

Evaluación de presiones sobre el suelo mediante la metodología *Land Accounts* en el departamento de Caldas, Colombia

Assessment of Soil Resource Pressures using the Land Accounts Methodology in the Department of Caldas, Colombia

Diana Rey-Valencia^{a, c}, Diego Patiño-Rincón^a, Jeannette Zambrano-Nájera^b

RESUMEN

El cambio en el uso de la tierra de manera no planificada está causando problemas de erosión, pérdida de productividad y conflictos por el uso de los suelos. Por lo tanto, la pérdida de productividad debido a la degradación del suelo se ha convertido en un problema global importante. En Caldas, el problema es grave debido a la alta susceptibilidad que presenta el suelo a usos indebidos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es determinar los cambios que se han producido en las coberturas en el período 2000-2014. Para esto, se propone utilizar la metodología de Cuentas de Tierras desarrollada por la Agencia Europea del Medio Ambiente. Esta metodología permite evaluar las presiones ejercidas sobre el suelo, define los cambios a lo largo del tiempo, mide la velocidad de esos cambios y, de esa manera, predice qué cambios han causado o podrían causar la degradación del suelo y la pérdida de productividad. En Caldas, la formación neta fue de -4,74 y -5,52 km² en los periodos 2000-2010 y 2010-2014 respectivamente. Según la metodología, las subclases con mayor consumo fueron pastos, bosques y áreas agrícolas heterogéneas en 2000-2010, mientras que en 2010-2014 el consumo de bosques disminuyó considerablemente y los pastos y áreas agrícolas heterogéneas se mantuvieron igual. En conclusión, se ejercen altas presiones sobre los suelos debido a la modificación de las áreas agrícolas y la deforestación.

PALABRAS CLAVE: planificación del uso del suelo; indicadores ambientales; degradación del suelo; contabilidad de tierras; monitoreo ambiental.

ABSTRACT

Unplanned land use changes cause problems including erosion, productivity loss, and use conflicts. Productivity loss due to soil degradation has become a major global problem. In Caldas, this is a serious problem, due to the soil's high level of vulnerability for unplanned use. The objective of this study, then, is to determine those use changes that occurred during the 2000-2014 period. For this purpose, use of the Land Accounts methodology, developed by the European Environmental Agency, is proposed. Said methodology allows for evaluation of the pressures placed on soil resources, defines changes over time, measures the speed of those changes, and predicts what changes have caused or could potentially cause soil degradation and productivity loss. In Caldas, the net formation totaled 4.74 and 5.52 km² in the 2000-2010 and 2010-2014 ranges, respectively. In accordance with the methodology, those subclasses with the highest rates of consumption were pastures, forests, and heterogeneous agricultural areas, from 2000-2010, while from 2010-2014, the consumption of forests fell considerably, and that of pastures and heterogeneous agricultural areas remained the same. In conclusion, significant pressure is exerted on soil, due to the expansion of agricultural areas.

KEY WORD: land use planning; environmental indicators; land degradation; land accounting; environmental monitoring.

a Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), Programa de Maestría Ingeniería-Recursos hidráulicos, Grupo de trabajo académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Manizales, Colombia. ORCID Rey-Valencia, D.: 0000-0002-9102-9161; ORCID Patiño-Rincón, D.: 0000-0002-3708-7141

b Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), Departamento de Ingeniería Civil, Grupo de trabajo académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental. Manizales, Colombia. ORCID Zambrano-Nájera, J.: 0000-0002-9674-7621

c Autor de correspondencia: dimreyva@unal.edu.co

Introducción

Los cambios en las coberturas del suelo han sido una preocupación desde hace varias décadas debido a que las investigaciones indican que los procesos de la superficie terrestre tienen gran influencia sobre el clima. En los años 70s se reconoció el papel de éstos en los impactos sobre el clima regional, y en los 80s se resaltó el impacto que causan los cambios en el terreno sobre el clima global (Sagan et al., 1979; Woodwell et al., 1983; Houghton et al., 1985). Luego estos impactos fueron extrapolados a otros bienes y servicios ecosistémicos como la degradación del suelo, el soporte a las necesidades humanas y la vulnerabilidad de los humanos y dichos ecosistemas a las perturbaciones que se causan sobre el clima, así como a los aspectos sociopolítico y económico. De esta manera, el suelo provee a la población mundial comida, agua y bienes; y la tendencia es a exigir aún más. El nivel actual de producción es de las más altas que se han tenido, lo que a su vez se ve reflejado en los mayores impactos causados sobre la tierra.

De lo anterior, se concluye la relevancia de las coberturas del suelo debido a que las perturbaciones que se causen a éstos causan a su vez grandes impactos en los sistemas económicos y ambientales. Una gran porción del territorio se usa para agricultura, lo que degrada los suelos si se realiza de manera inadecuada, ya que se requieren grandes cantidades de agua, a las cuales se les agrega niveles considerables de contaminantes y es considerada una de las principales fuentes de las emisiones de nitrógeno (Matsen et al., 1997; Galloway et al., 2003). La ganadería es otra actividad que requiere grandes extensiones de terreno (pastos) y se está incrementando, por la necesidad de alimentar a más personas lo que ocasiona emisiones de metano en grandes cantidades. De esta manera, la planificación en los cambios en las coberturas del suelo imponen un reto importante para la humanidad (Irwin y Geoghegan, 2001; Kok et al., 2001).

Dadas esas complejidades los gobiernos nacionales y regionales necesitan tener una alta comprensión de dichos cambios, así como la interrelación con las actividades humanas que se desarrollan en los suelos, también la distribución espacial de dichas actividades y la manera de evaluar los resultados de los sistemas. Así que las decisiones que se tomen sobre

el uso del territorio deben ser realizadas teniendo en cuenta los bienes y servicios que se exigen al suelo, y equilibrando esto con los impactos causados a los ecosistemas. En ese orden de ideas, es necesaria la implementación de indicadores que permitan monitorear el estado de las coberturas de los suelos, así como explicar cómo cambian estos en el tiempo y el espacio. La Agencia Ambiental Europea (EAA) ha desarrollado una metodología para contabilizar los cambios en las coberturas del suelo, y sus interconexiones (Haines-Young et al., 2006; Weber, 2007) la que se denomina Land Accounts.

Land Accounts

Las actividades humanas se pueden monitorear a través de los mapas UCS, donde la agricultura y la ganadería, entre otras son consideradas fuerzas motrices. Éstas pueden cambiar el uso y cobertura del suelo, y por tanto se constituyen como un indicador de presión para determinar la posible erosión del suelo. Por lo tanto, es crucial la comprensión de los cambios en la cobertura y uso del suelo dado que permite establecer políticas para la planificación del desarrollo sostenible, que controlen las fuerzas motrices por la transformación de la cobertura y el uso del suelo por la acción antrópica que puede afectar la integridad de los recursos naturales, producción de bienes y servicios ecosistémicos (Haines-Young et al., 2006).

La metodología de Land Accounts representa las transformaciones de las coberturas del suelo de manera temporal y espacial. Para la transformación se tienen en cuenta los flujos producidos entre las diferentes coberturas (Alfieri et al., 2011). De manera que describen las coberturas del suelo que cambian con el tiempo de manera constante y sistemática, con esto las implicaciones de estos cambios se pueden entender mejor. En general la tierra no puede ser creada o destruida, el cambio de las coberturas se puede representar como diferentes flujos entre los tipos de cobertura del suelo en el tiempo. En términos físicos para los cambios entre un año inicial y un año final de un área de tierra para una cobertura específica, para el año inicial se tiene un saldo inicial, ésta es modificada por los flujos con los otros tipos de coberturas del suelo para el año final; se pueden tener ganancias aumento de la extensión de la

cobertura que se define como formación, o pérdidas, es decir, flujo de esa cobertura a otra cobertura diferente que se define como consumo, como se muestra en la Figura 1 y 2 (Haines-Young et al., 2006; Alfieri et al., 2011).

Aunque esta metodología es sencilla permite indagar en las fuerzas motrices que producen los cambios, tanto para la ganancia o pérdida de una cobertura del suelo en específico, a través de lo cual se puede responder si estos cambios ofrecen funciones al ecosistema, lo que es fundamental para planificar la sostenibilidad (Haines-Young et al., 2006). Los flujos entre coberturas se relacionan con los problemas ambientales como: expansión urbana, intensificación de la agricultura, deforestación, entre otros (Alfieri et al., 2011). Por lo tanto, las coberturas representan las diferentes fases de desarrollo del paisaje y por ende son una fuente de información relevante sobre estos procesos (Feranec et al., 2010).

Sin embargo, existen modificaciones entre coberturas que permanecen dentro de las principales categorías y no implican un flujo; estos incluyen rotación de cultivos, rotación de pastizales, rotación de

bosques entre otros (Stott y Haines-Young, 1998). De manera que se define como un cambio de cobertura o un flujo cuando se presenta un cambio categórico de una clase de cobertura al ser reemplazada por otra (Coppin et al., 2004).

Para realizar esta metodología se pueden realizar la detección de cambios bitemporales, comparando la misma extensión de tierra entre dos puntos en el tiempo, o se puede hacer un análisis de tendencia multitemporal, comparando la extensión de tierra en más de dos puntos en el tiempo (Feranec et al., 2007). Así mismo, estos análisis se pueden realizar tan detallados como sea necesario agregando más categorías de coberturas, por ejemplo, para el caso de intensificación de la agricultura (terreno natural a agricultura) se puede subdividir según el tipo de cultivo (Alfieri et al., 2011).

Los flujos considerados de importancia para el análisis fueron definidos por Feranec et al. (2000) y categorizados como: 1) intensificación de la agricultura –cambio de los cultivos permanentes a áreas agrícolas heterogéneas; 2) modificación agrícola–cambio de terrenos agrícolas hacia pastos. Este tipo

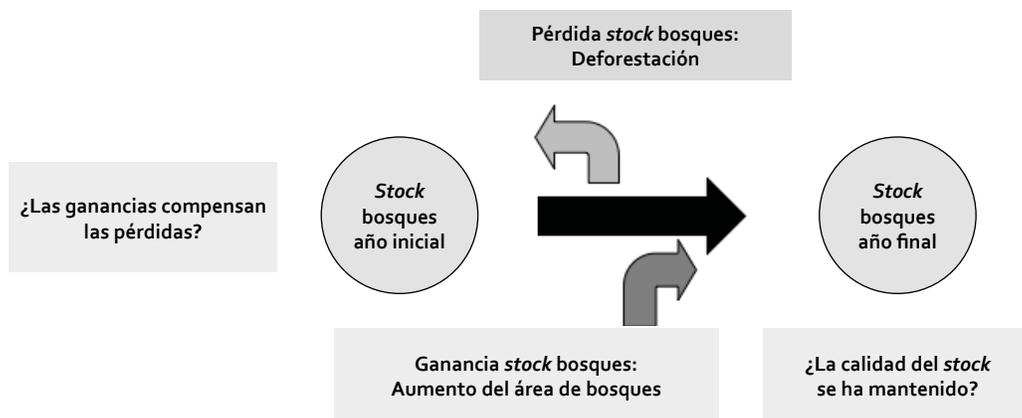


Figura 1. Esquema metodológico Land Accounts. Fuente: elaboración propia a partir de Haines-Young et al. (2006)

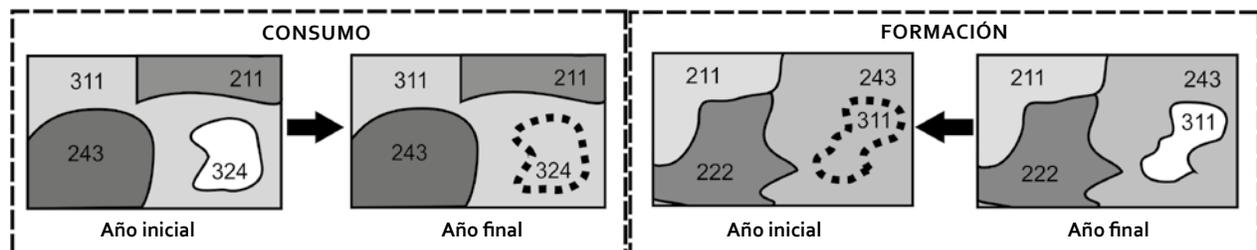


Figura 2. Definición de consumo y Formación. Fuente: elaboración propia a partir de Nunes de Lima (2005)

de flujo está relacionado con la ganadería intensiva; la que se define como una amenaza para el suelo porque generan encostramiento, incrementando la escorrentía superficial y la erosión; 3) urbanización – cambio de terrenos agrícolas o bosques hacia áreas urbanizadas; 4) forestación – formación de nuevos bosques por parte de los humanos a partir de otras coberturas (pastizales, pastos, etc.); y 4) deforestación – disminución o devastación de bosques inducidos por actividades antropogénicas y/o desastres naturales. Al eliminar los bosques se disminuye también la capacidad de infiltración de agua en los suelos y se incrementa la escorrentía superficial, lo que a su vez incrementa la erosión por causas hídricas.

Leyenda Corine Land Cover

Para aplicar la metodología lands accounts mencionada anteriormente y poder comparar los mapas de uso y coberturas del suelo (MUCS), se utilizó la leyenda Corine Land Cover ya que es la metodología oficial de Colombia. Esta fue implementada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, que establece: “la base de datos Corine Land Cover para Colombia, permite describir, caracterizar y comparar las características de cobertura del suelo, interpretadas a partir de imágenes satelitales de media resolución (Landsat), las que fueron usadas para construir mapas a escala 1:100,000” (IDEAM, 2014). En Colombia, dicha metodología fue adoptada hasta el tercer nivel de clasificación, con un total de cinco tipos de coberturas por clase, 15 tipos de subclases, y 57 tipos de uso y coberturas (IDEAM, 2010).

Este artículo utiliza la leyenda reagrupándola en seis grupos fundamentales según los ítems definidos en la metodología Land Accounts, estos son áreas artificiales, cultivos permanentes, pastos, áreas agrícolas heterogéneas, bosques, áreas con vegetación herbácea, espacios abiertos y agua. Estas agrupaciones permiten analizar las tendencias en las variaciones espacio-temporales de las coberturas del suelo para el departamento de Caldas en el periodo 2000-2014. El artículo analiza los factores y mecanismos dominantes en el cambio de las coberturas de los suelos, provee sugerencias para los tomadores de decisiones de manera que se realice un uso

óptimo de la tierra y de esta manera se pueda lograr un balance entre los ingresos per cápita y los impactos ambientales.

Política para la gestión sostenible del suelo

Para Colombia el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible propuso la “Política para la gestión sostenible del suelo”. Ésta busca fomentar el manejo sostenible del suelo en Colombia en la forma que converja la preservación de la biodiversidad, los recursos hídricos y el aire, así como el ordenamiento del territorio y la gestión del riesgo; con el fin de cooperar al desarrollo sostenible del país (MADS, 2016).

La política propone un plan de monitoreo utilizando el modelo FPEIR de (Blum, 2004). La metodología evalúa las fuerzas motrices, que son las fuerzas indirectas socioeconómicas y socioculturales fundamentadas en la sociedad, que conducen las actividades humanas (necesidad de alimentos). Las presiones son aquellas fuerzas que ponen en riesgo el recurso suelo (el excesivo uso del suelo para cultivos). El estado describe la condición en que se encuentra el suelo en un momento dado. Los impactos son los efectos que tienen la degradación y pérdida del suelo, están íntimamente relacionados con las actividades humanas. Por último, las respuestas son las acciones que emprende la sociedad frente a la situación del recurso suelo (Blum, 2004).

La política propone las respuestas con varios lineamientos, siendo uno el “fortalecimiento de instrumentos de planificación ambiental y sectorial”. Este lineamiento propone la elaboración de metodologías y protocolos para la evaluación de uso y cobertura del suelo, así como la planificación ambiental en la que se deben incluir herramientas e instrumentos que fomenten el uso adecuado y la conservación de las funciones del suelo, y de los servicios ecosistémicos asociados con este (MADS, 2016).

Para seguir dicho lineamiento para la gestión sostenible del suelo se propone la metodología de Land Accounts para evaluar las coberturas del suelo, ya que dichos resultados sirven como un instrumento de planificación ambiental para controlar los cambios que podrían conducir a la degradación del suelo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El departamento de Caldas está localizado entre los 5°46'51" y 04°48'20" N y entre los 74°38'01" y 75°55'45" O en la región central de Colombia, y tiene un área de 7,436 km², lo que corresponde al 0,7 % del territorio nacional. El departamento presenta un gradiente altitudinal muy fuerte variando desde los 123 hasta los 5,289 msnm, razón por la cual se presentan gran variedad de pisos térmicos y consecuentemente los suelos presentan características muy diversas (Figura 3). El paisaje del departamento se caracteriza por tener montañas, picos nevados y valles (CORPOCALDAS y IGAC, 2012) los que

determinan las coberturas del suelo y también sus usos porque se tienen factores como altas pendientes, gran cantidad de corrientes, y clima muy variado, lo que restringe los usos y los tipos de coberturas que se pueden tener sobre el suelo. En Caldas, los principales usos y coberturas son agricultura y ganadería combinados (28 %) áreas de reserva forestal (27 %), bosques (23 %), agricultura (20 %) y sólo ganadería (2 %) (CORPOCALDAS y IGAC, 2012).

Datos de coberturas del suelo

Para el departamento de Caldas se construyeron dos mapas de usos y cobertura mediante la metodología CORINE Land Cover, que es la leyenda oficial usada en Colombia desde el año 2004.

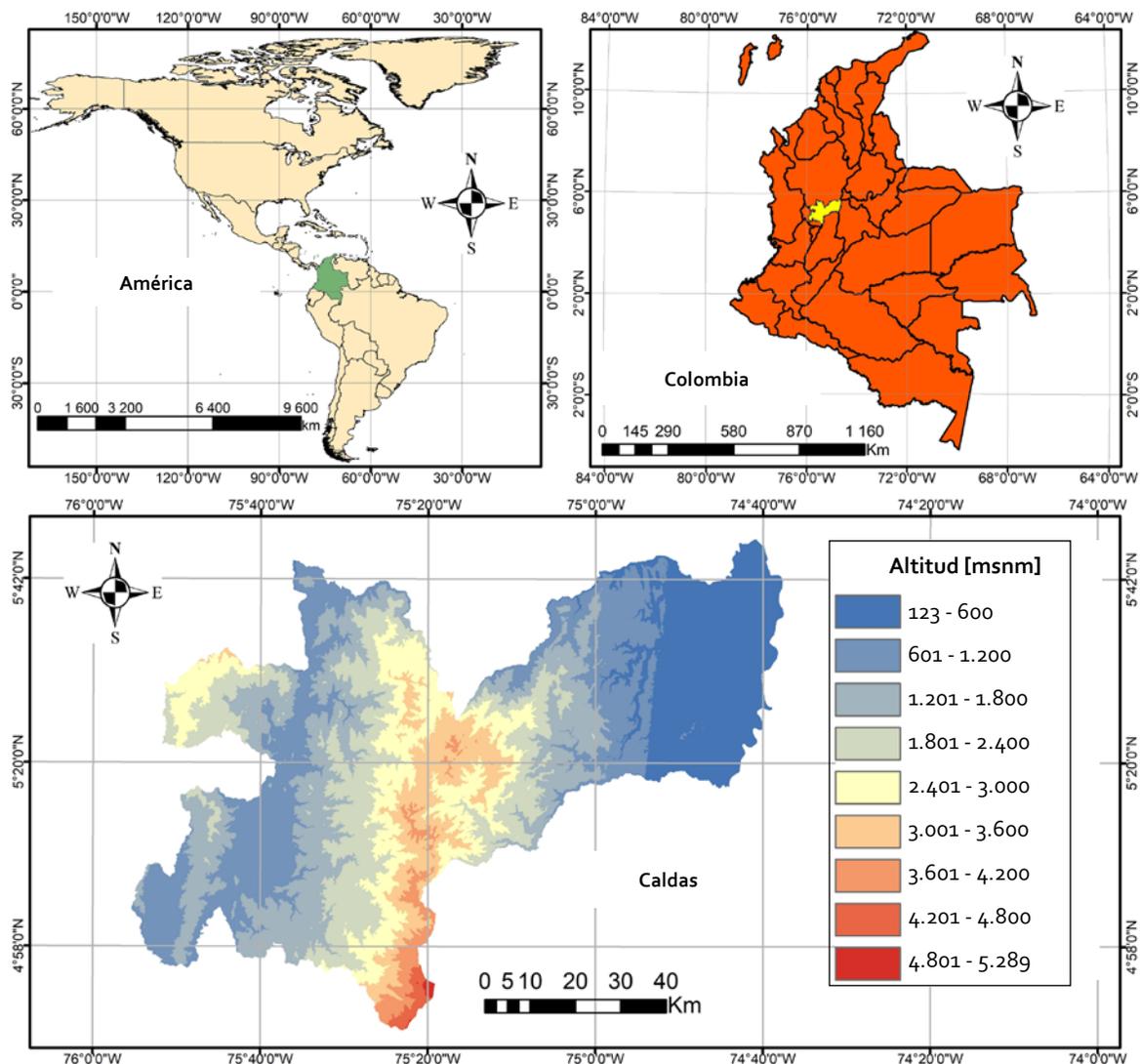


Figura 3. Ubicación del departamento de Caldas. Fuente: elaboración propia

Adicionalmente, el departamento cuenta con el mapa de uso y cobertura del suelo para el año 2010 construido por el IGAC para CORPOCALDAS en escala 1:100.000 (CORPOCALDAS, 2011), por lo que se hizo necesario construir el mapa para otros años de manera que se pudieran comparar y realizar análisis de tendencias (flujos) de los cambios en el uso y las coberturas del suelo (UCS).

Para el desarrollo de los nuevos mapas se obtuvieron imágenes de forma gratuita de la plataforma Global Forest Change (Hansen et al., 2015). Éstas corresponden a imágenes satelitales Landsat 7 de 2000 y 2014 de la zona de influencia del departamento. Por medio de clasificación supervisada se identificaron cuatro tipos de cobertura del suelo por clase y ocho por subclase, de manera que tuviera la misma leyenda, resolución y extensión, que el mapa oficial del 2010 (Patiño et al., 2016). El proceso completo incluyó los siguientes pasos, primero se realizó filtrado espacial por medio de una máscara de inspección de 3x3 celdas para mejorar la calidad visual de la imagen; luego se realizó corrección radiométrica con un factor de conversión en función de los valores de longitud de onda captado por el sensor Landsat, para mejorar la recepción al eliminar la nubosidad, el vapor y los aerosoles; en tercer lugar, se realizó una corrección atmosférica utilizando el modelo FLAASH el que toma parámetros como la altura del sensor, coordenadas geográficas del centro de la imagen, si la zona de estudio es rural o urbana, fecha y hora de la toma de la imagen; y por último, se realizó corrección geométrica, interceptando un Modelo de Elevación Digital (MED) con el mosaico de la imagen, con el fin de eliminar sombras no deseadas. Después de estas correcciones, se realizó la clasificación supervisada de manera que los valores obtenidos en el mapa se correlacionaron con el tipo de cobertura, proceso que permitió eliminar el efecto sal y pimienta por medio del filtro Neighborhood con una ventana de exploración de 7x7, y de esta manera, se redefinieron los contornos de cada cobertura identificada y se ajustó a la leyenda nacional (Patiño et al., 2016; Patiño, 2018). Es importante mencionar que estos mapas no tienen validación en campo, por lo tanto, se consideran un producto académico.

Definición de indicadores

Se calcularon los indicadores de consumo y formación para los periodos 2000-2010 y 2010-2014, para los cuales se analizaron los siguientes flujos: deforestación, urbanización, intensificación de la agricultura y modificación agrícola.

Resultados

Existencias de coberturas de suelos para el departamento de Caldas

Caldas estaba cubierta en gran parte por pastos y bosques (41 y 31 % del área total para el año 2000) mientras que en el año 2014 eran pastos y cultivos agrícolas (42 y 33 %, respectivamente). Los principales impulsores del cambio en ambos periodos considerados (2000-2010 y 2010-2014) fueron la captura de bosques y tierras seminaturales por parte de la agricultura y la captura de tierras agrícolas por otros tipos de coberturas. La cobertura de pastos disminuyó en 2000-2010 y luego aumentó en 2010-2014, quedando casi igual que en el 2000. Las tierras agrícolas (áreas agrícolas heterogéneas y cultivos permanentes) aumentaron un 41 % del 2000 al 2010 y disminuyeron un 5 % del 2010 al 2014; es decir desde el año 2000 crecieron un 35 %. La cobertura forestal disminuyó un 27 % del 2000 al 2010 y 14 % del 2010 al 2014, es decir que disminuyó un 38 % desde el año 2000 (Figura 4).

Revisión del cambio en las coberturas para los periodos 2000-2010 y 2010-2014

Según la metodología, los grupos con el consumo más alto fueron pastos, bosques y áreas agrícolas heterogéneas en 2000-2010 (Tabla 1), mientras que en 2010-2014 el consumo de bosques disminuyó considerablemente mientras que los pastos y áreas agrícolas heterogéneas se mantuvieron igual. La formación de nuevas áreas en 2000-2010 fue mucho mayor para áreas agrícolas heterogéneas en comparación con los otros grupos, seguida por pastos y en menor medida bosques; mientras que en 2010-2014 la formación de pastos y áreas agrícolas heterogéneas fue considerablemente mayor.

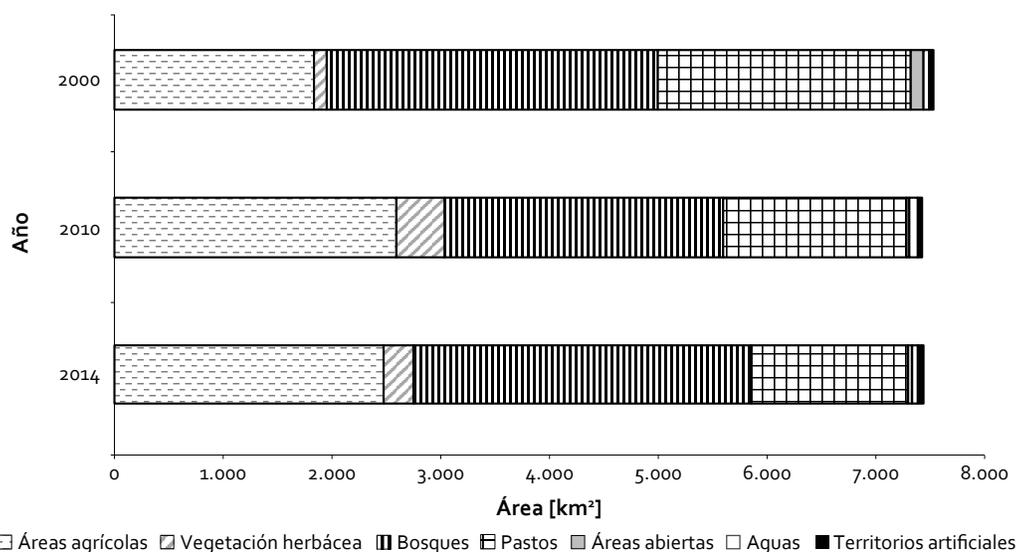


Figura 4. Porcentajes de uso y cobertura del suelo para los años 2000, 2010 y 2014. Fuente: elaboración propia

Al realizar el balance formación-consumo para cada periodo se observa que en 2000-2010 las coberturas con mayor flujo fueron bosques y pastos, que para dicho periodo terminaron con pérdida de áreas (es decir consumo), a razón de 63,29 y 48,35 km²/año, respectivamente. Luego se destacan en dicho balance las áreas de cultivos que en términos

de cambio neto (formación-consumo) también resultan representativas, pero al contrario de las coberturas anteriores, al final del periodo terminan con formación de nuevas áreas cada una (cultivos permanentes y áreas agrícolas heterogéneas), ganando 42,88 y 30,15 km²/año, respectivamente.

Tabla 1. Resumen del balance consumo-formación 2000-2010 y 2010-2014

Subclases Corine Land Cover	Áreas artificiales	Cultivos permanentes y transitorios	Áreas agrícolas heterogéneas	Pastos	Bosques	Áreas con vegetación herbácea	Espacios abiertos	Aguas	Total
2000-2010									
Área cobertura 2000 (km ²)	37,83	404,70	1430,85	3047,56	2317,16	117,36	29,08	51,64	7436,18
Área cobertura 2010 (km ²)	43,25	837,38	1756,00	2557,36	1683,79	445,68	35,80	77,13	7436,39
Formación de nueva cobertura (km ²)	14,25	740,91	1348,82	965,86	421,52	393,38	10,17	42,12	3937,03
Consumo de la cobertura (km ²)	-10,02	-312,09	-1047,31	-1449,41	-1054,46	-65,33	-3,62	-7,73	-3949,97
Cambio neto (formación-consumo)	4,23	428,82	301,51	-483,55	-632,93	328,05	6,55	34,38	-12,93
Cambio anual neto (Formación-Consumo)/N° años	0,42	42,88	30,15	-48,35	-63,29	32,80	0,65	3,44	-1,29
Cambio neto como % del año inicial	11,2%	106,0%	21,1%	-15,9%	-27,3%	279,5%	22,5%	66,6%	
2010-2014									
Área cobertura 2010 (km ²)	43,25	837,38	1756,00	2557,36	1683,79	445,68	35,80	77,13	7436,39
Área cobertura 2014 (km ²)	44,95	328,48	2145,00	3106,25	1448,09	272,70	35,53	55,84	7436,84
Formación de nueva cobertura (km ²)	13,24	242,35	1331,25	1537,27	60,92	187,98	6,15	16,66	3395,82
Consumo de la cobertura (km ²)	-11,72	-748,67	-931,12	-994,13	-277,09	-11,72	-4,20	-32,83	-3011,50
Cambio neto (formación-consumo)	1,52	-506,33	400,13	543,13	-216,17	176,26	1,95	-16,17	384,32
Cambio anual neto (Formación-Consumo)/N° años	0,38	-126,58	100,03	135,78	-54,04	44,06	0,49	-4,04	96,08
Cambio neto como % del año inicial	3,5%	-0,6	22,8%	21,2%	-12,8%	39,5%	5,4%	-21,0%	

Por otro lado, en el periodo 2010-2014 en el balance formación-consumo (fila identificada como cambio neto en la Tabla 1) destacan las coberturas pastos y áreas agrícolas nuevamente. Los pastos al final del periodo presentan consumo es decir aumento de áreas a razón de 135,75 km²/año, lo que es una tasa bastante alta de formación; por su parte las áreas agrícolas correspondientes a cultivos permanentes perdieron áreas a razón de 126,58 km²/año, mientras que las correspondientes a áreas agrícolas heterogéneas ganaron áreas a razón de 100,03 km²/año. Esto indica que la tendencia de formar nuevas áreas para cultivos agrícolas heterogéneas se mantuvo en ambos periodos, acelerándose en el segundo periodo, mientras que la tendencia para los cultivos agrícolas permanentes varió ya que en el primer periodo se produjo formación y en el segundo consumo. En ambos periodos el consumo de áreas de bosques se mantuvo, aunque la tasa de deforestación disminuyó en el segundo periodo de 63,29 a 54,04 km²/año.

Intensificación de la agricultura

Del análisis de áreas agrícolas heterogéneas y cultivos permanentes se concluye que en 2000-2010 hubo un aumento de la frontera agrícola de 1.835,55 a 2,593.38 km². Sin embargo, en 2010-2014, hubo una ligera disminución en el área cultivada (de 2.593,38 a 2.473,48 km²), mostrando un cambio muy fuerte en la dinámica presentada de un periodo a otro. Los cultivos permanentes mostraron el mayor cambio (Figura 5A), ya que en 2000-2010 un gran porcentaje de la nueva área de cultivo formada provino de pastos y áreas agrícolas heterogéneas (barras en blanco), mientras que en 2010-2014 la dinámica fue completamente opuesta, ya que el área de cultivos permanentes se consumió para formar las dos coberturas anteriores, lo que según Feranec se considera intensificación de la agricultura. Por su parte, las áreas agrícolas heterogéneas (Figura 5B) en ambos periodos muestran tendencia general a la formación, aunque se destaca el consumo a partir de cultivos permanentes (Figura 5B).

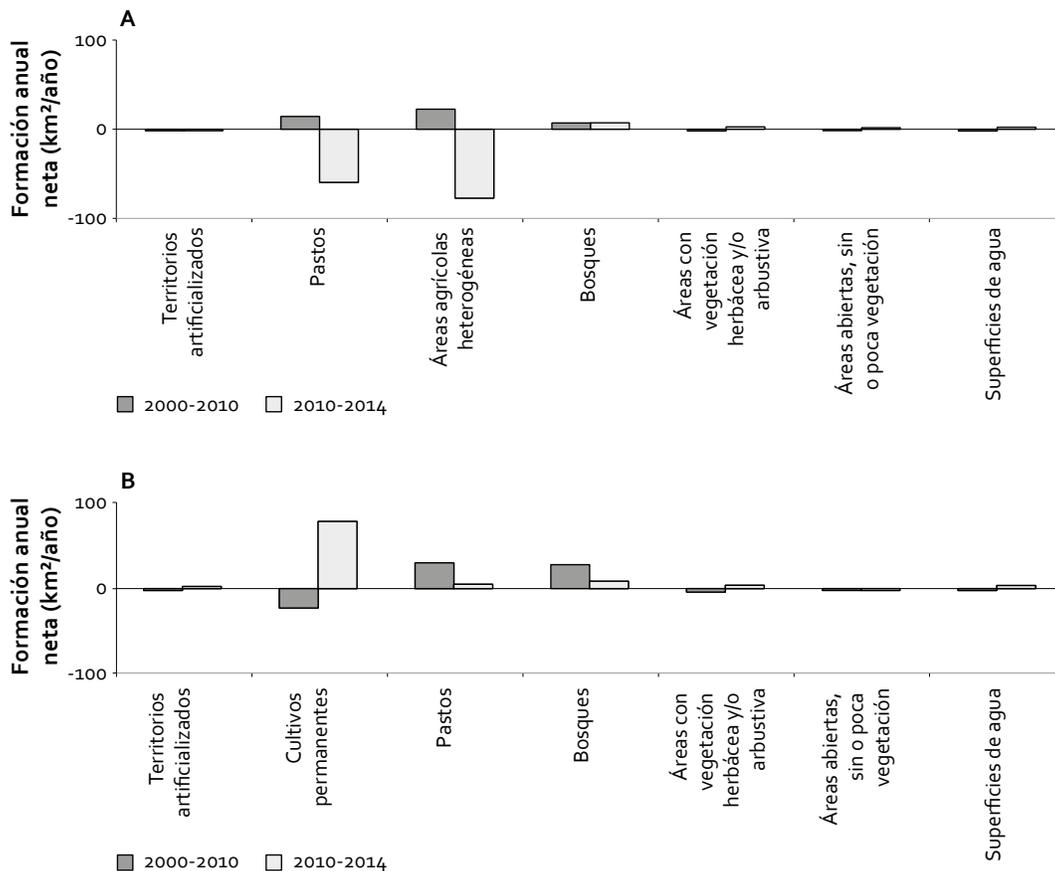


Figura 5. Formación neta por año de cultivos permanentes (A) y áreas agrícolas mixtas (B)

Además, se puede observar que en 2000-2010 las áreas agrícolas heterogéneas se formaron principalmente en la parte oriental del Departamento de Caldas, donde los municipios han basado tradicionalmente su actividad económica en la horticultura y el cultivo de papa (Figura 6). Para el periodo 2010-2014, se presenta una situación similar en el centro del departamento, es decir, hay una gran dinámica de cambios de pastos a cultivos y viceversa. Esto muestra una gran rotación de tipos de cultivos, perdiendo cultivos permanentes a otros tipos y rotando áreas agrícolas a pastos (ganadería).

Modificación agrícola

En este ítem se analiza la modificación de la cobertura agrícola hacia pastos (cobertura relacionada principalmente con la ganadería). La formación neta de estas nuevas áreas de pastos ocurrió principalmente en áreas de cultivos permanentes, mayoritariamente en el segundo periodo (Figura 7), lo que confirma la amplia rotación entre cultivos y pastos. En el primer periodo el área de pastos disminuyó notablemente ya que fue consumida por otros tipos de cobertura, especialmente agricultura (barras negras de la Figura 7), mientras que el segundo

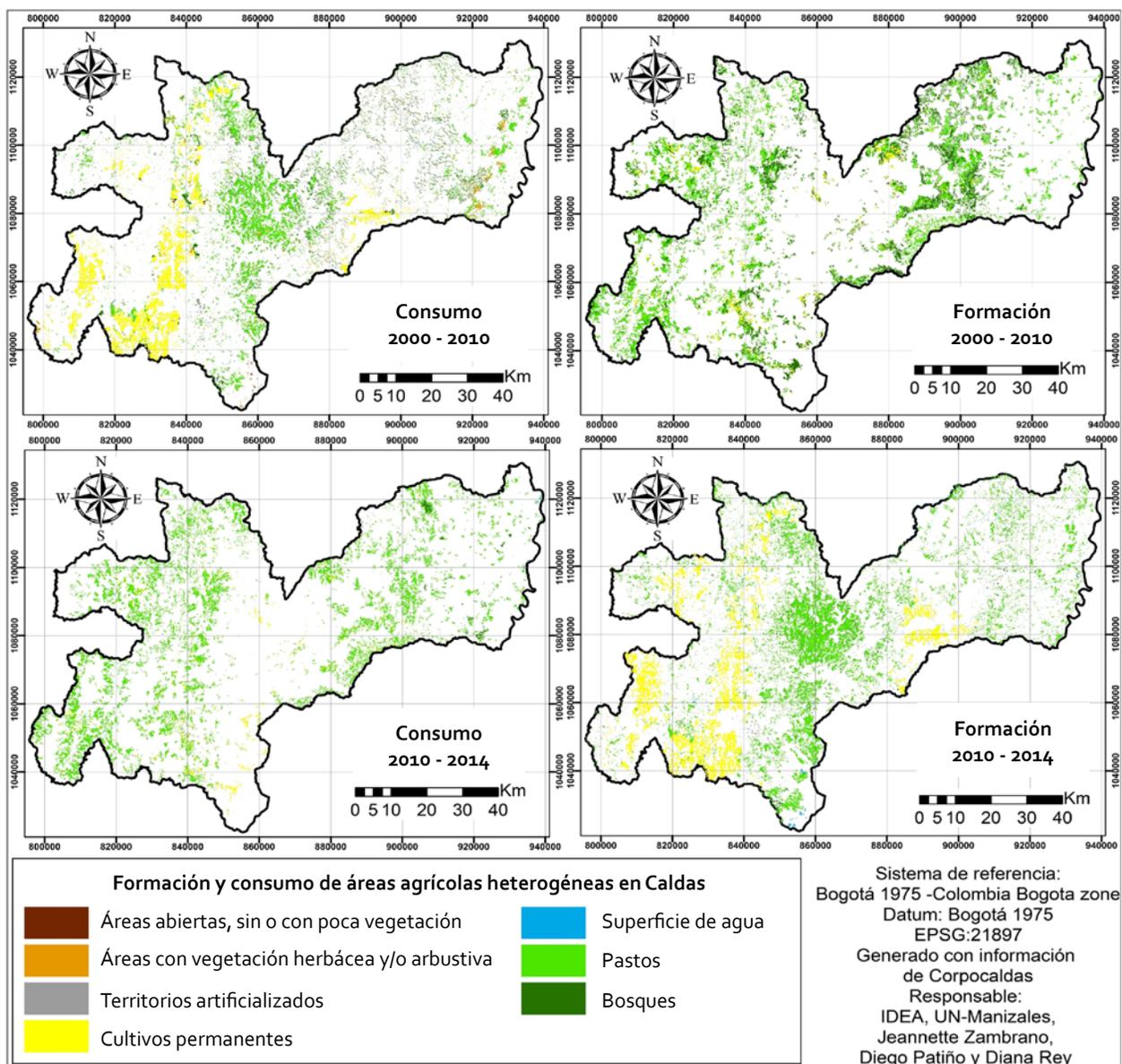


Figura 6. Mapas de formación y consumo para áreas heterogéneas en el departamento de Caldas

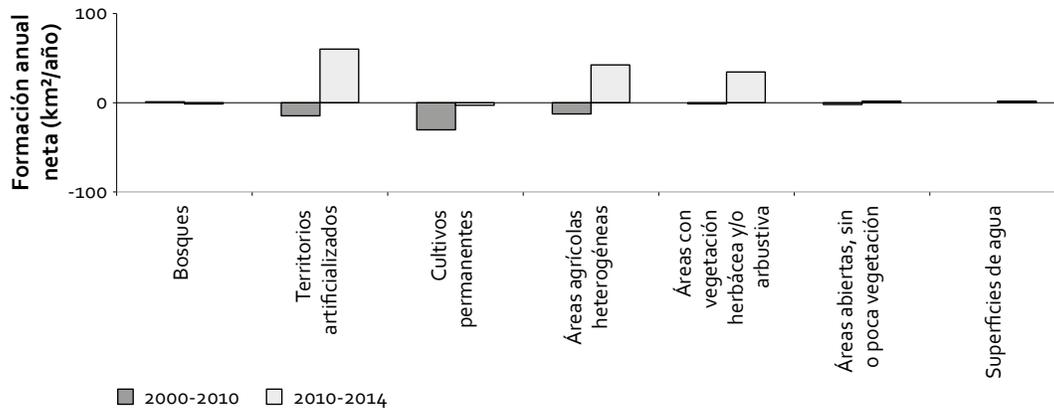


Figura 7. Formación neta por año de pastos

periodo estuvo marcado por la amplia formación de este tipo coberturas a partir de casi todos los tipos analizados (barras blancas de la Figura 7).

En cuanto a la distribución espacial de dichos procesos en el 2000-2010 las formaciones se presentaron principalmente en los municipios de la zona centro-norte (ver Figura 8, izquierda), mientras que en el 2010-2014 se ubicaron en la zona noroeste (ver Figura 8, derecha). Por otro lado, el consumo se produjo principalmente en la zona occidental y central del departamento tanto en el primer como en el segundo período. La rotación de los cultivos hacia la ganadería representa mayores presiones ejercidas debido al sobrepastoreo, ya que la superficie del suelo y la profundidad de la materia orgánica se reducen, evitando el crecimiento de las plantas, reduciendo la capacidad de infiltración natural del suelo y aumentando la pérdida de suelo a través de la erosión del agua.

Deforestación

Las coberturas forestales requieren grandes extensiones de tierra y tiempo para su desarrollo, por lo que son muy vulnerables en comparación con otras coberturas. El balance muestra la prevalencia de pérdida de área forestal en ambos períodos (consumo) a favor de pastos, áreas agrícolas heterogéneas, cultivos permanentes y áreas con vegetación herbácea y arbustiva, lo que se observa en la Figura 9 ya que casi todas las barras son negativas. De dicha figura resalta la gran velocidad con que se convirtieron bosques hacia áreas de pastos en el segundo

periodo, ya que se observó una tasa de consumo de ~ 42 km²/año. Sin embargo, en el 2010-2014 hubo una disminución en la tasa de deforestación de 62,65 a 58,35 km²/año debido a la adquisición de 11.674 ha de tierra para protección por parte de la empresa ISAGEN (ISAGEN, 2015).

En lo referente a la distribución espacial de dichos cambios se observa que la pérdida de área forestal en ambos periodos ocurrió en las áreas central y norte del departamento, y el impacto más marcado se presenta en la zona noreste, donde se encuentra la reserva forestal más importante en Caldas (Bosque de Florencia) (Figura 10). Sin embargo, la formación forestal que se presentó principalmente en la zona oriental (2000-2010) y noreste (2010-2014) de Caldas (Figura 10).

Urbanización

La cobertura artificial en Caldas tiende a aumentar en ambos períodos con una formación neta de 4,23 y 1,52 km², respectivamente, principalmente formados a partir de áreas agrícolas y pastos. El territorio artificial representó el 0,6 % del área total de Caldas en 2014, y el crecimiento se presentó principalmente en la capital del departamento. El principal crecimiento para el período 2000-2010 se produjo en la zona noroeste y centro de la ciudad de Manizales, y en 2010-2014 en el centro-sur y sureste de la ciudad. La expansión urbana provoca la degradación del suelo debido a la mayor presión ejercida sobre el recurso porque las áreas urbanas tienen porciones más grandes de superficies impermeables.

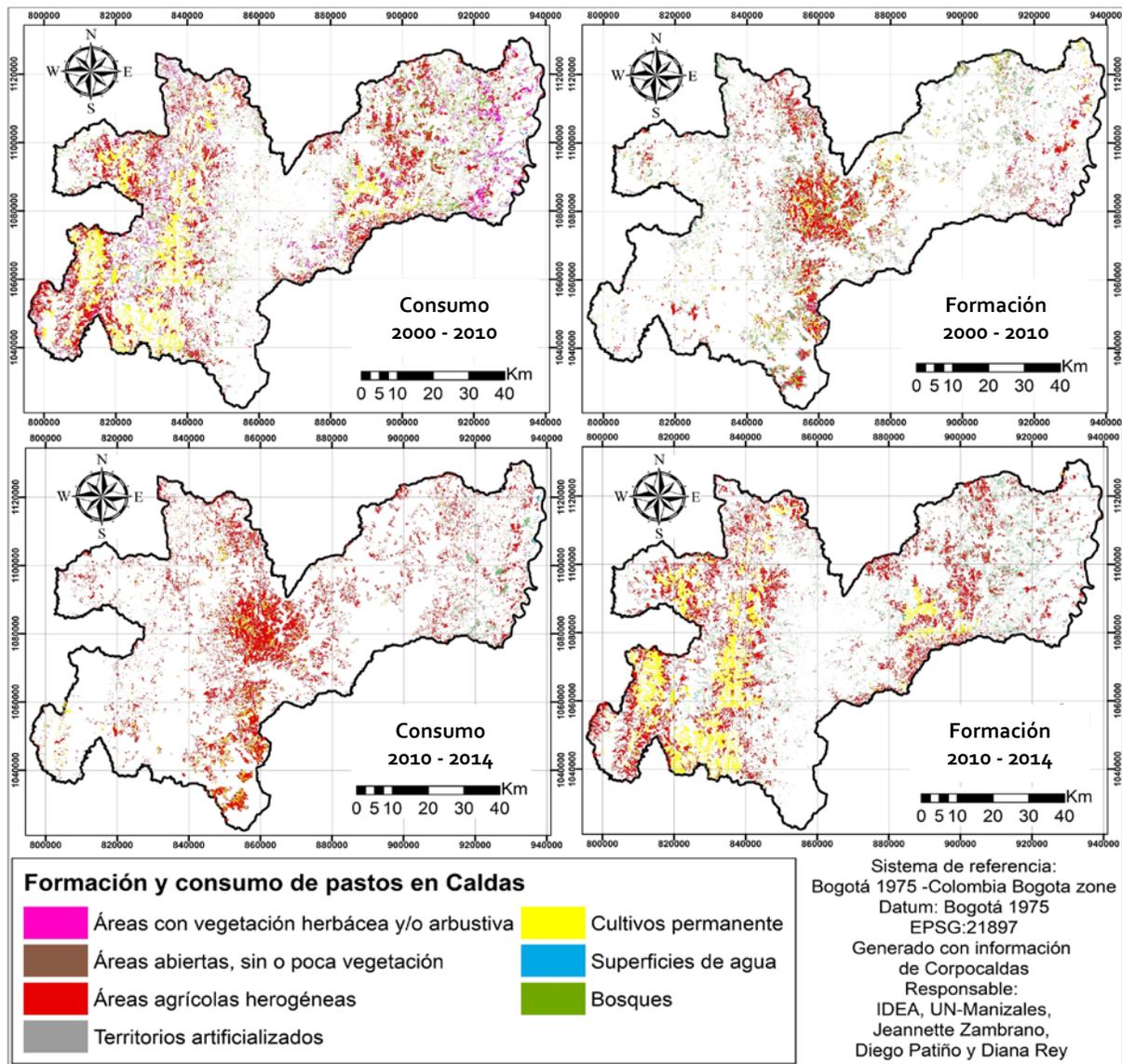


Figura 8. Mapas de formación y consumo de pastos en el Departamento de Caldas

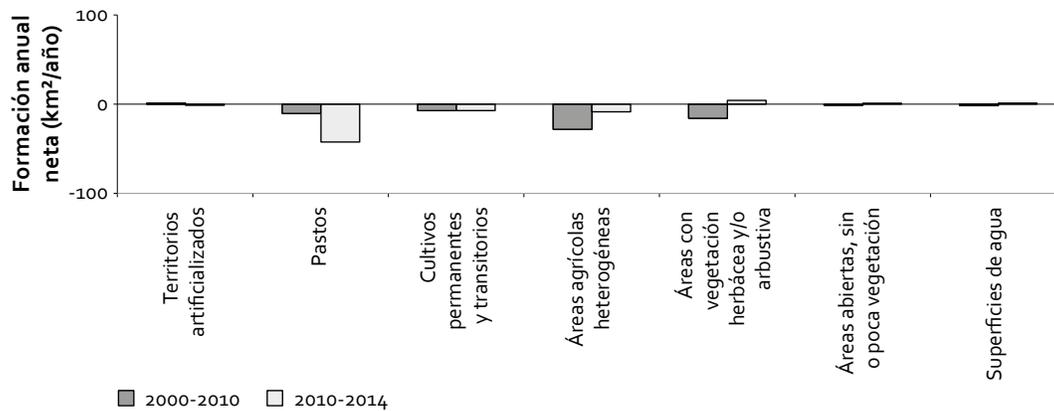


Figura 9. Formación neta por año de coberturas boscosas

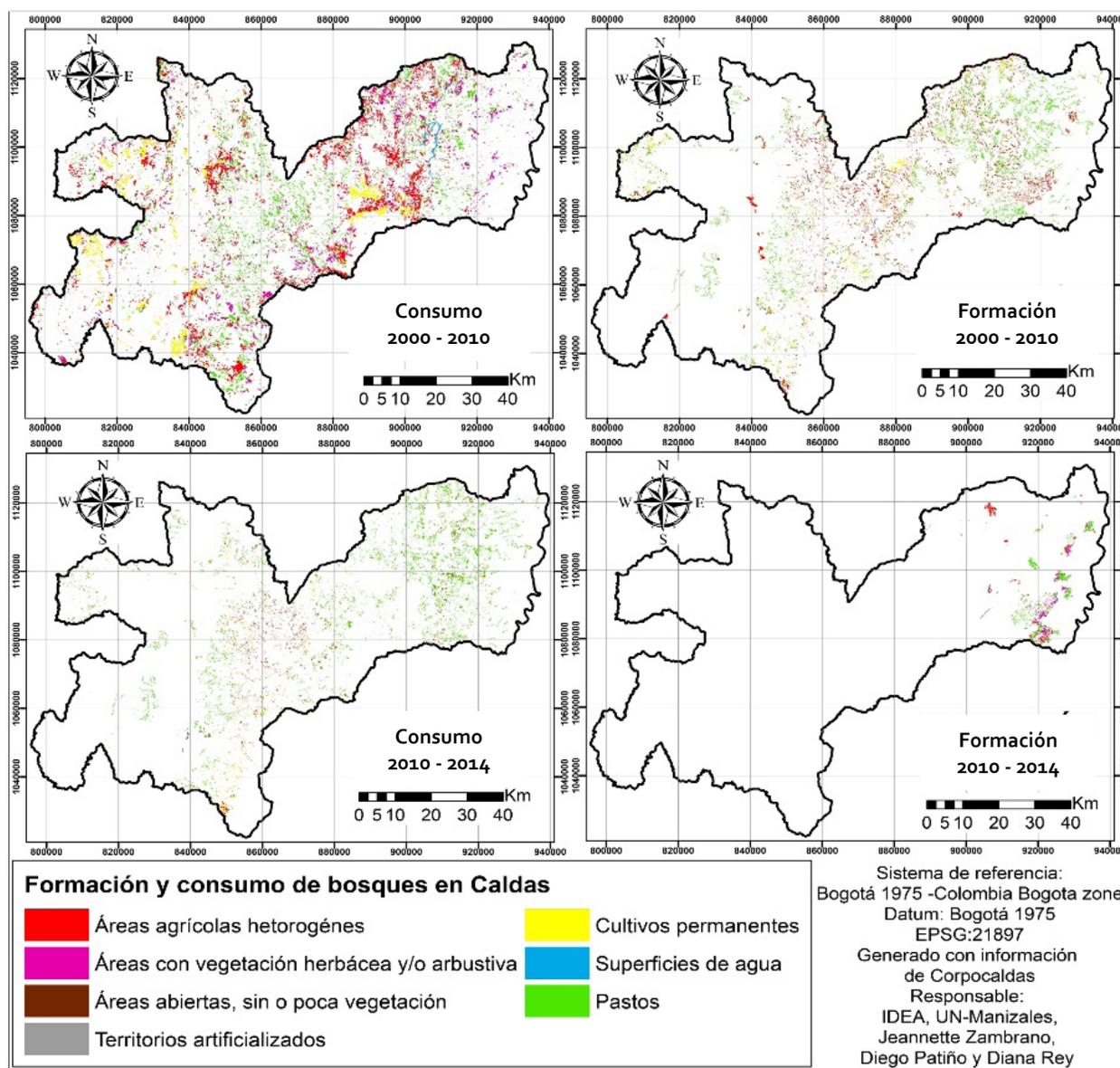


Figura 10. Mapas de formación-consumo de bosques en el departamento de Caldas

Discusión

La deforestación, la intensificación de la agricultura y el cambio en la cobertura de pastos fueron los principales flujos presentados en las cuentas de tierras en el período analizado.

El área para pastos permanece casi igual en el período 2000-2014 (representando el 41, 34 y 42 % en los años 2000, 2010 y 2014, respectivamente), presentando una disminución en el periodo 2000-2010 que se compensa casi totalmente con

un incremento en el periodo 2010-2014. Los pastos suelen estar asociados al uso ganadero y aunque no se corresponden totalmente, representan una medida indirecta para evaluar dicho uso. La tendencia manifestada en las áreas de pastos se corrobora con los reportes de predios ganaderos, ya que en el periodo 2001 a 2010 se disminuyeron de 8.532 a 8.237, mientras que para el siguiente periodo aumentaron de 8.237 a 8.622 (Fedegán, 2016). En cuanto al inventario bovino se presenta la misma

tendencia decreciente en las cabezas de ganado ya que para los años 2001, 2010 y 2014, se reportaron 376.962, 362.571 y 353.065 cabezas de ganado respectivamente, es decir un decremento paulatino de las mismas (Fedegán, 2016).

Asumiendo como cierta la relación entre el área de pastos y el área destinada a la ganadería, se encuentra que la participación de la ganadería en el Producto Interno Bruto de Caldas para el 2000 fue de 2,5 %, para el 2010 de 3,9 % y en el 2014 de 4,6 % (DANE, 2018). De manera que el PIB para la ganadería aumentó 81,8 % en el periodo 2000-2014 (Figura 11). A pesar de lo dicho, según el DANE la representación de la ganadería en el PIB total disminuyó del 10,2 % en 2000 al 2,3 % en el 2014 perdiendo aporte en PIB total. Por otra parte, varios autores indican que las áreas destinadas a los pastizales son muy altas, en contraste con el PIB generado por la ganadería, lo que significa que estas áreas son poco productivas en términos económicos; el mismo comportamiento se presenta en Colombia con un sector ganadero muy extenso y poco productivo (Mahecha et al., 2002; Vergara, 2010). Adicionalmente a lo anterior, la expansión del sector ganadero está altamente correlacionada con la deforestación (IGAC, 2012; Nepstad et al., 2013; Palacios-Lozano et al., 2019; Chamba et al., 2020), lo que se corrobora con lo encontrado en este estudio donde se observa que el consumo de bosques (Figura 9) se da en favor de la cobertura de pastos en ambos periodos analizados tomando en forma neta 103,87 km² durante el primer periodo y 42,42 km² durante el segundo. Lo anterior permite concluir que las áreas destinadas a pastizales no se están planificando adecuadamente y podrían representar una oportunidad para revertir los efectos devastadores de la deforestación en el departamento, mediante la modificación de los procesos ganaderos del país. Para lo cual una de las medidas propuestas por (Nepstad et al., 2013) es disminuir el área de pastos dedicada a la ganadería a nivel nacional, con lo cual existirían grandes extensiones de tierras marginales para la regeneración de bosques naturales y bosques para la industria forestal, lo cual puede ser apoyado por políticas e incentivos económicos.

La degradación del suelo por la ganadería se genera por el pisoteo del ganado que produce la compactación de este (Castaño et al., 2019). La compactación implica la reducción de la porosidad del suelo, disminución de la infiltración y aumento de la resistencia mecánica, así como cambios adversos en la relación suelo-agua-aire que perjudican el desarrollo de las raíces de las plantas y por ende de su productividad (Sadeghian et al., 2000; MADS, 2016). Al respecto, el IGAC reporta niveles de erosión por terraceo (en forma laminar y surcos) de 2.668,32 km² para el año 2010 lo que se corresponde casi totalmente con el área de pastos para dicho año (2,557.36 km²) (IGAC, 2012). Otras consecuencias de la ganadería son la contaminación de las fuentes de agua y suelo dadas por los insumos agropecuarios (Castaño et al., 2019), también las prácticas ganaderas, principalmente las tradicionales, contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero – GEI, por estas razones, la ganadería se considera como una actividad altamente contaminante (Buitrago-Guillen et al., 2018) y por ende causante de gran degradación de los suelos.

Por otra parte, la agricultura fue la tercera cobertura de la región (25 %) para el año 2000, mientras que en el 2014 fue la segunda (33 %) con un aumento del 35 % en el período analizado, lo que implica una relación directa con el aumento del PIB en el mismo período (Figura 11A). El PIB para la agricultura aumentó 31,4%, pero la representación en el PIB total disminuyó del 10,2 % en 2000 al 6,7 % en 2014. Aunque el crecimiento de la agricultura y la ganadería están generando mayores ingresos, como se ve en la Figura 11B, este crecimiento se ha producido a expensas de la disminución de las áreas forestales. En la literatura se reconoce que parte de los problemas agrarios del país se deben al uso inadecuado de los suelos, lo que incluye conflictos por sobreutilización y subutilización (MADS, 2016), ya que como reporta el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC en Colombia se tiene un 15 % de los suelos sobre-utilizados y un 13 % subutilizados (IGAC, 2012). Parte del problema agrario también incluye la expansión de las actividades ganaderas en los suelos de vocación agrícola (MADS, 2016), en Colombia 22 millones de hectáreas tienen vocación

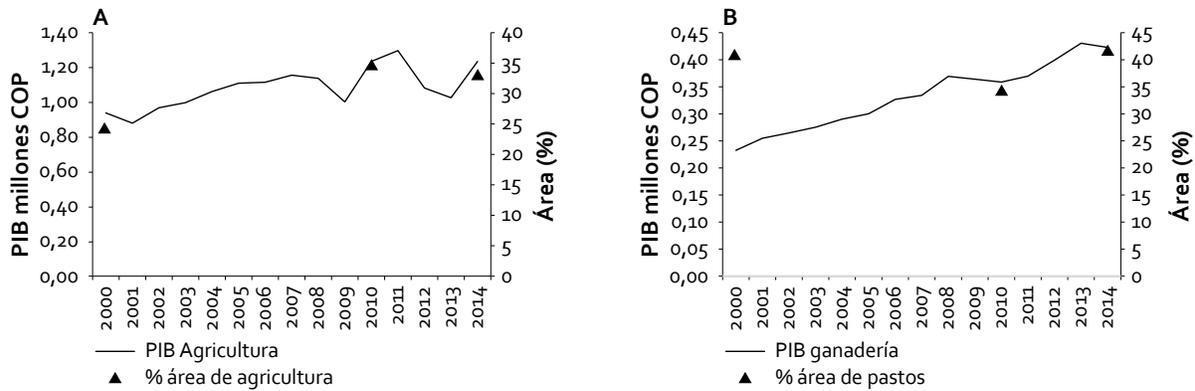


Figura 11. Comparación de áreas de agricultura y ganadería con su participación en el PIB de Caldas

agrícola, 4 millones vocación agroforestal y 15 millones vocación ganadera; pero solo 5 millones de hectáreas se utilizan para agricultura mientras que más de 34 millones de hectáreas se utilizan para ganadería (IGAC, 2012). Por otra parte, el estudio de degradación de los suelos realizado por el IDEAM en el año 2012 indica que Corpocaldas reporta algún tipo de erosión en el 82 % del territorio, más explícitamente identifican erosión laminar y laminar por surcos en 3,419 km² para Caldas. La anterior cifra es superior el territorio de áreas agrícolas para el año 2010, lo que indica que otros tipos de coberturas también presentan problemas erosivos (IDEAM y UDCA, 2015). En dicho estudio indican adicionalmente que sólo el 7 % de las áreas agrícolas en Colombia no presentan ningún grado de erosión, es decir que “se puede asumir que donde hay agricultura hay algún grado de erosión” (IDEAM y UDCA, 2015, p. 37).

La cobertura de bosques resulta ser la más afectada en el periodo analizado ya que tanto para el 2000-2010 como el 2010-2014 presentó consumo o pérdida de áreas (-37 % de 2000-2014). Dicha cifra no se pudo corroborar con cifras oficiales puesto que el IDEAM reporta de manera detallada los índices de deforestación por departamento desde hace pocos años. Para la época de análisis se encuentran reportes nacionales, a partir de los cuales se puede establecer el cambio en la tendencia hacia un decrecimiento en las tasas de deforestación. Por otra parte, se pueden encontrar indicadores de deforestación generados a partir de información radar, como Global Forest Watch, que indica que para el periodo 2000-2018 Caldas perdió 40.347 ha, mientras que

este análisis reporta casi el doble en el periodo 2000-2014 (World Resources Intitute, 2018). Es complejo definir las razones de las diferencias en los valores ya que el análisis aquí planteado no discrimina usos de coberturas, de manera que se incluyen los bosques de plantaciones forestales, donde se pueden encontrar las diferencias en las cifras. A pesar de lo anterior, todos los informes indican que en Caldas la cobertura de bosques sigue perdiéndose debido principalmente a las coberturas de cultivos y pastos. Por otra parte, se conoce que la deforestación es la principal causa de las emisiones de gases de efecto invernadero GEI en Colombia (36 %), seguida del sector agrícola (26 %) para el año 2012, que fue el último con mediciones en Colombia (IDEAM y PNUD, 2016). La agricultura ha aumentado las emisiones netas de gases de efecto invernadero (GEI) de 16 Mbn de CO₂ eq. en 2000 a 18 en 2010, mientras que los pastos han aumentado de 45 Mbn CO₂ eq. a 65 en el mismo período. Adicionalmente como indica (Guzmán-Manrique y Flórez-García, 2019) la deforestación genera la fragmentación del paisaje, teniendo áreas de bosques aislados que alteran la dinámica del ecosistema debido al aislamiento de la flora y fauna, siendo una amenaza a la biodiversidad.

Conclusiones

Las coberturas con las mayores tasas de cambios fueron los bosques (-63.29 y -54.04 km²/año para cada periodo), pastos (-48.35 y 135.78 km²/año para cada periodo), cultivos permanentes (+42,88 y -126,58 km²/año para cada periodo) y áreas agrícolas heterogéneas (+30,15 y +100,03 km²/año). Lo

anterior demuestra que el consumo y la formación son procesos dinámicos y están asociados con las características espaciales y temporales del área de interés. Por ejemplo, en el período 2010-2014, Caldas presentó un mayor cambio en la cobertura de pastos que en el período 2000-2010, lo que se relaciona directamente con un aumento en la actividad ganadera en los últimos cinco años. Este fenómeno también podría deberse a la pérdida de producción de café. El desequilibrio (consumo versus formación) es notable en las coberturas con mayor extensión en Caldas. Esto representa un aumento en las presiones ejercidas sobre el recurso, y significa que la capacidad productiva podría verse directamente afectada; en otras palabras, se define como un suelo con un cierto nivel de degradación.

El bosque fue la cobertura más amenazada (disminución del 37 % del área entre 2000 y 2014), tanto en su distribución espacial como por el grado de cambio neto anual, ya que se presentaron zonas de alto consumo en los períodos 2000-2010 y 2010-2014 en áreas que se han caracterizado por tener grandes áreas de bosques húmedos y otros tipos de bosques. Además, esas áreas están ubicadas en cuencas que proveen agua para la mayoría de los acueductos de Caldas. En términos de degradación, el flujo de deforestación en los períodos 2000-2010 y 2010-2014 representó un aumento en las presiones ejercidas sobre el suelo ya que la deforestación debe ser cero para garantizar las reservas de agua. Esto podría dar como resultado la pérdida del almacenamiento de agua para el área, afectando el ciclo hidrológico de las principales cuencas del Departamento de Caldas.

Las áreas agrícolas fueron el segundo tipo de cobertura con mayores cambios. El aumento de la frontera agrícola fue poco significativo ya que se presentó una disminución correspondiente al 2 % del área total de departamento, ese cambio no es conclusivo, ya que puede deberse a la incertidumbre propia de la falta de validación de los mapas. Sin embargo, en cuanto al tipo de cultivos la dinámica en los flujos sí es significativa ya que los cultivos permanentes tuvieron una formación alta en el periodo 2000-2010 pero luego en el periodo 2010-2014 la tendencia fue opuesta, consumiéndose áreas en favor de áreas agrícolas heterogéneas lo que es

considerado según la metodología Land Accounts como intensificación de la agricultura. Sin embargo, el consumo de áreas de bosques en favor de los cultivos permanentes o transitorios se observó en los dos periodos, como instituciones nacionales o internacionales han apuntado. El cambio de dichas coberturas genera un impacto considerable sobre el suelo ya que modificar la cobertura agrícola es relativamente fácil, pero no así revertir el proceso de deforestación, y su impacto sobre la degradación de los suelos.

En tercera medida, se observa la gran variación en las áreas destinadas a pastos, destacándose formación significativa en el periodo 2010-2014. Aunque el área para pastos permanece casi igual en el período total (2000-2014), y el PIB para la ganadería aumentó, su representación en el total disminuyó poniendo de evidencia lo manifestado por diversos autores sobre la necesidad de revisar las políticas ganaderas. Se confirma con el estudio realizado la tendencia nacional e internacional de formar áreas destinadas a pastos (relacionadas con la ganadería) a partir del consumo de áreas boscosas, lo que de manera similar a lo que sucede con las áreas agrícolas genera impactos significativos en el estado de los suelos, ya que, aunque se reforesten dichas áreas alcanzar nuevamente los niveles de protección de un bosque maduro toma años.

El flujo de expansión urbana mostró una tendencia al aumento; en el período 2000-2014 hubo un crecimiento anual de 1,17 % en dicha cobertura, lo que se concentró en la ciudad capital del departamento.

En términos generales, se concluye que la metodología de flujo de coberturas de los suelos podría ser una herramienta importante para el manejo del suelo, ya que al realizar balances (consumo y formación) para las coberturas críticas, se observan las zonas donde se presentan los desequilibrios, lo que a su vez permitiría evaluar la posible degradación del suelo. A través de estos indicadores, los tomadores de decisiones pueden aplicar medidas para mejorar las condiciones de los recursos y planificar las actividades económicas.

De acuerdo con el estudio de degradación de los suelos realizado por el IDEAM en el 2012, se observa que el 93 % de los territorios agrícolas y el 77

% del territorio en ganadería presenta algún grado de erosión. Por el contrario, indican que de los suelos con coberturas boscosas solo el 9,2 % presenta algún grado de erosión, lo que indica el grado de protección que ellos ocasionan. El estudio realizado en este estudio permite deducir de manera indirecta las afectaciones en degradación de los suelos al estudiar los cambios de un tipo de cobertura protectora (como los bosques) a aquellas que causan erosión como la agricultura y la ganadería. Es importante mencionar que la extensión de coberturas agricultura y ganadería por sí solas no son las causantes de los procesos erosivos y más bien las prácticas relacionadas con dichos tipos de coberturas.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento del proyecto “Línea Base Ambiental del Departamento de Caldas fase III” llevado a cabo entre la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales y CORPOCALDAS, identificado con el código 26258 entre el año 2015 y 2016. Los resultados plasmados aquí hacen parte parcialmente del trabajo de grado “*Respuesta hidrológica ante los cambios de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Chinchiná*” realizada como requisito para obtener el grado de Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos.

Referencias

- Alfieri, A., Clarke, D., Havinga, I., Weber, J., 2011. Note on land cover and use classifications. En: Expert Meeting on Ecosystem Accounting. European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark
- Blum, W., 2004. Soil indicators for decision making-sharing knowledge between science, stakeholders and politics. En: ISCO 2004 - 13th International Soil Conservation Organisation Conference. Brisbane, Australia.
- Buitrago-Guillen, M., Ospina-Daza, L., Narváez-Solarte, W., 2018. Sistemas silvopastoriles: alternativa en la mitigación y adaptación de la producción bovina al cambio climático. *Bol. Cient. Centro Mus.* 22(1), 31-42.
- Castaño, K., Chará, J., Giraldo, C., Calle, Z. (Eds.), 2019. Manejo integrado de insectos herbívoros en sistemas ganaderos sostenibles. CIPAV, Cali, Colombia.
- Chamba Bernal, J., Bermeo Cuenca, L., Sarango Ortega, Y., 2020. Producción ganadera: la deforestación y degradación del suelo, una estrategia para el desarrollo sostenible. *Rev. Cient. Agroeco.* 8(1), 77-82.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Lambin, E., 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review. *Int. J. Remote Sens.* 25(9), 1565-96. DOI: 10.1080/0143116031000101675
- Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS), 2011. Mapa de uso y cobertura del suelo 1:100:000. Manizales, Colombia.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2012. Estudio semidetallado de suelos de los municipios de Manizales, Chinchiná, Palestina, Neira y Villamaría. Manizales, Colombia.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística Colombia (DANE), 2018. Cuentas nacionales departamentales: PIB por departamento. *Database*, disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>; consultado:
- Federación Colombiana de Ganaderos (Fedegán), 2016. Número de explotaciones bovinas (predios) por departamento. *Database* datos 2001-2015. ICA - 2016. 2016, disponible en: <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/inventario-ganadero>; consultado:
- Feranec, J., Jaffrain, G., Soukup, T., Hazeu, G., 2010. Determining changes and flows in European landscapes 1990-2000 using CORINE Land Cover data. *Appl. Geogr.* 30(1), 19-35. DOI: 10.1016/j.apgeog.2009.07.003
- Feranec, J., Hazeu, G., Christensen, S., Jaffrain, G., 2007. Corine Land Cover change detection in Europe (case studies of the Netherlands and Slovakia). *Land Use Policy* 24(1), 234-247. DOI: 10.1016/j.landusepol.2006.02.002
- Feranec, J., Šúri, M., Ot’ahel’, J., Cebecauer, T., Kolář, J., Soukup, T., Zdeňková, D., Waszmuth, J., Vájde, V., Vjídea, A.-M., Nitica, C., 2000. Inventory of major landscape changes in the Czech Republic, Hungary, Romania and Slovak Republic 1970s-1990s. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2(2), 129-139. DOI: 10.1016/S0303-2434(00)85006-0
- Galloway, J., Aber, J., Erisman, J., Seitzinger, S., Howarth, R., Cowling, E., Cosby, B., 2003. The nitrogen cascade. *BioScience* 53(4), 341-356. DOI: 10.1641/0006-3568(2003)053[0341:TNC]2.0.CO;2
- Guzmán-Manrique, J., Flórez-García, A., 2019. Fragmentación del paisaje empleando análisis multitemporal de imágenes de satélite Landsat TM y ETM+ en el municipio de Montelíbano, Córdoba-Colombia. *Gest. Ambient.* 22(1), 31-41. DOI: 10.15446/ga.v22n1.76116
- Haines-Young, R., Weber, J.-L., Páramo, F., Breton, F., Gómez, O., Soukup, T., 2006. Land accounts for Europe 1990-2000 towards integrated land and ecosystem accounting. European Environment Agency, Copenhagen.
- Hansen, M., Potapov, P., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.,

- Goetz, S., Loveland, T., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C., Townshend, J., 2015. Global forest change 2000-2019. Disponible en: <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change#dl=1;old=off;bl=off;lon=20;lat=10;zoom=3>; consultado:
- Houghton, R., Boone, R., Melillo, J., Palm, C., Woodwell, G., Myers, N., Moore III, B., Skole, D., 1985. Net flux of carbon dioxide from tropical forests in 1980. *Nature* 316 (6029), 617-20. DOI: 10.1038/316617a0
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Colombia (IDEAM), 2010. Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. Area TH-62-04-1 (257). Bogotá, DC.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Colombia (IDEAM), 2014. Metodología Corine Land Cover. Bogotá, DC. <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover> ; consultado: agosto de 2021.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Colombia (IDEAM), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2016. Inventario nacional y departamental de gases efecto invernadero – Colombia. Tercera comunicación nacional de cambio climático. MADS, DNP, and CANCELERÍA, Bogotá, DC.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Colombia (IDEAM), Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), 2015. Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia. Bogotá, DC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi Colombia (IGAC), 2012. Estudio de los conflictos de uso del territorio colombiano: escala 1:100.000. Bogotá, DC.
- ISAGEN, 2015. Informe de gestión ambiental. Medellín, Colombia.
- Irwin, E., Geoghegan, J., 2001. Theory, data, methods: Developing spatially explicit economic models of land use change. *Agric. Ecosyst. Environ.* 85(1-3), 7-24. DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00200-6
- Kok, K., Farrow, A., Veldkamp, A., Verburg, P., 2001. A method and application of multi-scale validation in spatial land use models. *Agric. Ecosyst. Environ.* 85(1-3), 223-238. DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00186-4
- Mahecha, L., Gallego, L., Peláez, F., 2002. Situación actual de la ganadería de carne en Colombia y alternativas para impulsar su competitividad y sostenibilidad. *Rev. Col. Cienc. Pec.* 15(2), 213-24.
- Matson, P., Parton, W., Power, A., Swift, M., 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277, 504-509. DOI: 10.1126/science.277.5325.504
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2016. Política para la gestión sostenible del suelo. Bogotá, DC.
- Nepstad, D., Bezerra, T., Tepper, D., McCann, K., Stickler, C., McGrath, D., Ruedas, A., 2013. Cómo abordar los motores agrícolas de la deforestación en Colombia: aumentar la producción terrestre ya la vez reducir la deforestación, degradación forestal, emisión de gases de efecto invernadero y pobreza rural. Earth Innovation Institute, Berkeley, CA.
- Nunes de Lima, M., 2005. IMAGE2000 and CLC2000 products and methods. CORINE Land Cover updating for the year 2000. European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italia.
- Palacios-Lozano, M., Camacho Rojas, A., Pinto, L., Rojas, A., 2019. Bases técnicas para la formulación de la política nacional de ganadería bovina sostenible – Colombia (Bt-PNGBS). Bogotá, DC.
- Patiño, D., 2018. Respuesta hidrológica ante los cambios de uso y cobertura del suelo en la cuenca del río Chinchiná. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- Patiño Rincón, D., Rey Valencia, D., Zambrano Nájera J., 2016. Evaluación de la influencia de los cambios de uso y cobertura del suelo en la degradación utilizando imágenes satelitales. En: 27 Congreso Latinoamericano de Hidráulica. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), Lima.
- Sadeghian, S., Rivera, J., Gómez, M., 2000. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. FAO-CIPAV, Cali, Colombia.
- Sagan, C., Toon, O., Pollack, J., 1979. Anthropogenic albedo changes and the earth's climate. *Science* 206(4425), 1363-1368. DOI: 10.1126/science.206.4425.1363
- Stott, A., Haines-Young, R., 1998. Linking land cover, intensity of use and botanical diversity in an accounting framework in the UK. En: Uno K., Bartelmus, P. (Eds.), *Environmental accounting in theory and practice*. Springer Netherlands, Dordrecht. pp. 245-260.
- Vergara, W., 2010. La ganadería extensiva y el problema agrario. El reto de un modelo de desarrollo rural sustentable para Colombia. *Rev. Cienc. Anim.* (3), 45-53.
- Weber, J.-L., 2007. Implementation of land and ecosystem accounts at the European Environment Agency. *Ecol. Econ.* 61(4), 695-707. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2006.05.023
- Woodwell, G., Hobbie, J., Houghton, R., Melillo, J., Moore, B., Peterson, B., Shaver, G., 1983. Global deforestation: Contribution to atmospheric carbon dioxide. *Science* 222(4628), 1081-1086.
- World Resources Intitute, 2018. Global forest watch. Disponible en: <https://www.globalforestwatch.org/>; consultado: mayo de 2020.

