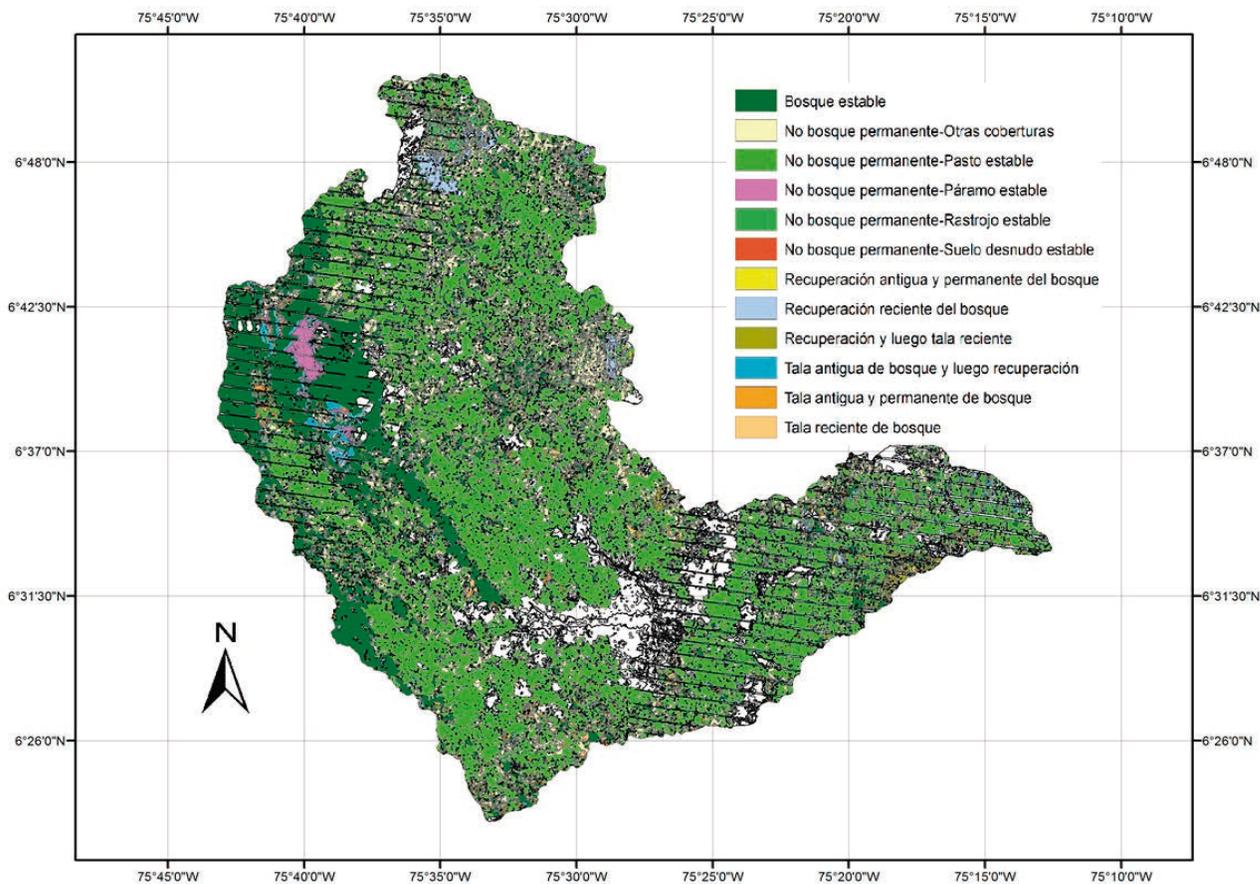


Figura 3. Transiciones de coberturas terrestres en la cuenca del río Grande, Antioquia, 1986-2012

La recuperación reciente del bosque correspondió a 3.539,5 ha, principalmente en el nororiente de Santa Rosa de Osos (figura 3) y por el contrario se observaron fragmentos de bosque recientemente convertidos, período 1997-2012 en áreas próximas en las que

se observó deforestación temprana, período 1986-1997; lo que representa un proceso de difusión espacial de la deforestación en las áreas existentes en bosques [3.636,4 de deforestación reciente versus 2.233,5 ha de deforestación temprana].

Tabla 3. Área [ha] correspondiente a las principales transiciones de coberturas terrestres en la cuenca del río Grande, Antioquia: 1986, 1997 y 2012

Tipo de cobertura				Descripción de la transición	Área [ha]	Porcentaje [%]
	1986	1997	2012			
1	B	B	B	Bosque estable	16.424,4	12,80
2	B	B	NB	Tala reciente de bosque	1.595,8	1,24
3	B	NB	NB	Tala antigua y permanente de bosque	2.233,5	1,74
4	B	NB	B	Tala antigua de bosque y luego recuperación	1.873,2	1,46
5	NB	B	NB	Recuperación y luego tala reciente	2.040,5	1,59
6	NB	B	B	Recuperación antigua y permanente de bosque	1.614,5	1,26
7	NB	NB	B	Recuperación reciente de bosque	3.539,5	2,76
8	NB	NB	NB	NB permanente-Otras coberturas	17.573,6	13,69
8	NB	NB	NB	NB permanente-Pasto estable	51.621,9	40,22
8	NB	NB	NB	NB permanente-Páramo estable	572,4	0,45
8	NB	NB	NB	NB permanente-Rastrojo estable	868,9	0,68
8	NB	NB	NB	NB permanente-Suelo desnudo y-erosión estable	4,2	0,00
NA	NA	NA	NA	Otras	28.401,2	22,13

No bosque permanente-Otras coberturas corresponde a transiciones entre todas las demás coberturas de no bosque, como bosque plantado (BP), espejos de agua (EA), sin información (SI) y territorios artificializados (TA). B: bosque, NB: No bosque

DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de coberturas terrestres en la cuenca del río Grande, Antioquia (tabla 1 y tabla 2, figura 2) revelaron que los bosques en la cuenca del río Grande tuvieron una alta probabilidad de permanencia (~73%), período 1986-2012 aún cuando se encuentran en medio de un paisaje predominantemente antrópico, con una historia de intervención que se remonta a más de 40 años (Lopera & Bernal, 1972). Los bosques se perdieron principalmente por el tránsito a coberturas de pasto (8% de probabilidad) y en menor medida a rastrojo y suelos desnudos.

Aunque los pastos constituyen la cobertura terrestre predominante en los tres períodos

analizados, su área disminuyó en el período 1986-2012, y cambiaron a áreas con suelos desnudos o se abandonaron para luego permitir el establecimiento de vegetación leñosa de porte bajo y de bosques, en un proceso de recuperación forestal. Este patrón parece ser común en otras áreas de media y alta montaña en el trópico que tienen una larga historia de intervención antrópica (Etter, Mcalpine, Wilson, Phinn & Possingham, 2006, Rodríguez, Armenteras-Pascual & Alumbroeros, 2013). El incremento en rastrojos ocurrió en el período más reciente 1997-2012, debido a la recuperación proveniente de pastos y al proceso de degradación forestal, entendido como la reducción significativa en la densidad de árboles o en la proporción de cobertura forestal, o el cambio de bosques de dosel cerrado a bosques fragmentados.

Los pastos que se mantuvieron estables durante los 26 años de análisis se usaron en el sistema de ganadería de leche, y prevalecen dada la existencia de sistemas productivos encadenados, como porcicultura-pasto-lechería (la porquinaza se usa como abono para los pastos), o papa-pasto-lechería (se permite el cultivo de papa para mejorar las condiciones de fertilidad del suelo y luego sembrar pasto).

Los remanentes de bosques en los que domina la especie roble (*Quercus humboldtii*) se encuentran formando un paisaje muy fragmentado por la expansión de la frontera agrícola y pecuaria, la construcción de vías, la extracción comercial de madera, la demanda de maderas como recurso energético y factores regionales como minería, ataque de plagas y enfermedades, entre otros (Rodríguez & Zapata, 1996). Las amenazas sobre ellos obligan a orientar los esfuerzos de conservación en los Andes colombianos (Armenteras, Gast & Villareal, 2003) y fortalecer las acciones en Distrito de Manejo Integrado DMI del Sistema de Páramos y Bosques Altoandinos del Noroccidente Medio Antioqueño- SPBANMA. Se requiere facilitar la regeneración en área cercanas y disminuir la intensidad de la actividad agrícola como ha ocurrido en otros sitios (Thomlinson, Serrano, López, Aide & Zimmerman, 1996); así como mejorar las prácticas de pastoreo por parte de las comunidades locales, gobierno y administradores ambientales tal como en el altiplano de Bolivia (Brandt & Townsend, 2006).

El análisis de coberturas coincide con los reportes históricos de uso de la tierra, los cuales para la región del altiplano norte indicaban 40,02% principalmente de pastos

nativos de baja calidad (sometidos a un sistema deficiente de manejo y usados en pastoreo), y una cobertura de bosques en cerca del 38,02% de la zona (Lopera & Bernal, 1972). Se evidenció una dinámica de cambios en coberturas tanto en el espacio como en el tiempo (tabla 1 y tabla 2, figura 2), en la cual fue notable la reducción en pastos, aunque muchas áreas permanecieron en no bosque. Aún con el predominio de una matriz de pastos se presentó una expansión reciente (1997-2012) de la cobertura forestal, debida al abandono de tierras en usos agrícolas extensivos, sin embargo este paisaje altamente fragmentado podría implicar menores opciones de recuperación de los bosques, si se compara con otros paisajes en los que parches de suelos desnudos o áreas fuertemente perturbadas se encuentran dentro de una matriz de bosque (Chazdon, 2003).

La cuenca del río Grande presenta una larga historia de alteración antrópica, común a lo observado en otras regiones de media y alta montaña en Colombia, utilizadas para establecer sistemas de producción (Etter, Mcalpine, Wilson, Phinn & Possingham, 2006; Etter & Wyngaarden, 2000; Rodríguez et al., 2012). Por ello, una importante área de la cuenca (~55%) se mantuvo en la misma cobertura terrestre en los años 1986 a 2012. Sin embargo se están presentando procesos de disminución en áreas de pastos y aumento neto en las coberturas de rastrojos y bosques, durante el segundo período de estudio (1997-2012).

Aunque no parece existir literatura previa que describa la ocurrencia de pequeñas áreas recuperadas en bosques altoandinos o en altiplanos, los bajos valores de recuperación

parecen consistentes con lo observado en otros sitios previamente ocupados con pastos, como la Amazonía donde los pastos altamente degradados dificultan la colonización de especies arbóreas (Nepstad, Uhl, Pereira, Silva & Silva, 1996), y Luquillo, Puerto Rico, donde la presencia de pastos y la rápida colonización del sitio por especies herbáceas y helechos, inhibe la recuperación del bosque secundario (Aide, Zimmerman, Herrera, Rosario & Serrano, 1995). Los resultados encontrados parecen ser similares a otro altiplano en Colombia (Mendoza & Etter, 2002), en la cual se señaló una tendencia de estabilización en la pérdida de bosques e incluso un leve incremento en el área de bosques entre 1940 y 1996.

El área deforestada en la cuenca del río Grande tampoco fue mucha en magnitud, dada la alta dominancia de los pastos y que la mayoría de los bosques en el período 1997-2012, estuvieron localizados en condiciones bastante restrictivas para la actividad de ganadería de leche, por ser sitios con muy altas pendientes. Esto es similar a la situación de un altiplano de Bolivia en donde el suelo desnudo y el pasto constituyeron ~97% de la extensión total, y posiblemente las mínimas conversiones de coberturas se debieron a condiciones ambientales restrictivas para las actividades de uso de la tierra, asociadas con topografía, suelos, clima y disponibilidad de agua (Brandt & Townsend, 2006).

En la cuenca se consolidó el sistema de ganadería de leche semi-intensiva, motivado por las características físicas de la región y la creación de la Cooperativa Lechera de Antioquia (COLANTA) en el año de 1964 (CORANTIOQUIA & Universidad Nacional de Colombia, 2012). Esta característica de alta

intervención antrópica se ha encontrado en otras regiones con otros sistemas, como las tierras altas del este de Madagascar en las que ha predominado los pastizales para ganado Zebú (Vågen, 2006). El patrón de crecimiento de la vegetación leñosa y arbustiva en la cuenca durante el último período 1997-2012, coincide con la ganancia en vegetación leñosa que se reportó en las ecoregiones de bosques montanos localizadas en los andes montañosos de Colombia (Sánchez-Cuervo, Aide, Clark & Etter, 2012); en las cuales se considera que los incrementos son probablemente explicados por causas humanas como el abandono de los sistemas productivos tradicionales en los años 90 debido a condiciones ambientales adversas y procesos de globalización que han promovido una fuerte migración rural en muchos municipios (Sánchez-Cuervo et al., 2012).

En general en esta cuenca, la dinámica de cambios en coberturas terrestres es similar a lo que ocurre en los Andes colombianos (Rodríguez et al., 2012) en donde se han encontrado transiciones sistemáticas entre las categorías de pastos, vegetación secundaria y cultivos, como un práctica tradicional de uso de la tierra en la región. Particularmente, la ganancia neta de la vegetación secundaria que se evidenció en toda la región de los Andes colombianos (Rodríguez et al., 2012), también coincide con las tendencias en otras áreas montañosas tropicales (Gómez-Mendoza, Vega-Peña, Ramírez, Palacio-Prieto, Galicia 2006; Redo, Bass & Millington 2009).

Un cambio bastante preocupante en la cuenca, es la reducción del área en páramos debido a su conversión a bosques y rastrojos durante todo el período, dado que se

podría modificar seriamente las funciones hidrológicas especialmente en cuanto al régimen hidrológico, la oferta de agua y la regulación hídrica asociadas a los páramos (Buytaert et al. 2006) y los ecosistemas de alta montaña (Bruijnzeel, 2004; Céleri & Feyen, 2009). Pese a esta tendencia, existió una dinámica de expansión (1986-1997) y pérdida (1997-2012) de este ecosistema que se equilibró casi totalmente y por tanto podría investigarse en el futuro para entender procesos como paramización (colonización de la vegetación de páramo después de que un sitio ha sido talado para adecuar el terreno para cultivo o introducción de ganado). Para ello debe tenerse en cuenta que tales cambios también podrían ser resultado de limitaciones en el clasificador supervisado utilizado (SVM), asociadas con los supuestos de distribución normal de las clases de coberturas o la selección de los parámetros clave como las funciones kernel; esto podría significar deficiencias en la separación de clases cercanas y por tanto podrían presentarse pequeñas áreas con cambios que parecen poco probables en un período de 10 años.

Los cambios en río Grande son pequeños en magnitud y similares a las mínimas conversiones entre 1985-2003 en el Altiplano de Bolivia donde predominan los pastos y los suelos desnudos (~ 97%) (Brandt & Townsend, 2006), cuyos autores atribuyen a las condiciones ambientales, de suelos, topografía y disponibilidad de agua que restringen las actividades de uso de la tierra; y estos resultados difieren de los encontrados recientemente en una región de pastizales Jalca en Perú (Tovar, Seijmonsbergen & Duivenvoorden, 2013), en la cual se presenta una sustitución del ecosistema natural por la

agricultura, y por el aumento de plantación de árboles y minería.

CONCLUSIÓN

En la cuenca del río Grande se observó una variación en coberturas terrestres tanto en el espacio como en el tiempo en los períodos 1986-1997 y 1997-2012. Se evidenciaron procesos de deforestación y recuperación forestal en medio de una matriz predominante de pastos para ganadería de leche y un paisaje complejo dominado por mosaicos de pastos y cultivos. Los principales cambios señalaron una disminución gradual del área en pastos, que ha dado paso a un proceso de recuperación forestal reciente, aunque continúan existiendo áreas de pérdida de bosques y páramos. Los procesos de cambios en coberturas observados podrían tener un efecto importante en la oferta o provisión de servicios ecosistémicos por parte de los sistemas naturales existentes en la cuenca, en escenarios futuros de política y dinámica del paisaje.

La aproximación usada en la presente investigación puede utilizarse en otras cuencas estratégicas del país para el entendimiento de las múltiples trayectorias de cambios en las coberturas terrestres. Los resultados presentados podrían ser integrados con información espacialmente explícita, para determinar las variables más relacionadas con los cambios observados en el paisaje y su importancia relativa en una cuenca estratégica por la provisión de servicios ecosistémicos para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

▣ AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación proporcionada por el proyecto de investigación

Determinantes espacialmente explícitos de transiciones en coberturas terrestres con significativo impacto para la provisión de servicios ecosistémicos, el cual hace parte del Programa de Investigación de la Gestión del Riesgo por Cambio Ambiental en Cuencas Hidrográficas. Programa que es financiado por Colciencias y ejecutado por una Unión Temporal constituida por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, la Universidad de Antioquia, la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (Corantioquia), y la Cooperativa Lechera del Norte de Antioquia (Colanta). Se agradece también a Jaime Humberto Benjumea Tobón, por su labor en la determinación de coberturas del suelo, utilizando imágenes multiespectrales del sensor Landsat.

▣ REFERENCIAS

- Aguiar, A. P., Câmara, G. & Escada, M. I. (2007). Spatial statistical analysis of land-use determinants in the Brazilian Amazonia: Exploring intra-regional heterogeneity. *Ecological Modelling*, 209(2-4), 169-188. doi:10.1016/j.ecolmodel.2007.06.019
- Aide, T., Zimmerman, J. K., Herrera, L., Rosario, M. & Serrano, M. (1995). Forest recovery in abandoned tropical pastures in Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*, 77(1-3), 77-86. doi:10.1016/0378-1127(95)03576-v
- Armenteras, D., Gast, F. & Villareal, H. (2003). Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes, Colombia. *Biological Conservation*, 113(2), 245-256. doi:10.1016/s0006-3207(02)00359-2
- Armenteras, D., Rodríguez, N. & Retana, J. (2009). Are conservation strategies effective in avoiding the deforestation of the Colombian Guyana Shield? *Biological Conservation*, 142(7), 1411-1419. doi:10.1016/j.biocon.2009.02.002
- Bieling, C., Plieninger, T. & Schaich, H. (2013). Patterns and causes of land change: Empirical results and conceptual considerations derived from a case study in the Swabian Alb, Germany. *Land Use Policy*, 35, 192-203. doi:10.1016/j.landusepol.2013.05.012
- Brandt, J. S. & Townsend, P. A. (2006). Land Use - Land Cover Conversion, Regeneration and Degradation in the High Elevation Bolivian Andes. *Landscape Ecology Landscape Ecol*, 21(4), 607-623. doi:10.1007/s10980-005-4120-z
- Bruijnzeel, L. (2004). Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 185-228. doi:10.1016/j.agee.2004.01.015
- Buytaert, W., Céleri, R., Bièvre, B. D., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 53-72. doi:10.1016/j.earscirev.2006.06.002
- Cabrera, E., Vargas, D. M., Galindo, G., García, M. C., Ordoñez, M. F., Vergara, L. K. & Giraldo, P. (2011). Memoria técnica

de la cuantificación de la deforestación histórica nacional-escalas gruesa y fina. Bogotá DC: IDEAM-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 106. Recuperado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/13257/13817/Memoria+T%C3%A9cnica+Deforestaci%C3%B3n+.pdf/5f2741b4-ffa1-4b58-b986-f2fbefd6d006>

Céleri, R. & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350-355. doi:10.1659/mrd.00007

CORANTIOQUIA & Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. (2012). Valoración Económica, Ecológica y Socio-cultural de Bienes y Servicios Ambientales en la Cuenca del Río Grande-Aproximación Conceptual y Metodológica. Informe Final Contrato 8811. Medellín: Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.

Crk, T., Uriarte, M., Corsi, F. & Flynn, D. (2009). Forest recovery in a tropical landscape: What is the relative importance of biophysical, socioeconomic, and landscape variables? *Landscape Ecology* *Landscape Ecol*, 24(5), 629-642. doi:10.1007/s10980-009-9338-8

Chazdon, R. L. (2003). Tropical forest recovery: Legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6(1-2), 51-71. doi:10.1078/1433-8319-00042

Du, H., Liu, Z., & Zeng, N. (2008). Effects of land use change on ecosystem services value:

A case study in the western of Jilin Province. *Geoinformatics 2008 and Joint Conference on GIS and Built Environment: Monitoring and Assessment of Natural Resources and Environments*. doi:10.1117/12.813051

Etter, A., Mcalpine, C., Phinn, S., Pullar, D. & Possingham, H. (2006a). Characterizing a tropical deforestation wave: A dynamic spatial analysis of a deforestation hotspot in the Colombian Amazon. *Global Change Biology*, 12(8), 1409-1420. doi:10.1111/j.1365-2486.2006.01168.x

Etter, A., Mcalpine, C., Phinn, S., Pullar, D. & Possingham, H. (2006b). Unplanned land clearing of Colombian rainforests: Spreading like disease? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 240-254. doi:10.1016/j.landurbplan.2005.03.002

Etter, A., Mcalpine, C., Pullar, D. & Possingham, H. (2006). Modelling the conversion of Colombian lowland ecosystems since 1940: Drivers, patterns and rates. *Journal of Environmental Management*, 79(1), 74-87. doi:10.1016/j.jenvman.2005.05.017

Etter, A., Mcalpine, C., Wilson, K., Phinn, S. & Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(2-4), 369-386. doi:10.1016/j.agee.2005.11.013

Etter, A. & Wyngaarden, W. V. (2000). Patterns of Landscape Transformation in Colombia, with Emphasis in the Andean Region. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* *Ambio*, 29(7), 432. doi:10.1639/0044-7447(2000)029[0432:politic]2.0.co;2

- Gómez-Mendoza, L., Vega-Peña, E., Ramírez, M. I., Palacio-Prieto, J. L. & Galicia, L. (2006). Projecting land-use change processes in the Sierra Norte of Oaxaca, Mexico. *Applied Geography*, 26 (3-4), 276-290. doi:10.1016/j.apgeog.2006.09.003
- González, J. J., Etter, A. A., Sarmiento, A. H., Orrego, S. A., Ramírez, C., Cabrera, E., & Ordoñez, M. F. (2011). *Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia*. Instituto de Estudios Ambientales-IDEAM, Bogotá: IDEAM.
- Lopera Rúa, H. M & Bernal E, J. (1972). Proyecto integrado de producción lechera en el altiplano norte de Antioquia. Segunda aproximación. No. Doc. 6339. CO-BAC, Santafé de Bogotá. Medellín: ICA, 1972.
- Lira, P. K., Tambosi, L. R., Ewers, R. M. & Metzger, J. P. (2012). Land-use and land-cover change in Atlantic Forest landscapes. *Forest Ecology and Management*, 278, 80-89. doi:10.1016/j.foreco.2012.05.008
- Lu, D., Li, G., Moran, E. & Hetrick, S. (2013). Spatiotemporal analysis of land-use and land-cover change in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 34(16), 5953-5978. doi:10.1080/01431161.2013.802825
- Mena, C. F. (2008). Trajectories of Land-use and Land-cover in the Northern Ecuadorian Amazon. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Photogramm Eng Remote Sensing*, 74(6), 737-751. doi:10.14358/pers.74.6.737
- Mendoza, J. E. & Etter, A. (2002). Multitemporal analysis (1940–1996) of land cover changes in the southwestern Bogotá highplain (Colombia). *Landscape and Urban Planning*, 59 (3), 147-158. doi:10.1016/s0169-2046(02)00012-9
- Mertens, B. & Lambin, E. F. (2000). Land-cover-change trajectories in southern Cameroon. *Annals of the association of American Geographers*, 90 (3), 467-494.
- Munroe, D. K., Southworth, J. & Tucker, C. M. (2004). Modeling spatially and temporally complex land-cover change: the case of western Honduras*. *The Professional Geographer*, 56 (4), 544-559.
- Nagendra, H., Southworth, J. & Tucker, C. (2003). Accessibility as a determinant of landscape transformation in western Honduras: linking pattern and process. *Landscape Ecology*, 18 (2), 141-158.
- Nepstad, D. C., Uhl, C., Pereira, C. A., Silva, J. M. & Silva, J. M. (1996). A Comparative Study of Tree Establishment in Abandoned Pasture and Mature Forest of Eastern Amazonia. *Oikos*, 76 (1), 25. doi:10.2307/3545745
- Orrego, S. (2009). Economic modeling of tropical deforestation in Antioquia (Colombia), 1980-2000: An analysis at a semi-fine scale with spatially explicit data. PhD Dissertation. Oregon State University, United States of America.
- Ramírez, C. & Orrego, S. (2011). Modelación económica con información espacialmente explícita de la deforestación en Urabá, Colombia, 1980-2000. *Semestre Económico*, 14 (29), 31-51.
- Redo, D., Bass, J. J. & Millington, A. C. (2009). Forest dynamics and the importance of place in western Honduras. *Applied*

Geography, 29 (1), 91-110. doi:10.1016/j.apgeog.2008.07.007

Rodríguez, A. & Zapata, D. (1996). Evaluación de los patrones de fragmentación en los robledales del norte de Antioquia por medio de SIG. Doctoral dissertation, Tesis ing. Forestal, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 107p.

Rodríguez Eraso, N., Armenteras-Pascual, D. & Alumbroeros, J. R. (2013). Land use and land cover change in the Colombian Andes: Dynamics and future scenarios. *Journal of Land Use Science*, 8 (2), 154-174. doi:10.1080/1747423x.2011.650228

Rodríguez, N., Armenteras, D., Molowny-Horas, R. & Retana, J. (2011). Patterns and Trends of Forest Loss in the Colombian Guyana. *Biotropica*, 44 (1), 123-132. doi:10.1111/j.1744-7429.2011.00770.x

Sánchez-Cuervo, A. M., Aide, T. M., Clark, M. L. & Etter, A. (2012). Land Cover Change in Colombia: Surprising Forest Recovery Trends between 2001 and 2010. *PLoS ONE*, 7 (8). doi:10.1371/journal.pone.0043943

Thomlinson, J. R., Serrano, M. I., Lopez, T. D., Aide, T. M. & Zimmerman, J. K. (1996). Land-Use Dynamics in a Post-Agricultural Puerto Rican Landscape (1936-1988). *Biotropica*, 28 (4), 525. doi:10.2307/2389094

Tovar, C., Seijmonsbergen, A. C. & Duivenvoorden, J. F. (2013). Monitoring land use and land cover change in mountain

regions: An example in the Jalca grasslands of the Peruvian Andes. *Landscape and Urban Planning*, 112, 40-49. doi:10.1016/j.landurbplan.2012.12.003

Turner, B. L., Lambin, E. F. & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 (52), 20666-20671. doi:10.1073/pnas.0704119104

Vågen, T. (2006). Remote sensing of complex land use change trajectories—a case study from the highlands of Madagascar. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 115 (1-4), 219-228. doi:10.1016/j.agee.2006.01.007

Verburg, P. H., Berkel, D. B., Doorn, A. M., Eupen, M. V. & Harm A. R. M. Van Den Heiligenberg. (2009). Trajectories of land use change in Europe: A model-based exploration of rural futures. *Landscape Ecology* *Landscape Ecol*, 25 (2), 217-232. doi:10.1007/s10980-009-9347-7

Wyman, M. S. & Stein, T. V. (2010). Modeling social and land-use/land-cover change data to assess drivers of smallholder deforestation in Belize. *Applied Geography*, 30 (3), 329-342. doi:10.1016/j.apgeog.2009.10.001

Zhou, Q., Li, B. & Kurban, A. (2008). Trajectory analysis of land cover change in arid environment of China. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (4), 1093-1107. doi:10.1080/01431160701355256