



¿Son los paisajes agrícolas dinámicos o estables? Estudio de caso en el lago de Tota (Boyacá, Colombia)

Andrea Milena Wanumen-Mesa * 

René López-Camacho + 

Nelly Rodríguez-Eraso ^Δ 

Resumen

El lago de Tota, considerado el humedal andino más grande de Colombia, ha experimentado procesos de cambio de uso del suelo asociados a actividades antrópicas que inciden en su manejo y conservación. Este artículo evalúa la dinámica de cambio de la cobertura del suelo durante un periodo de veinte años (1992 a 2013), mediante la elaboración de mapas de cobertura, el análisis de componentes principales (ACP), la identificación de transiciones de uso empleando *Land Change Modeler*, el análisis de estructura del paisaje y la identificación de factores socioeconómicos y de contexto relacionados con el cambio. Se encontró una persistencia del paisaje del 96,31% y el 72,36% para los periodos de 1992-2000 y 2000-2013, respectivamente, con una transición sistemática entre pastos y mosaico de pastos, y cultivos y una estructura de paisaje similar en el tiempo. El ACP permitió agrupar los municipios del área en diferentes fases de transiciones de uso: Sogamoso con fases de industrialización, Aquitania con intensificación agrícola rentable y Cúitiva y Tota con agricultura de subsistencia que se relacionan con los patrones y factores de cambio analizados. Futuros estudios sobre dinámicas de uso en el lago deberán enfocarse en los contextos socioecológicos y socioeconómicos que respalden la planificación del territorio.

Palabras clave: cambios de cobertura, estabilización del paisaje, factores de cambio, humedales andinos, índice de intensidad de cultivos, matriz de transición.

Ideas destacadas: artículo de investigación que explora la dinámica de cobertura del suelo en el lago de Tota (Boyacá, Colombia), identificando transiciones de uso, cambios en los patrones del paisaje y factores económicos, sociodemográficos y de contexto que afectan dicha dinámica.



RECIBIDO: 26 DE ENERO DE 2018. | EVALUADO: 12 DE SEPTIEMBRE DE 2018. | ACEPTADO: 4 DE ABRIL DE 2019.

CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Wanumen-Mesa, Andrea Milena; López-Camacho, René; Rodríguez-Eraso, Nelly. 2020. “¿Son los paisajes agrícolas dinámicos o estables? Estudio de caso en el lago de Tota (Boyacá, Colombia).” *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 29 (1): 207-223. doi: 10.15446/rcdg.v29n1.70014.

* Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá - Colombia. ✉ andreamwanumen@gmail.com – ORCID: 0000-0003-1493-1773.

+ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá - Colombia. ✉ rlopezc@udistrital.edu.co – ORCID: 0000-0003-2026-0371.

Δ Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá - Colombia. ✉ nrodrigueze@unal.edu.co ORCID: 0000-0001-7616-2493.

✉ Correspondencia: Nelly Rodríguez-Eraso, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.

Are Agricultural Landscapes Dynamic or Stable? Case Study in Lake Tota (Boyacá, Colombia)

Abstract

Lake Tota, Colombia's largest Andean wetland, has gone through change processes regarding land use due to anthropic activities that affect its management and conservation. The article assesses the dynamics of change in land cover during a 20-year period (1992- 2013), through the drawing of land cover maps, principal component analysis (PCA), the identification of use transitions through *Land Change Modeler*, the analysis of landscape structure, and the identification of socioeconomic and contextual factors related to that change. Findings showed that persistence of landscape was 96.31% and 72.36% in the periods 1992-2000 and 2000-2013, respectively, with a systematic transition from grasses and grass mosaics to crops and a similar landscape structure over time. PCA made it possible to organize the area's municipalities into different use transitions: Sogamoso, with industrialization phase; Aquitania, with profitable agricultural intensification; and Cúitiva and Tota, with subsistence agriculture, all related to the analyzed patterns and factors. Future studies of use in the lake should focus on the socio-ecological and socioeconomic factors to be taken into account for territorial planning.

Keywords: changes in land cover, stabilization of the landscape, change factors, Andean wetlands, crop intensity index, transition matrix.

Main Ideas: Research article that explores the dynamics of land cover in Lake Tota (Boyacá, Colombia), identifying use transitions, changes in landscape patterns, and socioeconomic and contextual factors that affect that dynamics.

As paisagens agrícolas são dinâmicas ou estáveis? Estudo de caso no lago de Tota (Boyacá, Colômbia)

Resumo

O lago de Tota, considerado a maior zona úmida andina da Colômbia, tem experimentado processos de mudança de uso do solo associados a atividades antrópicas que afetam seu manejo e conservação. Este artigo avalia a dinâmica de mudança da cobertura do solo durante um período de vinte anos (1992 a 2013), mediante a elaboração de mapas de cobertura, da análise de componentes principais (ACP), da identificação de transições de uso com o emprego do *Land Change Modeler*, da análise de estrutura da paisagem e da identificação de fatores socioeconômicos e contextuais relacionados com a mudança. Verificou-se uma persistência da paisagem de 96,31% e de 72,36% para os períodos de 1992-2000 e 2000-2013, respectivamente, com uma transição sistemática entre pastos e mosaico de pastos, e cultivos e uma estrutura de paisagem similar no tempo. O ACP permitiu agrupar os municípios da área em diferentes fases de transições de uso: Sogamoso, com fases de industrialização, Aquitania, com intensificação agrícola rentável, e Cúitiva e Tota, com agricultura de subsistência que se relacionam com os padrões e com os fatores de mudança analisados. Futuros estudos sobre dinâmicas de uso no lago deverão se focar nos contextos socioecológicos e socioeconômicos que apoiem o planejamento territorial.

Palavras-chave: mudanças de cobertura, estabilização da paisagem, fatores de mudança, zonas úmidas andinas, índice de intensidade de cultivos, matriz de transição.

Ideias destacadas: artigo de pesquisa que explora a dinâmica de cobertura do solo no lago de Tota (Boyacá, Colômbia), identificando transições de uso, mudanças nos padrões da paisagem e fatores econômicos, sociodemográficos e contextuais que afetam essa dinâmica.

Introducción

El cambio de la cobertura y uso del suelo afecta el funcionamiento de los ecosistemas y los procesos ecológicos (Dale et ál. 2000; Gutiérrez y Grau 2014; Lambin et ál. 2003; Merken et ál. 2015), incidiendo en el cambio global del ciclo carbono y la climatología regional y local, el balance hídrico, la pérdida de biodiversidad, la prestación de bienes y servicios ecosistémicos, así como en la estructura del paisaje y su variación temporal y espacial (Foley et ál. 2005; Lira et ál. 2012; MEA 2005; Turner et ál. 2001). Los procesos de cambio de uso del suelo hacia sistemas transformados convierten muchas áreas en paisajes homogéneos que pueden ser favorables o desfavorables para la prestación de servicios ecosistémicos y el bienestar del hombre. Los agroecosistemas y sistemas forestales proporcionan alimento, forraje, combustible, productos farmacéuticos y ayudan a la regulación de la calidad del suelo y del agua y el secuestro de carbono (Power 2010; Robertson et ál. 2014), o por el contrario pueden ocasionar daños ambientales asociados con el uso de fertilizantes, pérdida de hábitats naturales, degradación de la calidad del agua y disminución de servicios ecosistémicos asociados con el recurso hídricos y de suelo (Cardoso et ál. 2013; Fischer y Lindenmayer 2007; Foley et ál. 2005).

Particularmente, los procesos de intensificación y extensificación en el ámbito agrícola y ganadero producen cambios en los paisajes, optimizando su uso alrededor de un cultivo económicamente rentable o conllevando al abandono de la tierra cuando la actividad no es viable económicamente (Erb 2012; van der Sluis et ál. 2016). Estas situaciones pueden ser influenciadas por políticas agrícolas o por la evolución de las economías locales y regionales, e inciden en la velocidad del cambio de uso del suelo (Plieninger, Höchtl y Spek 2006; Primdahl, Busck y Kristensen 2004). Algunas investigaciones han encontrado que los procesos de intensificación del paisaje se relacionan con factores económicos, tecnológicos, institucionales y factores locales, donde los agricultores son los grandes modeladores de los cambios, a partir de las decisiones que toman y la trayectoria de uso predominante. La intensificación del paisaje, también, está relacionada con los mercados de globalización agrícola y la transición de una sociedad rural a una urbana (Erb 2012; Geist y Lambin 2002; Keys y McConnell 2005; Kühling, Broll y Trautz 2016).

Generalmente la dinámica de uso del suelo presenta diferentes transiciones de uso, y su impacto sobre los ecosistemas depende de la cobertura de la tierra existente antes

de la transición, la historia de uso, las condiciones sociales y económicas, el contexto ecológico y otros cambios en los sistemas sociales y biofísicos (Lambin y Meyfroidt 2010; Wang, Qiu y Ruan 2016). Foley et ál. (2005) indican que las transiciones aparecen como secuencia de regímenes de uso que van desde una vegetación natural decreciente por la ampliación de frontera, pasando por una agricultura de subsistencia y fincas de pequeña escala a una agricultura intensiva, aumentando las áreas urbanas y la protección de tierras. Sin embargo, el agotamiento de recursos, un cambio socioeconómico o innovaciones tecnológicas ajenos al sistema ecológico son fuerzas que pueden desacelerar o acelerar las transiciones del uso de la tierra en los países tropicales (Lambin y Meyfroidt 2010).

En América Latina se ha identificado que las características geográficas, los factores socioeconómicos, los parámetros biofísicos y, en menor medida, la accesibilidad, el mercado y la densidad poblacional son las variables de mayor incidencia de cambio en el uso del suelo (Wassenaar et ál. 2007). La mayoría de trabajos se han desarrollado para la Amazonia y los Andes, asociándose el cambio de uso con procesos de deforestación para la conversión de bosques en tierras de cultivo y ganadería, generalmente impulsados por el crecimiento demográfico (Armenteras y Rodríguez 2014; Carreiras et ál. 2014) o la apertura de nuevas vías de acceso para el desarrollo de proyectos sectoriales como la minería o explotación de hidrocarburos (Tapia-Armijos et ál. 2015). Para Colombia son escasos los estudios de dinámica de la cobertura y uso del suelo en ecosistemas transformados; sin embargo, se ha identificado que la intensificación agrícola, la urbanización, la industrialización, la expansión de la frontera agrícola y ganadera y el abandono de tierras marginales son las principales causas del cambio de uso del suelo, las cuales generan dinámicas heterogéneas de transformación del paisaje y patrones espaciales específicos en cada región (Etter et ál. 2006; Rodríguez, Armenteras y Alumbrosos 2013; Romero-Ruiz et ál. 2012; Sánchez-Cuervo et ál. 2012).

A pesar que los humedales son relevantes para la prestación de servicios ecosistémicos, se encuentran entre los ecosistemas más transformados del mundo y el principal motor de su pérdida es el cambio en el uso del suelo y la intensificación agrícola (Zorrilla-Miras et ál. 2014). Específicamente para Colombia, se identificó como causas importantes de cambio de uso del suelo y pérdida de hábitat de estos ecosistemas la minería, el cultivo de palma aceitera y caña de azúcar, la ganadería, la instalación y operación de represas hidroeléctricas, así

como de vías principales; asimismo, la producción de cultivos demanda y contamina el recurso hídrico (Ricaurte et ál. 2017). La historia de uso del suelo de la cuenca del lago de Tota —considerado el cuerpo de agua dulce más grande de Colombia (DNP 2014), y epicentro estratégico de comercio y de riqueza agrícola desde la época de la conquista española— ha estado asociada al recurso hídrico. Su aprovechamiento comienza desde el siglo XIX, cuando el Estado concesiona el lago para abastecimiento de agua, y se intensifica en el siglo XX, con la explotación de minas de hierro y carbón (Empresa Siderúrgica Nacional Paz del Río), el fomento de la actividad piscícola y la introducción el cultivo de cebolla junca como una alternativa de producción agrícola (DNP 2014; Pérez-Preciado 1976; Reina-Aranza y Rubio-Ramírez 2016). El uso intensivo del área ha originado una problemática ambiental del lago de Tota, y en 2014 se expide el documento CONPES 3801, enfocado en el manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica.

Teniendo en cuenta la variedad de actividades de uso que han ocurrido en el lago, cuantificar y entender el cambio y los patrones espaciales del uso del suelo en paisajes productivos es un primer paso para el ordenamiento y la gestión del territorio. Por ello, el presente estudio se centró en: (i) analizar los cambios de uso del suelo en dos periodos de tiempo, 1992-2000 y 2001-2013; ii) identificar las transiciones de uso del paisaje en términos de matriz de cambio e índices de paisaje; y (iii) evaluar los factores socioeconómicos que inciden en la dinámica de cambio del área.

Materiales y métodos

Área de estudio

La zona de estudio comprende los municipios de Aquitania, Cúitiva, Tota y Sogamoso (Departamento de Boyacá), abarcando una superficie de 132.425 ha. Dentro del área se destaca el lago de Tota, considerado el humedal altoandino de mayor extensión del país (Figura 1). El lago fue declarado como área de importancia para la conservación de aves (AICA) en 2007 y en 2012 la Red Mundial de Humedales le otorgó el globo gris, debido a amenazas por degradación, producto de actividades agropecuarias, pérdida del humedal por contaminación y exclusión de comunidades locales de su protección y buen manejo.

Hidrológicamente la zona pertenece a la parte alta de las cuencas del río Upía, Cusiana, Tunjita y Chicamocha,

y presenta un régimen de lluvias unimodal en el costado sur-oriental y un comportamiento bimodal en el frontal noroccidental, con promedios anuales que varían entre 1.375 mm y 625 mm; la humedad relativa promedio es del 83% y la temperatura media del 11,4 °C (González 2016).

En la región predomina el minifundio con predios menores de media hectárea, donde la principal actividad productiva, desde mediados de los sesenta, es el cultivo de cebolla junca (*Allium fistulosum*), principalmente en el municipio de Aquitania; este representa el 95% de la producción de la región. También se encuentra el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) y la acuicultura de la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), considerada como especie invasora y cuyo cultivo se inició desde 1950 (DNP 2014). Estas actividades tienen una amplia dependencia de los mercados urbanos, principalmente de Bogotá.

Mapas de cobertura del suelo

Para cuantificar el cambio de uso del suelo se elaboraron mapas de cobertura escala 1:100.000 de los años 1992, 2000 y 2013, utilizando imágenes satelitales Landsat TM, Landsat 7 ETM y Landsat 8 (path/row 7/56) respectivamente, con cobertura de nubes inferior al 10%. Las imágenes fueron descargadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y proporcionadas por el Banco Nacional de Imágenes del Instituto Geográfico Agustín Codazzi —en adelante, IGAC—; se efectuó la corrección geométrica y radiométrica, y se aplicaron filtros para mejorar su visualización.

La elaboración de los mapas se basó en la metodología de Corine Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM 2010), que permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, a partir de interpretación visual en pantalla de imágenes de resolución media (Landsat); así, se discriminaron las coberturas del suelo a un nivel de clase II y en algunos casos III. Se identificaron 9 categorías de cobertura: áreas urbanas, cultivos transitorios, pastos, mosaico de pastos y cultivos, bosques, plantaciones forestales, arbustos, herbazales y cuerpos de agua (Tabla 1). Para el proceso de control de calidad temática se usó una imagen Rapideye (path/row 96678) del 31 de diciembre de 2013, siguiendo el protocolo establecido en Corine Land Cover para coberturas con algún grado de incertidumbre, con 50 puntos de control verificados en campo en octubre de 2014 y revisión secundaria de producción agrícola por municipio. El proceso de digitalización y estructuración de la información se llevó a cabo en el *software* ArcGIS (10.2)®.

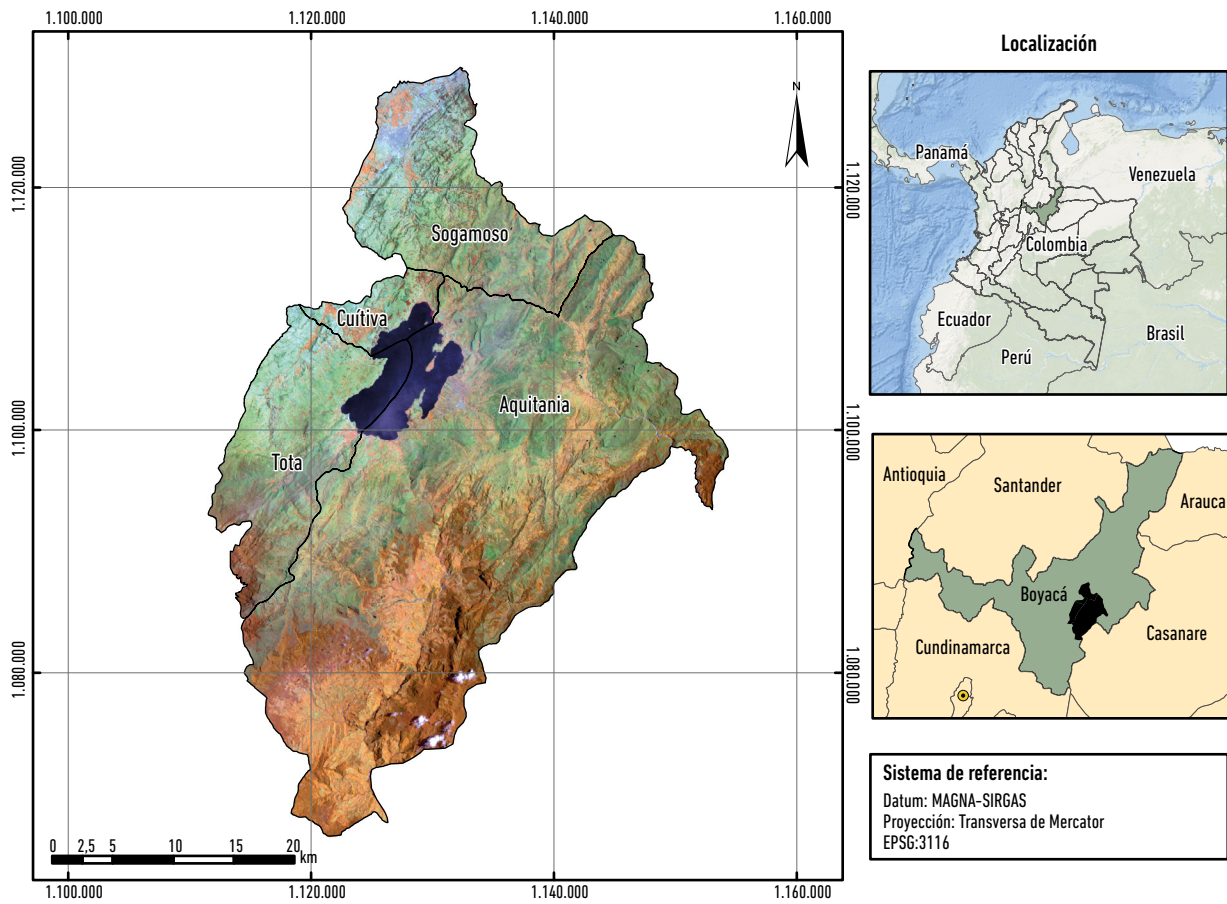


Figura 1. Localización del área de estudio.

Fuente: imagen Landsat 8 (path/row 7/56) 2013, composición RGB 453.

Nota: los tonos azules corresponden a áreas urbanas, los verdes oliva a herbazales o páramos, los marrón oscuro a bosques, los marrones claro a los pastos y el color negro al espejo de agua.

Tabla 1. Descripción de las categorías de cobertura del suelo del área del lago de Tota

Categorías	Descripción
Áreas urbanas	Incluye tejido urbano continuo y discontinuo, y algunas zonas industriales o comerciales.
Cultivos transitorios	Cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año (papa, maíz, cebolla, cebada y hortalizas).
Pastos	Áreas cubiertas por más del 70% principalmente por pastos limpios.
Mosaico de pastos y cultivos	Considerado como la mezcla intrincada de pastos y cultivos, donde ninguna de las coberturas representa más del 70%.
Bosques	Áreas naturales o seminaturales, constituidos por árboles de copas definidas, con una altura de dosel superior a 5 m.
Plantación forestal	Cobertura forestal realizada por la intervención humana directa, con fines de manejo forestal ya sean productoras o protectoras.
Arbustales	Cobertura natural de plantas perennes, con una estructura leñosa y una altura entre 0,5 y 5 m, ramificado desde su base y sin copa definida.
Herbazales	Comunidad vegetal dominada por herbáceos, no lignificados; en este se incluyen los frailejones y las herbáceas típicas de los páramos.
Cuerpos de agua	Incluye cauces y cuerpos de agua permanentes, intermitentes que comprende lagos, lagunas, ríos y canales.

Dinámica de cambio de la cobertura del suelo

Se aplicó la metodología propuesta por Pontius, Shusas y McEachern (2004), que consiste en generar una matriz de transición, la cual, a partir de una tabulación cruzada, indica las pérdidas y ganancias brutas, el cambio neto y el intercambio entre las categorías de cobertura para los intervalos de tiempo analizados (primer periodo: 1992-2000; y segundo periodo: 2000-2013). Las ganancias correspondieron a la proporción del paisaje que tuvo aportes en área en un periodo de tiempo desde otras categorías; la pérdida indicó la proporción de área que disminuyó en el intervalo de tiempo; el cambio neto representó la diferencia entre ganancias y pérdidas por categoría atribuible a los cambios en la cantidad de área; y el intercambio (*swap*) correspondió al cambio total menos el cambio neto para cada categoría. La diagonal de esta matriz indicó la persistencia, es decir, el área de una determinada categoría que permaneció inalterada o sin cambios entre los tiempos 1 y 2, tanto en términos de superficie (ha) como de ubicación espacial (Rodríguez, Armenteras y Alumbroeros 2013). Los valores de dinámica de cambio se obtuvieron en Idrisi Selva 17.0[®], mediante el uso del Módulo Land Change Modeler (LCM) (Eastman 2012); con ellos se calcularon las matrices y mapas de cambio.

Adicionalmente se calculó la tasa de cambio anual (*rt*) para cada categoría de cobertura, acorde a (Puyravaud 2003), según la Ecuación 1:

Ecuación 1.

$$rt = \frac{1}{(t_1 - t_2)} * \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right) * 100$$

Donde A_1 y A_2 son las superficies en hectáreas ocupadas por una determinada cobertura (expresadas como su logaritmo natural), para el tiempo t_1 (tiempo inicial) y t_2 (tiempo final) del análisis. Por ejemplo para el periodo 1992 y 2000, A_1 y A_2 corresponden a las hectáreas ocupadas por la cobertura de bosques en 1992 y 2000, respectivamente, y así sucesivamente para cada cobertura.

Patrón del paisaje

Los índices de paisaje reflejan las características de configuración espacial de un área (Fan y Ding 2016) e indican historias de uso del paisaje. El análisis se realizó para cada año de estudio, tanto a nivel de toda el

área como para cada municipio. Se usaron cinco indicadores propuestos por Fan y Ding (2016) y por Wan et ál. (2015) para evaluar los cambios de uso del suelo en zonas de humedales: número de parches —en adelante, NP—, índice de parche más grande —en adelante, LPI—, índice promedio de la forma del parche (SHAPE_MN), índice de contagio (CONTAG), e índice de uniformidad de Shannon —en adelante, SHEI—. Adicionalmente, a nivel de las categorías de cobertura el suelo se calculó el NP y LPI (McGarigal et ál. 2002). Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre cada par de métricas y no se encontraron relaciones significativas, excepto para el índice de parche más grande y la forma del parche ($p < 0.01$). Los cálculos fueron realizados bajo Fragstats versión 4.2[®].

Factores de cambio

Las variables explicativas del cambio de la cobertura y uso del suelo, incluyen factores directos, es decir, actividades humanas o decisiones humanas en el nivel local que directamente impactan la cobertura del suelo y factores subyacentes que impulsan los factores directos, ya sea operando a nivel local o un nivel regional o global y generalmente asociados con procesos demográficos, socioeconómicos, socioculturales, institucionales y naturales o de localización (Geist y Lambin 2002; van Asselen et ál. 2013; van Vliet et ál. 2015). La combinación de estos factores incide en la dinámica de cambio en los ecosistemas y servicios ecosistémicos, promoviendo la dominancia de determinado uso del suelo independiente si este beneficia o causa impacto sobre el ecosistema natural (MEA 2005).

Para el estudio, las variables explicativas fueron seleccionadas de acuerdo a una revisión de literatura sobre conversión de humedales (van Asselen et ál. 2013) y la disponibilidad de información de series de datos en el periodo de estudio (1992 al 2013). La Tabla 2 indica el conjunto de variables utilizadas. Adicionalmente, se estimó el índice de intensidad de uso para cultivos —en adelante, IIUC—, usado por Erb (2012) y Kühling, Broll y Trautz (2016), con el fin de medir las actividades de uso agrícola asociadas con el aumento en la demanda de alimentos; para el cálculo de este índice se seleccionaron los cultivos de papa y cebolla, tomando como variable de entrada la producción y la proporción de área destinada a estos cultivos para los periodos de tiempo analizados (Ecuación 2).

Ecuación 2.

$C = \text{producción (tn)} * \text{proporción en área de cultivos}$

Donde

C_i = es el promedio de: la producción*área destinada a cultivos en cada periodo de tiempo

C_{min} = es el valor mínimo observado en cada periodo de tiempo

$C_{\text{máx}}$ = es el valor máximo observado en cada periodo de tiempo

Análisis estadístico

Se comparó la persistencia de la cobertura del suelo en los periodos de tiempo analizados a nivel del área de estudio y de cada municipio, mediante un test no paramétrico

de rangos de Wilcoxon (w). Este test es usado para determinar si dos grupos de datos dependientes o emparejados —en este caso, la persistencia de las categorías de cobertura del suelo para el primer periodo (1992-2000) y segundo periodo (2000-2013)— son diferentes; se asume como hipótesis nula la igualdad en las persistencias en los periodos de tiempo analizados.

Con el fin de evaluar las relaciones entre los factores de cambio, se procedió a efectuar un análisis multivariante de componentes principales (ACP) (Abdi y Williams 2010; Husson et ál. 2017). Se buscó comprimir el conjunto de datos e identificar las variables que mejor explican las diferencias entre la persistencia a nivel de la zona de estudio y de los municipios que la componen. Los análisis se llevaron a cabo empleando el paquete factextra (Kassambara y Mundt 2017), bajo el lenguaje R versión 3.3.2 (R core Team 2015).

Tabla 2. Descripción de variables explicativas de la dinámica de cambio de la cobertura del suelo del área del lago de Tota

Factor	Variable	Descripción	Fuente
Demográficos	Población total	Población proyectada total por municipio (número de habitantes por municipio)	Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas - DANE 2005 (1993 a 2005)
Socioeconómicos	Población económicamente activa (PEA)	Indica la fuerza laboral efectiva de un municipio al estar constituida por las personas en edad de trabajar que están laborando o que buscan trabajo	Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas - DANE 2012 (1993 a 2012)
	Necesidades básicas insatisfechas (NBI)	Indicador compuesto que identifica carencias críticas en una población y caracteriza el grado de pobreza a partir de la evaluación del acceso a vivienda, servicios sanitarios, educación y capacidad económica	
	Nivel de escolaridad	Indica los años promedios de escolaridad: población con primaria, población con secundaria	
	Tamaño de la tierra rural	Corresponde al área de terreno predial que predomina en un municipio de acuerdo a la siguiente clasificación: porcentaje de áreas de predios menores a 5 ha, entre 5 y 10 ha y mayores a 10 ha	IGAC 2012. Predios con destinación agropecuaria base predial R1 y R2
	Índice de intensidad de cultivos (IUC)	Relaciona la producción y área destinada a los cultivos de cebolla y papa	Presente estudio con base en información de Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MAYDR)
Localización o naturales	Área natural	Hectáreas que ocupan las categorías de áreas naturales presentes en la zona de estudio	Presente estudio
	Pendiente	Porcentaje de área con pendiente menores al 12%, entre el 12% y el 25%, entre el 25% y el 50% y mayores al 50%.	IGAC

Resultados

Dinámica de Cambio

Las categorías de cobertura dominantes en el área de estudio entre 1992 y 2013 fueron pastizales y herbazales, seguidas de mosaicos de pastos y cultivos y bosques (Tabla 3). Plantaciones forestales, áreas urbanas y cultivos transitorios aumentaron en 2013. Para 1992, las coberturas naturales (herbazales, bosques, arbustos y cuerpos de agua), asociadas generalmente a pendientes superiores al 50%, ocuparon 75.808 ha, y disminuyeron para el 2013 en 4.830 ha (3,64%), donde la categoría de arbustales y herbazales presentaron pérdidas en área, con tasas de cambio anual negativa (-2,67 y -0,75 respectivamente). Las coberturas antrópicas localizadas en pendientes menores al 25% y en los alrededores del lago de Tota, estuvieron representadas por pastizales y mosaicos de pastos y cultivos con valores cercanos a 51.000 ha en ambos años (Figuras 2a, 2b y 2c).

La matriz de transición (Tabla 4) mostró que los cambios más importantes a nivel regional se dieron en las categorías de pastos y mosaico de pastos y cultivos para ambos periodos de estudio (1,49 y 2,98% para el primer periodo y 18,78% y 9,54% para el segundo periodo). El segundo periodo (2000 a 2013) presentó las mayores tasas de cambio, donde los cultivos transitorios tuvieron el mayor valor (10,28%) con una ganancia del 3,04%, mientras que el mosaico de pastos y cultivos tuvo una tasa negativa del -6,71%. Los cuerpos de agua presentaron una menor dinámica, con una leve pérdida del cuerpo lagunar (municipios de Cuítiva y Tota), mientras que las

áreas urbanas tuvieron un mayor crecimiento (municipio de Sogamoso) con un 3,75% (Figura 2b).

No se presentaron diferencias significativas en la dinámica de cobertura del suelo en los periodos analizados ($w=37$, p value= 0,34) en relación con la persistencia, la cual para el primer periodo fue del 96,31% (127.537 ha) con un cambio neto del 7,38%, mientras que para el segundo periodo descendió al 68,65% (90.915 ha) con un cambio neto de 18,66%, donde las categorías de pastos y mosaico de pastos y cultivos aportaron a este cambio (5,19% y 5,86% respectivamente) (Tabla 4 y Figura 2d). Respecto a la matriz de cambio (Tabla 5), se encontró que las categorías de pastos y mosaico de pastos y cultivos representaron las transiciones sistemáticas que inciden en la dinámica de uso, donde los mayores aportes en ganancia provinieron de las categorías de arbustales y herbazales; es decir, hay una presión sobre los ecosistemas naturales.

A nivel municipal, se presentaron diferencias significativas en las tasas de cambio y la persistencia para Aquitania ($p=0,001$), Cuítiva ($p=0,007$) y Tota ($p=0,001$). Aquitania y Sogamoso se caracterizaron por un predominio de herbazales y pastos, mientras que en Tota y Cuítiva predominó la categoría de mosaico de pastos y cultivos. La persistencia en el primer periodo fue mayor para el municipio de Tota (98,47%, 19.308 ha), seguido de Aquitania (97,32%, 85.211 ha), Cuítiva (91,72%, 4004 ha) y, finalmente, Sogamoso (71,87%, 15.011 ha). En el segundo periodo la persistencia disminuyó en cerca del 40% para los municipios de Tota (11.431 ha) y Cuítiva (1.746 ha), en un 17% para Sogamoso (11.290 ha) y Aquitania (71.357 ha).

Tabla 3. Categorías de cobertura del uso del suelo (ha) y porcentaje para 1992, 2000 y 2013 en la cuenca del lago de Tota (Boyacá)

Categoría	1992		2000		2013	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Área urbana	2.156,95	1,63	2.134,68	1,61	2.563,16	1,94
Cultivos transitorios	2.388,62	1,80	2.187,07	1,65	4.976,74	3,76
Pastos	33.413,37	25,23	33.547,26	25,33	40.427,86	30,53
Pastos y cultivos	17.558,78	13,26	18.695,00	14,12	10.930,81	8,25
Bosques	15.705,32	11,86	15.006,83	11,33	15.832,71	11,96
Plantaciones	1.098,34	0,83	1.186,21	0,90	2.552,44	1,93
Arbustos	11.530,19	8,71	10.712,56	8,09	8.649,04	6,53
Lago	5.780,37	4,37	5.780,37	4,37	5.850,66	4,42
Herbazales	42.793,10	32,31	43.175,06	32,60	40.645,74	30,69
Total	132.425,04	100	132.425,04	100	132429,16	100

Datos: interpretación de imágenes Landsat TM 1992, Landsat 7 ETM 2000 y Landsat 8 2013.

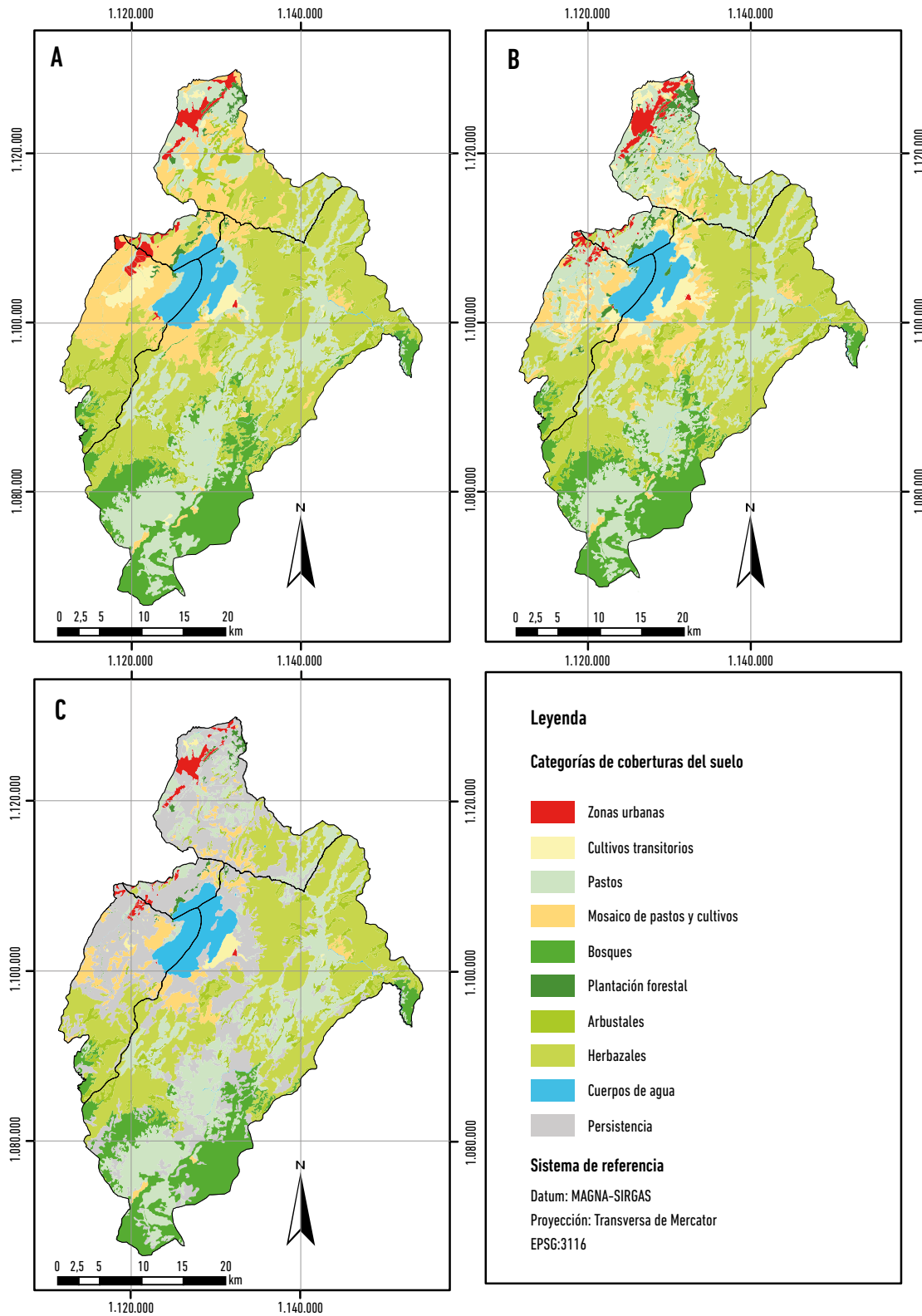


Figura 2. Mapas de cobertura del suelo de 1992 (a), 2013 (b) y mapa de persistencia 1992-2013 (c).
 Datos: interpretación de imágenes Landsat TM 1992, Landsat 7 ETM 2000 y Landsat 8 2013, escala 1:100.000.
 Nota: en color gris se observan los sectores con mayor dinámica de cambios de cobertura del suelo durante el periodo de estudio 1993-2013 (Figura 2c).

Tabla 4. Matriz de transición del área de estudio como porcentaje (%) en las diferentes categorías de uso del suelo entre 1992-2000 y 2000-2013

Categorías	Persistencias	Ganancias	Pérdidas	Cambio Total	Valor absoluto de cambio neto	Swap	Tasa de cambio anual							
							1992-2000	2000-2013						
Área urbana	1,51	1,08	0,10	0,86	0,12	0,53	0,22	1,39	0,02	0,32	0,20	1,07	-0,13	2,29
Cultivos transitorios	1,64	0,71	0,01	3,04	0,16	0,94	0,17	3,98	0,15	2,11	0,02	1,88	-1,10	10,28
Pastos	23,79	18,80	1,54	11,73	1,44	6,54	2,98	18,27	0,10	5,19	2,88	13,07	0,05	2,33
Pastos y cultivos	12,94	4,57	1,17	3,68	0,32	9,54	1,49	13,22	0,86	5,86	0,63	7,36	0,78	-6,71
Bosques	11,30	9,93	0,04	2,03	0,56	1,41	0,60	3,43	0,53	0,62	0,07	2,81	-0,57	0,67
Plantación forestal	0,75	0,58	0,14	1,35	0,08	0,31	0,22	1,66	0,07	1,03	0,15	0,63	0,96	9,58
Arbustos	7,76	4,20	0,33	2,34	0,95	3,89	1,28	6,23	0,62	1,56	0,66	4,67	-0,92	-2,67
Lago	4,37	4,30	0	0,12	0	0,07	0	0,19	0,29	0,05	-0,29	0,14	0	0,15
Herbazales	32,25	28,20	0,35	2,49	0,06	4,41	0,42	6,90	0,56	1,91	-0,14	4,99	0,11	-0,75
Total	96,31	72,36	3,69	27,64	3,68	27,64	7,38	55,27	3,19	18,66	4,19	36,61		

Datos: derivados de mapas de cobertura del suelo a escala 1:100.000, basados en interpretación de imágenes Landsat TM 1992, Landsat 7 ETM 2000 y Landsat 8 2013; y resultados de Land Change Modeler (LCM).

Nota: los valores sin negrita son del periodo 1992-2000, y los valores con negrita son del periodo 2000-2013.

Tabla 5. Matriz de cambio periodo 1992-2000 y 2000-2013

Áreas urbanas	Cultivos transitorios	Pastos	Pastos y Cultivos	Bosques	Plantaciones	Arbustos	Lago	Herbazales	Total 1992-2000	Total 2000-2013	Pérdidas 1992-2000	Pérdidas 2000-2013										
													1992-2000	2000-2013	1992-2000	2000-2013						
Área urbana	1,51	1,08	0	0,06	0	0,32	0,11	0,04	0	0	0	0,07	1,63	1,61	0,12	0,53						
Cultivos transitorios	0	0,02	1,64	0,71	0,1	0,6	0,04	0,3	0	0,02	0	0,01	0	0	0,01	1,8	1,65	0,16	0,94			
Pastos y cultivos	0,1	0,31	0,01	0,94	23,79	18,8	0,91	1,84	0,04	1,32	0,11	0,5	0,27	0,76	0	0,1	0	0,77	25,23	25,33	1,44	6,54
Bosques	0	0	0	0,01	0,51	0,42	0	0,13	11,3	9,93	0	0	0,59	0	0	0,06	0,26	11,86	11,33	0,56	1,41	
Plantaciones	0	0,04	0	0,02	0	0,17	0,02	0,05	0	0	0,75	0,58	0,04	0,03	0	0,02	0	0,83	0,9	0,08	0,31	
Arbustos	0	0,04	0	0,07	0,6	1,33	0,09	0,57	0	0,58	0,01	0,32	7,76	4,2	0	0,25	0,98	8,71	8,09	0,95	3,89	
Lago	0	0	0	0,02	0	0,03	0	0,01	0	0	0,01	0	0	4,37	4,3	0	0	4,37	4,37	0	0,07	
Herbazales	0	0,05	0	0,19	0,05	2,47	0	0,76	0	0,04	0	0,22	0,01	0,67	0	0	32,25	32,31	32,6	0,06	4,41	
Total	1,61	1,94	1,65	3,76	25,33	30,53	14,12	8,25	11,33	11,96	0,9	1,93	8,09	6,53	4,37	4,42	32,6	30,69	100	100		
Ganancias	0,1	0,86	0,01	3,04	1,54	11,73	1,17	3,68	0,04	2,03	0,14	1,35	0,33	2,34	0	0,12	0,35	2,49	0			

Datos: derivados de mapas de cobertura del suelo a escala 1:100.000, basados en interpretación de imágenes Landsat TM 1992, Landsat 7 ETM 2000 y Landsat 8 2013; y resultados de Land Change Modeler (LCM).

Nota: los valores sin negrita son del periodo 1992-2000, y los valores con negrita son del periodo 2000-2013. Los valores de la fila Total indican las categorías con mayores ganancias, en el total por columnas se señalan los valores más altos en pérdidas.

Patrón de paisaje

La Tabla 6, presenta los índices del paisaje en los años de estudio, donde la tendencia de las métricas es similar, con un pequeño incremento de NP, SHAPE y CONTAG, así como un incremento de LPI asociado a la dominancia de la categoría de herbazales. Para el 2013 hubo un incremento en el NP, disminución del LPI y del índice de forma, atribuible a los pastizales y valores más bajos de CONTAG. El SHEI permaneció estable con valores cercanos a 0,8.

A nivel de municipio se observó una tendencia similar que a nivel regional. Entre 1992 y 2013, el NP aumentó en Tota (82 a 111) y Sogamoso (123 a 162), mientras que para Aquitania y Cúitiva fue similar (Figura 3a). Para el 2013, el índice del parche más largo se presentó en Cúitiva (47,51%) y estuvo asociado a la categoría de pastos y mosaico de pastos y cultivos, mientras que el menor valor correspondió a Aquitania (14,84%), asociado a herbazales (Figura 3b). El índice de contagio y de forma muestran que los municipios presentaron condiciones similares con una tendencia a la disminución para el 2013; el índice de uniformidad indicó que los cuatro municipios son semejantes con un rango de 0,77 a 0,86; es decir, presentan abundancias de clases de coberturas en proporciones similares (Figuras 3c y 3d).

Tabla 6. Análisis de los índices de paisaje para el área de estudio

Año	NP	LPI	SHAPEMN	CONTAG	SHEI
1992	413	10,57	2,92	57,81	0,80
2000	423	13,04	2,97	57,99	0,79
2013	540	9,79	1,40	38,51	0,80

Datos: derivados de mapas de cobertura del suelo a escala 1:100.000 y procesados mediante el programa Fragstats.

Nota: número de parches (NP), tamaño del parche más largo (LPI), índice de forma promedio (SHAPE MN), índice de contagio (CONTAG), índice de uniformidad de Shannon (SHEI).

Factores de cambio

El análisis de componentes principales arrojó que para el primer periodo de estudio, el IUC y el tamaño de predios mayores a 10 ha fueron los factores de cambio que más aportaron en sentido positivo a la dinámica de la cobertura; y, con el tamaño de predios menores a 5 ha que aportaron en sentido negativo, explicaron un 74% de la varianza. Los aspectos demográficos relacionados con la población total fueron un factor importante en la segunda componente, explicando el 20,6% de la varianza (Figura 4a). Para el segundo periodo,

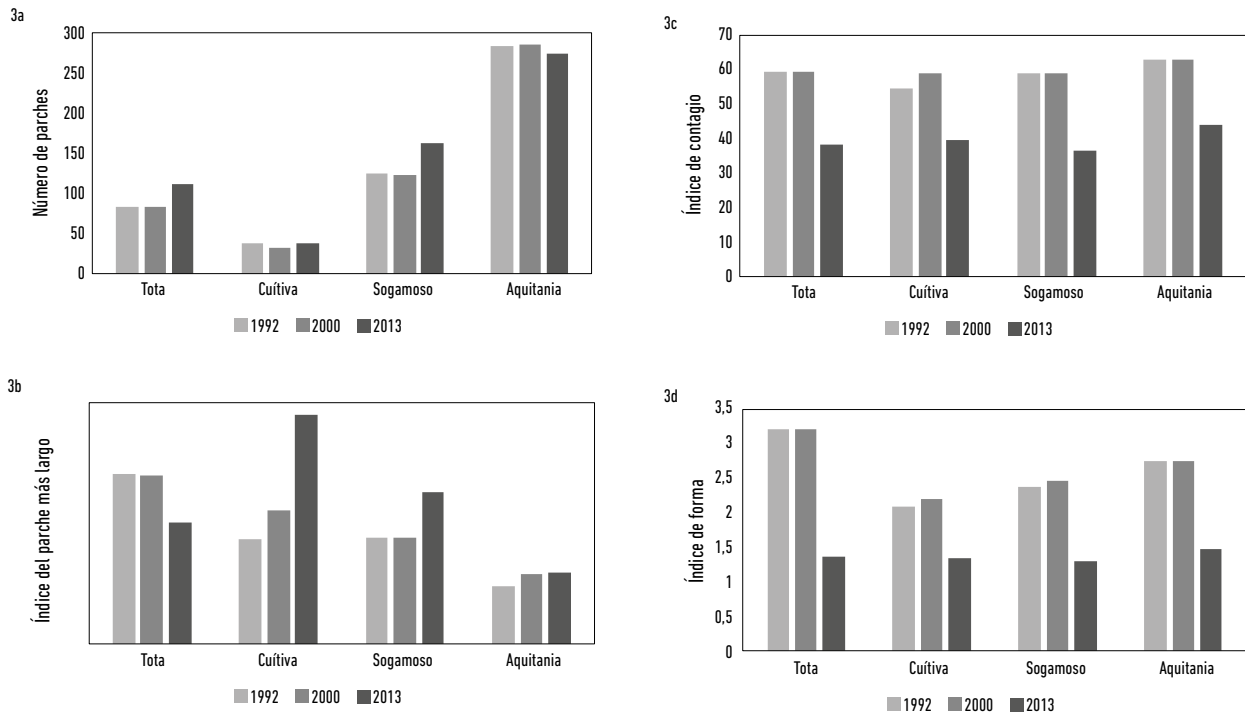


Figura 3. Índices de paisaje a nivel de los municipios del área de estudio para 1992, 2000 y 2013.

Datos: derivados de mapas de cobertura del suelo a escala 1:100.000 y procesados mediante el programa Fragstats.

los dos primeros componentes explicaron el 92,2% de la varianza; el tamaño de predios y el porcentaje de área natural fueron las variables que más aportaron al primer componente (68,7%); mientras que la segunda componente se asoció al índice de necesidades básicas insatisfechas (NBI) y población total (Figura 4b).

Se evidenció que los municipios se relacionaron con diferentes factores de cambio: Aquitania se asoció al porcentaje de áreas naturales por encima del 50% de pendientes; Tota no presentó alta relación con las áreas naturales, pero sí, con las necesidades básicas insatisfechas; Sogamoso se relacionó con la población total y Aquitania con el IIUC (Figura 4). Se observó también que el IIUC presentó incremento en los periodos analizados para los municipios de Aquitania (0,32 a 0,57) y Cuitiva (0,2 a 0,5), con una leve disminución en Tota (0,28 a 0,25) y una reducción de 0,7 a 0,5 en Sogamoso.

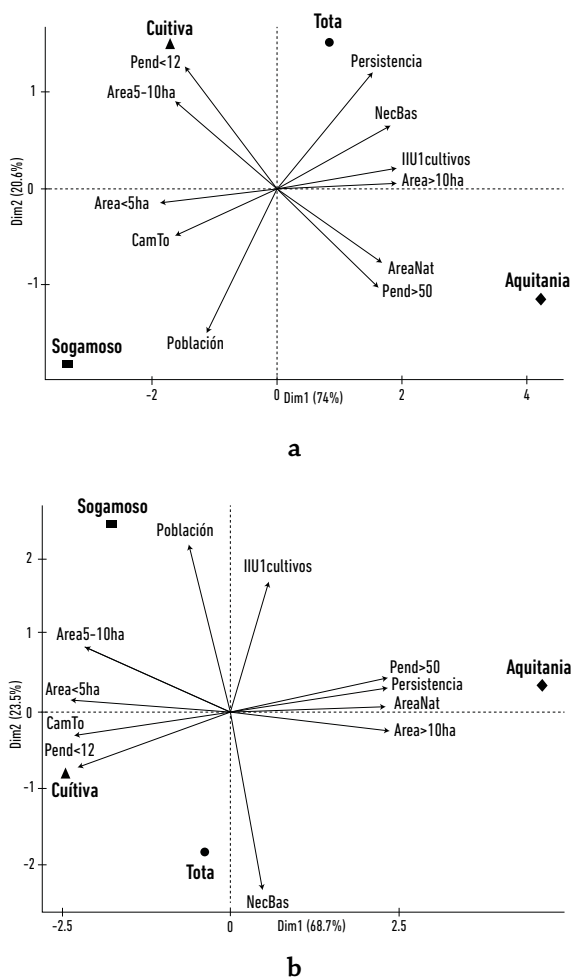


Figura 4. Análisis de componentes principales a nivel municipal para el periodo 1993-2000 (a) y 2000-2013 (b).

Discusión

El cambio de la cobertura del suelo en términos generales no presentó una dinámica alta en la región, debido a que la persistencia del paisaje asociada con las coberturas naturales y las coberturas de pastos y mosaico de pastos y cultivos fue mayor que las transiciones entre diferentes categorías de cobertura; esto puede explicar el hecho de no haberse encontrado a nivel regional diferencias significativas en la dinámica de cambio. Estos resultados coinciden con lo encontrado por Mateus (2014) para el periodo 1995-2010 para la misma región, y difieren de lo reportado por Rodríguez, Armenteras y Alumbrosos (2013) para los Andes colombianos, quienes asociaron la dinámica de cobertura a cambios entre categorías de bosques a pastizales por procesos de deforestación. Igualmente, las transiciones sistemáticas asociadas a las coberturas de pastos y mosaico de pastos y cultivos es un patrón consistente con lo hallado por Sánchez-Cuervo et al. (2012), quienes atribuyeron a prácticas tradicionales de rotación de cultivos de corta duración, pastos y áreas de descanso, la dinámica del uso del suelo en los departamentos de Santander y Boyacá.

La estructura del paisaje fue muy similar a lo largo del estudio debido a la alta persistencia de las coberturas. Los cambios de incremento de parches, aislamientos y contagio se asociaron a coberturas antrópicas y a la presencia de dos patrones de configuración espacial en la región, relacionados a factores biofísicos, económicos y de tenencia de la tierra: i) paisaje de minifundio, con cultivos económicamente rentables (cebolla y papa); y ii) paisaje natural, que por restricciones biofísicas y de protección no son aptas para la expansión de la frontera agrícola. En este último no se evidenciaron, a la escala del estudio, procesos de pérdida de hábitat y fragmentación significativos, pero sí el inicio de procesos de perforación de la matriz que, a futuro, pueden repercutir en la persistencia de especies asociadas tanto al lago de Tota como a los herbazales (Páramos).

Se encontró que, pese a la persistencia, el cambio en la dinámica de las coberturas del suelo varió en el espacio, especialmente en cercanías al lago de Tota, como producto de las transiciones sistemáticas halladas; probablemente estos cambios se asocian a condiciones sociales y económicas a lo largo del tiempo (Lambin y Meyfroidt 2010). Lo anterior puede explicar las diferencias de la dinámica de cambio a nivel municipal, principalmente en el segundo periodo, donde la relación entre el alto índice de intensidad de uso de los cultivos en áreas cercanas al

lago de Tota y la evidencia de cambios en la configuración espacial del paisaje (Figura 2d) puede ser explicada por factores biofísicos (disponibilidad de suelos, agua y condiciones de relieve); dichas diferencias pueden influir en el desarrollo de cultivos con una mayor producción, inversión en insumos y generación de posibles impactos en el recurso hídrico y de suelos, tal como lo plantean Kühling, Broll y Trautz (2016). En este sentido, es necesario simular el efecto de estas transiciones a futuro sobre la biodiversidad y servicios ecosistémicos asociados al humedal.

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la región se evidenciaron varias fases de transición de cobertura del suelo según los modelos propuestos por Foley et ál. (2005) y Lambin y Meyfroidt (2010): la primera asociada a tamaños de predios menores a 10 ha, con pendientes superiores al 50%, una mayor área de ecosistemas naturales (páramos) e IIUC altos, la cual se presentó en el municipio de Aquitania. Una segunda fase que se asoció a los municipios de Tota y Cuítiva, caracterizada por pendientes menores al 12%, tamaños prediales entre 5 y 10 ha, altos valores de necesidades básicas insatisfechas e IIUC medios. Así como una última fase que presentó una mayor densidad poblacional, áreas con predios menores a 5 ha y bajos IIUC en el municipio de Sogamoso.

Estas fases pueden ser explicadas en términos de legados históricos de uso del suelo en la región (Pérez-Preciado 1976; Reina-Aranza y Rubio-Ramírez 2016) y, específicamente, con el contexto socioeconómico y cultural del departamento de Boyacá, el cual ha sido típicamente una región minifundista con un alto porcentaje de propietarios (IGAC 2012). Esta particularidad se ve reflejada en los patrones de uso del suelo, basada en sistemas de rotación que coinciden con las transiciones sistemáticas encontradas; así, el acceso al mercado se da a través de cultivos económicamente rentables, la tenencia de la tierra y condiciones de acceso al recurso de agua que impulsan las decisiones de los habitantes hacia el establecimiento de una intensificación de uso del suelo (categorías de cultivos transitorios, mosaico de pastos y cultivos), tal como lo plantean Erb 2012 y van der Sluis et ál. 2016. Por otra parte, en zonas con menor productividad (bosques, herbazales y arbustales), se establecen políticas de conservación (Grau y Aide 2008).

Los municipios de Cuítiva y Tota, no presentaron un desarrollo urbano durante los años de estudio; la base de su economía es la agricultura de subsistencia

y tiende posiblemente a la intensificación del uso del suelo por pequeños agricultores en áreas cercanas al lago de Tota. El municipio de Aquitania presentó una agricultura de tipo intensivo alrededor del cuerpo de agua, basada en cultivos de alto valor comercial y mayores rendimientos de la producción; en zonas marginales, se da presencia de ecosistemas naturales. El municipio de Sogamoso representó y representa un polo de desarrollo de la región, con procesos importantes de industrialización y crecimiento poblacional; dadas estas características, se encuentra en una transición de uso de vía de desarrollo económico, como lo plantean Foley et ál. (2005), Grau y Aide (2008), y Lambin y Meyfroidt (2010).

Finalmente, las diferencias a nivel municipal de las dinámicas de cobertura fueron producto de una combinación de factores de tipo biofísico, sociocultural, económico, tecnológico e institucional, que definieron las transiciones de uso. Para el caso del área de estudio se asociaron a transiciones que se pueden enmarcar en el paso de una sociedad rural (Cuítiva y Tota) a una sociedad urbana (Sogamoso), como lo evidenciaron los estudios de Erb (2012) y Kühling, Broll y Trautz (2016).

Conclusiones

Si bien el área de influencia del lago de Tota representa, en gran medida, el promedio de los procesos de transformación de la región andina del país, el estudio permitió mejorar la comprensión sobre la dinámica espacio-temporal de paisajes agrícolas. Así, se demostró una estabilización en su dinámica y un acercamiento a los modelos de transiciones de uso del suelo propuestos por Foley et ál. (2005) y Lambin y Meyfroidt (2010) a nivel municipal. Esto es posible a partir del análisis de componentes principales, donde las variables relacionadas con población total, intensidad de cultivos, tamaño de los predios y porcentaje de áreas naturales son las más importantes para discriminar estos modelos.

Las transiciones sistemáticas centradas en categorías de coberturas antrópicas, si bien responden a patrones identificados en los Andes colombianos, dejan entrever la existencia de variabilidad intrarregional. Para nuestra zona de estudio, se asocian con procesos de rotación e intensificación agropecuaria, a diferencia de otras zonas donde los factores responsables de estas transiciones obedecen a procesos de abandono por conflictos sociales o deforestación por ampliación de la frontera agrícola. Dados los procesos de intensificación,

es importante evaluar el impacto que estos tienen sobre el cuerpo de agua de Tota, en especial con la cantidad y calidad del recurso.

Si bien se encontró una persistencia de las coberturas naturales, donde aún no existe un proceso de fragmentación *per se*, sí se evidencian procesos de perforación que pueden conducir a una degradación en la función que cumplen dichas coberturas para el mantenimiento del lago. De ahí que sea importante evaluar el paisaje y sus elementos con énfasis en la prestación (oferta y demanda) de los servicios ecosistémicos, principalmente los relacionados con regulación hídrica y el ciclo de nutrientes en el suelo; muchas de estas medidas están insertas en el CONPES 3801 del 2014 y la autoridad ambiental Corpoboyacá deberá liderar acciones de gestión y manejo integral del lago de Tota.

Futuros estudios sobre dinámicas de uso en paisajes altamente transformados como el nuestro, deberán enfocarse en los contextos socioecológicos y socioeconómicos desde un punto de vista funcional, que permitan identificar las fuerzas que direccionan los cambios, evaluar la intensidad de uso y conocer los efectos cascada de las actividades antrópicas sobre los ecosistemas, con el fin de implementar medidas nacionales, regionales y de gobernanza para una gestión adecuada de recursos tan importantes como el agua.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Maestría en Manejo, Conservación y Uso del Bosque de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y a la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo para la realización del presente estudio. Al Instituto Geográfico Agustín Codazzi, al Departamento Administrativo Nacional de Estadística y a Corpoboyacá por la información suministrada. A las comunidades locales por su disposición, tiempo y experiencias compartidas en el desarrollo del trabajo.

Referencias

- Abdi, Hervé, y Lynne J. Williams. 2010. "Principal Component Analysis." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 2 (4): 433-459. doi: 10.1002/wics.101.
- Armenteras, Dolores, y Nelly Rodríguez Eraso. 2014. "Dinámicas y causas de deforestación en bosques de Latino América: una revisión desde 1990." *Colombia Forestal* 17 (2): 233-246. doi: 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a07.
- Cardoso, Pedro, François Rigal, Simone Fattorini, Sofia Terzopoulou, y Paulo A. Borges. 2013. "Integrating Landscape Disturbance and Indicator Species in Conservation Studies." *PLoS ONE* 8 (5). doi: 10.1371/journal.pone.0063294.
- Carreiras, João M. B., Joshua Jones, Richard M. Lucas, y Cristina Gabriel. 2014. "Land Use and Land Cover Change Dynamics across the Brazilian Amazon: Insights from Extensive Time-Series Analysis of Remote Sensing Data." *PLoS ONE* 9 (8). doi: 10.1371/journal.pone.0104144.
- Dale, Virginia H., Linda A. Joyce, Steve McNulty, y Ronald P. Neilson. 2000. "The Interplay between Climate Change, Forest, and Disturbances." *Science of the Total Environment* 262 (3): 201-204. doi: 10.1016/S0048-9697(00)00522-2.
- DANE (Departamento Nacional de Estadística). 2005. *Censo Nacional de Población 2005*. Consultado el 4 de febrero de 2017. <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-general-2005-1>
- DANE. 2012. "Necesidades básicas insatisfechas." *Censo Nacional de Población 2012*. Consultado el 17 de febrero de 2017. <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/necesidades-basicas-insatisfechas-nbi>
- DNP (Departamento Nacional de Planeación). 2014. *Documento CONPES 3801. Consejo Nacional de Política Económica y Social. Manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del lago de Tota*. Consultado el 14 de noviembre de 2017. http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/12.%20CONPES%203801%20MANEJO%20AMBIENTAL%20INTEGRAL%20DE%20LA%20CUENCA%20HIDROGRAFICA%20DEL%20LAGO%20DE%20TOTA.pdf
- Eastman, J. Ronald. 2012. *IDRISI Selva Tutorial. Manual version 17*. Clark Labs-Clark University. Consultado el 14 de noviembre de 2017. http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/eng/gis/idrisi_selva_tutorial.pdf
- Erb, Karl-Heinz. 2012. "How a Socio-Ecological Metabolism Approach Can Help to Advance our Understanding of Changes in Land-Use Intensity." *Ecological Economics* 76: 8-14. doi: 10.1016/j.ecolecon.2012.02.005.
- Etter, Andres, Clive McAlpine, Stuart Phinn, David Pullar, y Hugh Possingham. 2006. "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.
- Fan, Qindong, y Shegyan Ding. 2016. "Landscape Pattern Changes at a County Scale: A Case Study in Fengqiu, Henan Province, China from 1990 to 2013." *Catena* 137: 152-160. doi: 10.1016/j.catena.2015.09.012.

- Fischer, Joern, y David B. Lindenmayer. 2007. "Landscape Modification and Habitat Fragmentation: a Synthesis." *Global Ecology and Biogeography* 16 (3): 265-280. doi: 10.1111/j.1466-8238.2007.00287.x.
- Foley, Jonathan A., Ruth DeFries, Gregory P. Asner, Carol Barford, Gordon Bonan, Stephen R. Carpenter, F. Stuart Chapin, Michael T. Coe, Gretchen C. Daily, Holly K Gibbs, Joseph H. Helkowski, Tracey Holloway, Erica A. Howard, Christopher J. Kucharik, Chad Monfreda, Jonathan A. Patz, I. Colin Prentice, Navin Ramankutty, y Peter K. Snyder. 2005. "Global Consequences of Land Use." *Science* 309 (5734): 570-574. doi: 10.1126/science.1111772.
- Geist, Helmut J., y Eric F. Lambin. 2002. "Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation." *Bioscience* 52 (2): 143-150. doi: 10.1641/0006-3568(2002)052[0143:PCAUDE]2.0.CO;2.
- González, Carolina. 2016. "Impactos de la variabilidad climática y las actividades humanas en la dinámica hidrológica del Lago de Tota." Tesis de maestría, Universidad de Antioquia, Medellín.
- Grau, Ricardo H., y Mitchell Aide. 2008. "Globalization and Land-Use Transitions in Latin America." *Ecology and Society* 13 (2). doi: 10.5751/ES-02559-130216.
- Gutiérrez Argonese, Jorgelina, y Ricardo H. Grau. 2014. "Assessment of Swaps and Persistence in Land Cover Changes in a Subtropical Periurban Region, NW Argentina." *Landscape and Urban Planning* 127: 83-93. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.01.021.
- Husson, François, Julie Josse, Sébastien Le, y Jeremi Mazet. 2017. "Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining." *FactoMine R.-Package*. Consultado el 25 de marzo de 2018. <https://rdrr.io/cran/FactoMineR/man/FactoMineR-package.html>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia). 2010. *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000*. Bogotá: IDEAM.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2012. *Atlas de la distribución de la propiedad rural en Colombia*. Bogotá: Universidad de los Andes, IGAC, Universidad de Antioquia.
- Kassambara, Alboukadel, y Fabian Mundt. 2017. "Package 'Factoextra' versión 1.0.5." Consultado el 22 de julio de 2017. <https://cran.r-project.org/package=factoextra>.
- Keys, Eric, y William McConell. 2005. "Global Change and the Intensification of Agriculture in the Tropics." *Global Environmental Change* 15 (4): 320-337. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2005.04.004.
- Kühling, Insa, Gabriele Broll, y Dieter Trautz. 2016. "Spatio-Temporal Analysis of Agricultural Land-Use Intensity across the Western Siberian Grain Belt." *Science of the Total Environment* 544: 271-280. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.11.129.
- Lambin, Eric F., Helmut J. Geist, y Erica Lepers. 2003. "Dynamics of Land Use and Cover Change in Tropical Regions." *Annual Review of Environment and Resources* 28: 205-241. doi: 10.1146/annurev.energy.28.050302.105459.
- Lambin, Eric F., y Patrick Meyfroidt. 2010. "Land Use Transitions: Socio-Ecological Feedback Versus Socio-Economic Change." *Land Use Policy* 27 (2): 108-118. doi: 10.1016/j.landusepol.2009.09.003.
- Lira, Paula K., Leandro R. Tambosi, Robert M. Ewers, y Jean Paul Metzger. 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.
- Mateus, María Cristina. 2014. "Análisis de la cobertura vegetal, uso del suelo y su impacto en la desecación del Lago de Tota." Tesis de especialización, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá.
- McGarigal, Kevin, Samuel A. Cushman, Maile Neel, y Eduard Ene. 2002. "FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps." Consultado 8 de marzo de 2017. <https://www.umass.edu/landeco/research/frags-tats/fragstats.html>
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. "Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis." Washington D.C.: World Resources Institute. Consultado el 17 de marzo de 2016. <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/document.358.aspx.pdf>
- Merken, Ronny, Evelin Deboelpaep, Joachim Teunen, Santiago Saura, y Nico Koedam. 2015. "Wetland Suitability and Connectivity for Trans-Saharan Migratory Waterbirds." *PLoS ONE* 10 (8). doi: 10.1371/journal.pone.0135445.
- Ministerio de Agricultura. 2017. "Series Agronet." *Estadísticas Agropecuarias*. Consultado el 17 de febrero de 2017. <http://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/default.aspx>
- Pérez-Preciado, Alfonso. 1976. *Tota... más que un lago es un conflicto: una síntesis de los problemas físicos, económicos, sociales y políticos relativos a su aprovechamiento*. Colombia: Stella.
- Plieninger, Tobias, Franz Höchtl, y Theo Spek. 2006. "Traditional Land-Use and Nature Conservation in European Rural Landscapes." *Environmental Science & Policy* 9 (4): 317-321. doi: 10.1016/j.envsci.2006.03.001.
- Pontius, Robert. G., Emily Shusas, y Menzie McEachern. 2004. "Detecting Important Categorical Land Changes while Accounting for Persistence." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 101 (2-3): 251-268. doi: 10.1016/j.agee.2003.09.008.

- Power, Alison G. 2010. "Ecosystem Services and Agriculture: Tradeoffs and Synergies." *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 365 (1554): 2959-2971. doi: 10.1098/rstb.2010.0143.
- Primdahl, Jørgen, Anne Gravsholt Busck, y Lone Søderkvist Kristensen. 2004. "Landscape Management Decisions and Public-Policy Interventions." En *The New Dimensions of the European Landscape*, vol. 4 de la serie *Wageningen UR Frontis Series*, editado por Rob H. G. Jongman, 103-120. Holanda: Springer.
- Puyravaud, Jean-Philippe. 2003. "Standardizing the Calculation of the Annual Rate of Deforestation." *Forest Ecology and Management* 177 (1-3): 593-596. doi: 10.1016/S0378-1127(02)00335-3.7.
- Reina-Aranza, Yuri, y Karen Rubio-Ramírez. 2016. *Boyacá: un contraste entre competitividad, desempeño económico y pobreza*. n.º 245 de la serie *Documentos de trabajo sobre economía regional y urbana*. Cartagena: Banco de la República, Centro de Estudios Económicos regionales (CEER).
- Ricaurte, Luisa Fernanda, María Helena Olaya-Rodríguez, Juliana Cepeda-Valencia, Diana Lara, Johanna Arroyave-Suárez, C. Max Finlayson, e Ignacio Palomo. 2017. "Future Impacts of Drivers of Change on Wetland Ecosystem Services in Colombia." *Global Environmental Change* 44: 158-169. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2017.04.001.
- Robertson, G. Philip, Katherine L., Gross Stephen K., Hamilton, Douglas A., Landis, Thomas M. Schmidt, Sieglinde S. Snapp, y Scott M. Swinton. 2014. "Farming for Ecosystem Services: An Ecological Approach to Production Agriculture." *BioScience* 64 (5): 404-415. doi: 10.1093/biosci/biu037.
- Rodríguez Eraso, Nelly, Dolores Armenteras, y Javier Retana Alumbrosos. 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.
- Romero-Ruiz, Milton H., Suzette Geertuida Anna Flantua, Kevin Tansey, y Juan C. Berrio. 2012. "Landscape Transformations in Savannas of Northern South America: Land Use/Cover Changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia." *Applied Geography* 32 (2): 766-776. doi: 10.1016/j.apgeog.2011.08.010.
- Sánchez-Cuervo, Ana María, Mitchell Aide, Matthew L. Clark, y Andrés Etter. 2012. "Land Cover Change in Colombia: Surprising Forest Recovery Trends between 2001 and 2010." *PLOS ONE* 7 (8). doi: 10.1371/journal.pone.004394.
- Tapia-Armijos, María Fernanda, Jürgen Homeier, Carlos Iván Espinosa, Christoph Leuschner, y Marcelino de la Cruz. 2015. "Deforestation and Forest Fragmentation in South Ecuador since the 1970s – Losing a Hotspot of Biodiversity." *PLOS ONE* 10 (11). doi: 10.1371/journal.pone.0133701.
- Turner, Mónica G., Robert H. Gardner, y Robert V. O'Neil. 2001. *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. Nueva York: Springer-Verlag.
- van Asselen, Sanneke, Peter H. Verburg, Jan E. Vermaat, y Jan H. Janse. 2013. "Drivers of Wetland Conversion: A Global Meta-Analysis." *PLOS ONE* 8 (11). doi: 10.1371/journal.pone.0081292.
- van der Sluis, Theo, Bas Pedroli, Soren B. P. Kristensen, Georgia Lavinia Cosor, y Evangelos Pavlis. 2016. "Changing Land Use Intensity in Europe? Recent Processes in Selected Case Studies." *Land Use Policy* 57: 777-785. doi: 10.1016/j.landusepol.2014.12.005.
- van Vliet, Jasper, Henry L. F. De Groot, Piet Rietveld, y Peter H. Verburg. 2015. "Manifestations and Underlying Drivers of Agricultural Land Use Change in Europe." *Landscape and Urban Planning* 133: 24-36. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.09.001.
- Wan, Luhe, Yuwei Zhang, Xinyi Zhang, Shaoqun Qi, y Xiaodong Na. 2015. "Comparison of Land Use/Land Cover Change and Landscape Patterns in Honghe National Nature Reserve and the Surrounding Jiansanjiang Region, China." *Ecological Indicators* 51: 205-214. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.11.025.
- Wang, Haoluan, Feng Qiu, y Xiaofeng Ruan. 2016. "Loss or Gain: A Spatial Regression Analysis of Switching Land Conversions between Agriculture and Natural Land." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 221: 222-234. doi: 10.1016/j.agee.2016.01.041.
- Wassenaar, Tom, Pierre Gerber, Peter H. Verburg, Mauricio Rosales, Muhammad Ibrahim, y Henning Steinfeld. 2007. "Projecting Land Use Changes in the Neotropics: The Geography of Pasture Expansion." *Global Environmental Change* 17 (1): 86-104. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.03.007.
- Zorrilla-Miras, Pedro, Ignacio Palomo, Erick Gómez-Baggethun, Berta Martín-López, Pedro L. Lomas, y Carlos Montes. 2014. "Effects of Land-Use Change on Wetland Ecosystem Services: A Case Study in the Doñana Marshes (SW Spain)." *Landscape and Urban Planning* 122: 160-174. doi: 10.1016/j.landurbplan.2013.09.013.

Andrea Milena Wanumen-Mesa

Ingeniera forestal, especialista en Sistemas de Información Geográfica y magíster en Manejo, Uso y Conservación del Bosque de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia). Se desempeña como docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en ordenamiento territorial y como analista SIG en diferentes entidades tanto públicas como privadas. Su área de interés es la planeación del territorio rural con respecto a aspectos biofísicos, socioculturales y económicos.

Rene López-Camacho

Ingeniero forestal de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia) y Biólogo de la Universidad Nacional de Colombia. Especialista en SIG con estudios en estadística y candidato a doctor en Ciencias Línea Ecología de la Universidad Nacional de Colombia. Docente de la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Sus áreas de interés son la ecología de bosques tropicales enfocada en composición, estructura y diversidad funcional y los productos forestales no maderables. Editor de la *Revista Colombia Forestal*.

Nelly Rodríguez-Eraso

Ingeniera forestal de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia) y Ph.D. en Ecología Terrestre de la Universidad Autónoma de Barcelona (España). Docente del Departamento de Biología, área de ecología. Sus líneas de investigación son ecología del paisaje, modelamiento de cambios de cobertura y uso del suelo, mapeo de servicios ecosistémicos y SIG.