UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza
Magíster en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza

DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DEL USO Y COBERTURA DEL SUELO EN EL PAISAJE CAFETERO COLOMBIANO.

Proyecto de grado presentado como parte de los requisitos para optar al grado de Magíster en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza.

ALBA LUCIA MARÍN VALENCIA
Ingeniera Forestal

Santiago, Chile
2010

Proyecto de grado presentado como parte de los requisitos para optar al grado de Magíster en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza

Profesor(a) Guía	Nombre:	Dr. JAIME HERNÁNDEZ PALMA
	Nota:	7,0
	Firma:	
Profesor(a) Consejero(a)	Nombre:	Dr. CARLOS MAGNI D.
	Nota:	6,4
	Firma:	
Profesor(a) Consejero(a)	Nombre:	Dr. GUSTAVO CRUZ MADARIAGA
	Nota:	6,5
	Firma:	

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inmensamente a mi familia (Nubia, David y Juan Fernando) por el apoyo permanente, incondicional y lleno de fuerza espiritual (Félix M.) para alcanzar esta gran sueño.

A la Universidad de Chile, la Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, al Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje – GEP – y al profesor Jaime Hernández, por darme la oportunidad y el espacio para adquirir información, prepararme y compartir con personas tan maravillosas.

A Sandra Uribe y el Grupo de Investigación en Sistemática Molecular de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín – GSMUN – por abrirme sus puertas y a todos los integrantes por confiar y sembrar en mi la inquietud por el paisaje y la conservación.

A Carlos Federico A. y Jorge Cano por sus sugerencias, observaciones y correcciones oportunas e incondicionales.

Al profesor Andrés Cardales por su ayuda incondicional y la búsqueda de soluciones en momentos finales y cruciales.

A mis amigos colombianos y chilenos, donde nunca hubo una frontera para la amistad, por su apoyo y alegrías, sin las cuales no habría disfrutado este hermoso país.

A todos aquellos que confiaron en mí y me permitieron vivir experiencias que hicieron de mi estadía en Santiago algo más que un viaje académico.

A la Organización Internacional de Maderas Tropicales – OIMT – por apoyarme económicamente.

Dedicado

A la memoria de mi padre Félix Marín
y a mi hermosa familia, sin ellos este sueño sería imposible de realizar.

El desarrollo del Magister en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza, se realizó con el apoyo de:

El programa de becas de la **Organización Internacional de Maderas Tropicales (*International Tropical Timber Organization*)**

El **Grupo de Investigación en Sistemática Molecular**, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

El **Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje**, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile.

La **Federación Nacional de Cafeteros**, Colombia.

ÍNDICE

1. RESUMEN 1
2. INTRODUCCIÓN 2
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 4
3.1 Dinámica del paisaje: estudio del cambio en el uso y cobertura del suelo 4
3.1.1 Paisajes. 4
3.1.2 Comprensión de los cambios en el paisaje. 5
3.1.3 Patrones y procesos de cambio del paisaje. 6
3.1.4 Sensores remotos y cambio del paisaje. 7
3.2 Estudio de caso: paisajes cafeteros de Colombia, producción vs. conservación 15
3.2.1 Cultivo del café en Colombia. 15
4. OBJETIVOS 21
4.1 Objetivo general 21
4.2 Objetivos específicos 21
5. MATERIALES Y MÉTODOS 21
5.1 Área de estudio 21
5.2 Materiales 22
5.3 Metodología 22
6. RESULTADOS 28
6.1 Identificación del paisaje: Clasificación de las coberturas del suelo en 1986, 1997 y 2007. 28
6.2 Validación de la clasificación. 31
6.3 Estructura del paisaje 1986 – 1997 – 2007. 31
6.4 Caracterización de los cambios y transiciones entre las coberturas durante 1986 y 1997. 35
6.5 Caracterización de los cambios y transiciones entre las coberturas durante 1997 y 2007. 39
6.6 Estimación de la tendencia y escenario futuro en el uso del suelo, al año 2017. 41
7. DISCUSIÓN 46
8. CONCLUSIONES 51
9. BIBLIOGRAFÍA 54
10. ANEXOS 60
11. MAPAS 61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Procesos espaciales. 7
Figura 2. Diagrama de una RNA de tres capas, entrada, ocultas y de salida. Las variables de entrada X_n (cobertura en cada año); Y_n son variables de salida (cobertura esperada a 2017). .. 15
Figura 3. Ubicación zonas productivas de café en Colombia 16
Figura 4. Comportamiento del área cultivada en café según la tecnificación, en Antioquia. 18
Figura 5. Comportamiento del área cultivada en café según exposición al sol, en Antioquia 18
Figura 6. Ubicación área de estudio. 21
Figura 7. Generación del paisaje en celdas vectoriales con la información histórica en cada celda. 25
Figura 8. Información almacenada en cada celda del paisaje. 25
Figura 9. Esquema de regla de vecindad almacenada en cada celda del paisaje. 26
Figura 10. Esquema del proceso de caracterización del cambio y estructura del paisaje, asi como la estimación del paisaje futuro. 27
Figura 11. Resultado de la clasificación supervisada de las imágenes Landsat TM: a) 1986, b) 1997 y c) 2007 30
Figura 12. Tendencia general del cambio en la estructura del paisaje para las Áreas boscosas. a) AC y NP; b)LPI y PAFRAC 33
Figura 13. Tendencia general del cambio en la estructura del paisaje para las Cultivos tradicionales. a) AC y NP; b)LPI y PAFRAC 34
Figura 14. Tendencia general del cambio en la estructura del paisaje para las Cultivos intensivos. a) AC y NP; b) LPI y PAFRAC 34
Figura 15. Diagrama de transición de coberturas 1986 -1997 36
Figura 16. Ubicación espacial de las principales transiciones de Áreas boscosas a las otras coberturas, 1986 - 1997. 37
Figura 18. Diagrama de Probabilidad condicionada de transición de coberturas 1986 -1997 a 2007 38
Figura 19. Diagrama de transición de coberturas 1997 - 2007 40
Figura 20. Ubicación espacial de las transiciones de todas las coberturas a Cultivos tradicionales entre 1997 y 2007 40
Figura 21. Diagrama de Probabilidad condicionada de transición de coberturas 1986 - 1997-2007 a 2017 42
Figura 22. Paisaje estimado al año 2017 43
Figura 23. Mapa de transiciones de Áreas boscosas a las otras coberturas entre 2007 y 2017 45
Figura 24. Mapa de permanencia de la clase Áreas boscosas a las otras coberturas entre 1986 y 2017 46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Área cultivada con café según nivel de tecnificación - septiembre de 2009 18
Tabla 2. Métricas del paisaje para los años 1986 y 1997. 32
Tabla 3. Métricas del paisaje para los años 1986 y 1997. 32
Tabla 4. Matriz de transición por área entre 1986 y 1997. 35
Tabla 5. Matriz de transición por porcentaje entre 1986 y 1997. 35
Tabla 6. Matriz de probabilidades condicionadas de transición para el año 2007 38
Tabla 7. Matriz de transición por área entre 1997 y 2007. 39
Tabla 8. Matriz de transición por porcentaje entre 1997 y 2007. 39
Tabla 9. Matriz de probabilidades condicionadas de transición para el año 2017 41
Tabla 10. Estructura del paisaje en 2017 43
Tabla 11. Matriz de transición por área entre 1997 y 2007. 44
Tabla 12. Matriz de transición por porcentaje entre 2007 y 2017. 44

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Áreas naturales y de conservación en el Suroeste de Antioquia, a. Farallones de Citará, b. Cerros Tusa y Bravo. 20
Fotografía 2. a. y **b**. Áreas boscosas; **c.** Cultivos tradicionales, **d.** cultivos intensivos; **e.** Áreas sin vegetación, zonas urbanas y **f.** Coberturas de pastizales 29

1. RESUMEN

Se analizó el cambio del paisaje basado en el uso y cobertura del suelo, en la cuenca hidrográfica del río San Juan, suroeste del departamento de Antioquia, Colombia. Se clasificaron imágenes satelitales Landsat TM de 1986, 1996 y 2007 en las coberturas: *Áreas boscosas, Cultivos tradicionales, Cultivos intensivos, Pastos y Áreas sin vegetación*.

Mediante una comparación bi-temporal de la composición y la estructura del paisaje, se determinaron los cambios y transiciones entre las coberturas. Se encontró que el paisaje entre 1986 y 2007 tuvo una tendencia a la homogenización de las coberturas por la disminución del número de parches y el aumento de la dominancia de *Áreas boscosas* en la parte alta de la cuenca, *Cultivos tradicionales* en la parte media y *Pastos* en la parte baja. Las *áreas boscosas*, tienden a la fragmentación por pérdida área total, de parches y aislamiento por conversión a generalmente a *cultivos tradicionales*, mientras que los *Cultivos intensivos* por su dinámica y rotación, presentan ganancias y pérdidas de área por *Pastos* y *Cultivos tradicionales* respectivamente.

Se estimó un paisaje para el año 2017, que aún bajo un escenario de conservación, demuestra la pérdida de áreas boscosas y el incremento en los usos productivos. Se logró identificar espacialmente los fragmentos de bosques que permanecerían y deberían ser objeto de conservación para generar las redes ecológicas que conecten las vertientes.

Palabras clave: *Cobertura del suelo, Dinámica espacio-temporal, Landsat TM, Procesos de Markov*

ABSTRACT

We analyzed the change in the landscape based on soil use and coverage in the watershed of the San Juan River, southwest of Antioquia department, Colombia. In order to do this, we classified satellite Landsat TM images from years 1986, 1996 and 2007 on the following covers: *Wooded areas, Traditional crops, Intensive cropping, Pastures* and *Areas without vegetation*.

Using a bi-temporal comparison of the composition and structure of the landscape on each date, we determined the changes and transitions between the covers. We found that the landscape between 1986 and 2007 had a trend towards the homogenization of the coverage by lower patches and increasing dominance both in *Wooded areas* in the upper basin, as well as for *Traditional crops* in the middle and *Pastures* on the bottom of the basin. *Wooded areas* tend to fragmentation by loss of total area, of patches and isolation by conversion usually to *traditional crops*, while *Intensive cropping,* due to its dynamics, show area gains and losses by *Pastures* and *Traditional crops* respectively.

We projected a landscape to the year 2017, which even under conservation scenario shows the loss of wooded areas and increased productive uses. We spatially identified fragments of forests that should and must remain object of conservation to build ecological networks that connect the strands.

Keywords*: Land Cover, Landscape change, Landsat TM, Markov Processes*

2. INTRODUCCIÓN

La expansión agrícola es un caso particular de los frecuentes cambios producidos por la sociedad en el uso del suelo o en el tipo de aprovechamiento que se realizan sobre los ecosistemas terrestres. Esta expansión influye sobre el clima, los ciclos del agua, el carbono y el nitrógeno en la biosfera y las emisiones de gases causantes del efecto invernadero, así como en la biodiversidad, por lo tanto, sus consecuencias exceden el ámbito local o regional. Al mismo tiempo, ante una demanda creciente de recursos del suelo y el aumento de la superficie agrícola, el cambio aparece como un proceso necesario e inevitable y la mayoría de las veces no es planificado (Philpott y Dietsch, 2003; Guhl, 2004; Koomen *et al.,* 2007).

Actividades como la deforestación, el establecimiento y aumento de tierras agrícolas y la construcción de obras civiles, transforman los hábitats naturales, caracterizados por su complejidad y diversidad, en hábitats homogéneos y degradados para la mayoría de la vida silvestre (Turner *et al.,* 2001). La forma en que la sociedad hace uso del suelo y modifica las coberturas naturales en zonas agrícolas, contribuye a establecer los patrones y procesos del paisaje que lo caracterizan en un momento determinado. Estas áreas generalmente están asociadas a un mayor interés económico, y por lo tanto, presentan mayor presión para que exista el cambio (Nagendra *et al.,* 2004).

La región andina colombiana abarca una extensión equivalente a una cuarta parte de la extensión total del territorio del país y no es ajena a este proceso de cambio. Las tres cordilleras que atraviesan el territorio colombiano, dan origen a un sinnúmero de paisajes y climas, que contienen una gran variedad de ecosistemas y elementos de la biodiversidad del país y del mundo (IAvH, 2008). En la actualidad, cerca del 70% de la población de Colombia tiene asentamiento sobre esta región, las actividades productivas desarrolladas han transformado el 63% de los ecosistemas originales y aún generan presiones permanentes sobre la biodiversidad a través del cambio y aumento de las tierras para uso agrícola, la sobre-explotación de los recursos naturales, la contaminación y la introducción de especies exóticas (IAvH, 2008; Sanchez *et al.,* 2008).

En Colombia la historia del cultivo de café tiene más de 80 años de antigüedad y se realiza principalmente en la región andina. El cambio del paisaje en estas zonas puede describirse como el resultado de la intensificación en la producción de café, donde la variación en la estructura del paisaje es mayor en las áreas con sistemas de producción tecnificada que en aquellas con sistemas tradicionales o de café bajo sombra, originando procesos dinámicos dentro de los cuales la fragmentación es uno de los más evidentes (Guhl, 2004).

El suroeste del departamento de Antioquia (Colombia), es una zona reconocida por su importancia histórica, social, económica, geográfica y ambiental en el desarrollo de la región. El cultivo del café ha sido por varias décadas la principal fuente en la economía de la región teniendo como consecuencia que las principales coberturas vegetales de la zona sean cultivos de café bajo sombrío y a libre exposición (Marín, 2005). También son abundantes las zonas de pastizales, principalmente en zonas bajas y planas, y pequeños relictos de bosque asociados a las cimas de las montañas. Se destaca la existencia de áreas protegidas como las reservas forestales de "La Cuchilla Jardín-Támesis" y los "Farallones del Citará", grandes masas boscosas que forman parte del corredor biológico del Chocó biogeográfico (CORANTIOQUIA, 2004; CORANTIOQUIA, 2008).

Los paisajes del suroeste antioqueño son caracterizados por su diversidad biológica y el endemismo de algunas especies de interés para los actores productivos y ambientales, debido al peligro de desaparición, aislamiento, pérdida de hábitat y la disminución de las coberturas naturales. Algunas especies se encuentran en peligro o amenaza de extinción como es el caso del loro orejiamarillo (*Ognorhynchus icterotis)* el cual se encuentra en peligro critico, así como su sitio de nidificación la palma de cera *(Ceroxylon spp.)*, el oso de anteojos (*Tremarctos ornatus*), la danta de páramo (*Tapirus pinchaque*) y el puma (*Puma concolor*), entre otras especies amenazadas, tanto de fauna como de flora según la UICN (*Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza*) y TNC (*The Nature Conservancy*) (Sanchez *et al* 2008; ProAves, 2009).

En Colombia, los trabajos que involucran el análisis multitemporal del paisaje cafetero son escasos, destacando el realizado por Guhl (2004) quien describe los cambios asociados al proceso de intensificación de la producción cafetera entre 1970 y 1997, usando la información de los censos cafeteros realizados por la Federación Nacional de Cafeteros, análisis espaciales (SIG), técnicas estadísticas como *cluster analysis* y tablas de contingencia. Se considera que existe una carencia en estudios sobre la dinámica del paisaje a nivel de cuenca, que den cuenta del estado actual de permanencia y conectividad de las zonas boscosas, así como de su relación con los procesos de cultivo intensivo del café, además de la integración de esta información con elementos concretos para propuestas de manejo y conservación de la biodiversidad.

Para la estimación y modelación de los cambios en coberturas vegetales y usos del suelo, la metodología más empleada es la comparación bi-temporal de imágenes clasificadas en diferentes categorías (coberturas). Esta metodología permite saber sí el paisaje está

cambiando y qué está cambiando, no requiere pre-procesos complejos de modelación y la precisión de la detección del cambio va a estar sujeta a la calidad del proceso de clasificación. (Sui *et al.,* 2008).

Por lo anterior, esta metodología se convierte en una herramienta práctica para la detección de cambios en coberturas y fue utilizada en el presente estudio en el cual se calculó el cambio en la cobertura del suelo con énfasis en los relictos de bosque en una zona del suroeste del departamento de Antioquia (Colombia), además de identificar esta dinámica del paisaje, se estimó un futuro escenario que aporta elementos de base para el manejo y conservación de los bosques, de acuerdo a su estado de permanencia o conservación y a su conectividad estructural como apoyo a las estrategias de conservación en estos paisajes.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Dinámica del paisaje: estudio del cambio en el uso y cobertura del suelo

3.1.1 Paisajes.

Las actividades humanas, el crecimiento y desarrollo de sus poblaciones, las interacciones en y entre las comunidades y el funcionamiento de los ecosistemas, ocurren en unidades espaciales denominadas genéricamente paisajes. Éstas presentan diferencias en estructura y composición, en las cuales ocurren interacciones a múltiples niveles que influyen de manera diferencial en el desarrollo y evolución de las especies. El paisaje influencia y a su vez es influenciado por eventos a diversas escalas, por ejemplo desde lo que sucede a nivel microscópico en las comunidades bacterianas relacionadas con la circulación de nutrientes en los hábitats naturales, hasta procesos de colonización de los agroecosistemas por insectos y por eventos evolutivos asociados a las restricciones del flujo de genes en plantas y animales silvestres o explotados por el hombre (Turner *et al.,* 2001).

Si bien, desde 1930 se llevaron a cabo estudios con relación al paisaje, sólo a partir de la década de los 80's la literatura europea y norteamericana incluyó los primeros conceptos sobre la ecología del paisaje (Bunce y Jongman, 1993; Turner *et al*., 2001; Wiens, 1999).

Forman y Godron (1981) consideraron al paisaje como una unidad espacial con diversas características ecológicas diferenciables y medibles. Posteriormente Pickett y Cadenasso (1995) determinaron dos formas de abordar el paisaje en la ecología. La primera, desde una perspectiva más antrópica, considera el paisaje como un área específica de sistemas ecológicos que comprenden elementos tanto naturales como manejados por el hombre. La segunda, se refiere a una abstracción de terreno que representa la heterogeneidad espacial en

cualquier escala, el paisaje se entiende como un criterio ecológico para una aproximación espacial a un ecosistema particular.

Diversos autores, con base en los conceptos anteriores, han propuesto definiciones alternativas y/o complementarias de paisaje. Por ejemplo, Turner *et al.* (2001), consideran el paisaje como un área espacialmente heterogénea en al menos un factor de interés, Gilmour (2005) y McGarigal (2002) enfatizan que el paisaje no se define necesariamente por su tamaño, sino por un mosaico de fragmentos o parches de diferentes componentes en interacción continua. Además, consideran que la composición de este mosaico y la distribución específica de sus componentes son exclusivas de cada paisaje.

Los conceptos de paisaje abordados por la ecología, difieren en la escala de trabajo y en el enfoque del estudio de la dinámica de sus elementos, ya que, ecológicamente la estructura de un paisaje está medida por la distribución de energía, nutrientes y especies en relación con el número, las clases y la configuración de los elementos (Forman y Godron, 1981).

Aunque, generalmente se identifica como una subdisciplina entre la geografía y la ecología, la ecología del paisaje involucra la heterogeneidad espacial en el estudio de los procesos ecológicos, al enfocarse en los principios relacionados con la estructura, la función y el cambio en el paisaje y su aplicación en la formulación y solución de problemas ambientales. Se asume que la composición y disposición espacial de los elementos que constituyen un mosaico de paisaje, moldean y afectan los ecosistemas de forma diferencial (Bastian, 2001; Turner *et al.,* 2001; Wiens, 1999). Además, en muchos casos el proceso fundamental que caracteriza esta heterogeneidad y que es la escena formadora, incluye al hombre y su actividad, como un cambio dinámico entre factores naturales y humanos.

3.1.2 Comprensión de los cambios en el paisaje.

La intensidad de uso de la tierra y cambio constante de su cobertura se han identificado como uno de los principales determinantes del cambio global, procesos naturales como el vulcanismo, el fuego, las inundaciones, entre otros, generan cambios “naturales” en el paisaje, sin embargo, los cambios ocasionados por el hombre como la conversión de coberturas del suelo es la causa más importante en la perdida y fragmentación de hábitats reduciendo así los niveles de biodiversidad (Lindenmayer y Fischer, 2006).

La integración de los sistemas de información geográfica, los métodos y las teorías en la manipulación de información a partir de sensores remotos, análisis ecológicos y aspectos socioeconómicos son utilizados generalmente para estudiar el comportamiento del cambio en el

paisaje y relacionar el patrón espacial con los procesos de uso de la tierra (Nagendra *et al.,* 2004). Sepp y Bastian (2007), presentan una variedad de enfoques metodológicos que han sido aplicados con éxito en estudios de los cambios en el paisaje en distintas partes del mundo, estos enfatizan en el análisis sobre las clases de coberturas y métricas del paisaje, teniendo en cuenta una adecuada comprensión de cómo es la respuesta a los procesos moldeadores del paisaje (Oslen *et al.,* 2007).

Verburg *et al.* (2009), establecen que uno de los principales desafíos en el estudio, seguimiento y modelación del cambio en el paisaje es establecer la relación entre la cobertura y uso de la tierra y la provisión de bienes y servicios, es decir, la funcionalidad de la tierra estrechamente relacionada con la cobertura del suelo, así, un cambio en la funcionalidad no es sólo el resultado de cambio en la cobertura sino un factor impulsor importante de la dinámica futura de la propia cobertura. Bürgi y Russell (2001), integran metodologías y conocimientos de la historia y la ecología, definen a los períodos de cambio en la historia como las “categorías de interfase”, y a quienes demandan el cambio como los “actores”, y la comparación de los cambios con las diferentes actividades humanas define el potencial impacto en las formas ambientales.

Así, el cambio en el uso y cobertura del suelo es el resultado de la compleja interacción de factores socioeconómicos, culturales y biofísicos que actúan a diferentes escalas espaciales y temporales, tal que, para su estudio, se requiere un análisis multidisciplinario que permita comprender estos procesos de transformación de paisajes guiados por sucesos que lo hacen un entorno dinámico en el tiempo y en espacio (Guhl, 2004; Nagendra *et al.,* 2004; Turner II *et al.,* 2007). Por lo general, los cambios no son unidireccionales ni continuos, pero exhiben patrones y “caminos” que comúnmente están guiados por la acción antrópica, así, analizar los cambios en los patrones de la cubierta vegetal en el tiempo tiene como objetivo describir cómo las actividades humanas han afectado un área (Lindenmayer y Fischer, 2006).

3.1.3 Patrones y procesos de cambio del paisaje.

El aumento en áreas destinadas a la agricultura y la urbanización son algunas de las principales razones por las cuales existe un cambio en el paisaje y estos patrones se repiten en un sinnúmero de lugares del mundo (Lindenmayer y Fischer, 2006). Estas áreas generalmente están asociadas a un mayor interés económico y por lo tanto, presentan mayor presión en el cambio (Turner *et al.,* 2001; Nagendra *et al.,* 2004).

Algunos autores han distinguido ciertos patrones o formas de cambio como es el caso de Forman (1995), quien describe el cambio por procesos de disección, perforación,

fragmentación, reducción y eliminación gradual de la superficies; adicionalmente, McIntyre y Hobs (1999), exponen que la modificación hecha por el hombre se incrementa gradualmente, iniciando con un ambiente intacto, luego alterado, fragmentado y finalmente quedando sólo algunos relictos de la cobertura original. Estos procesos raramente son aleatorios, principalmente porque la distribución espacial de la vegetación refleja una heterogeneidad espacial en la productividad del paisaje limitadas por factores topográficos y ambientales, así como por fuerzas socioeconómicas (Lindenmayer y Fischer, 2006).

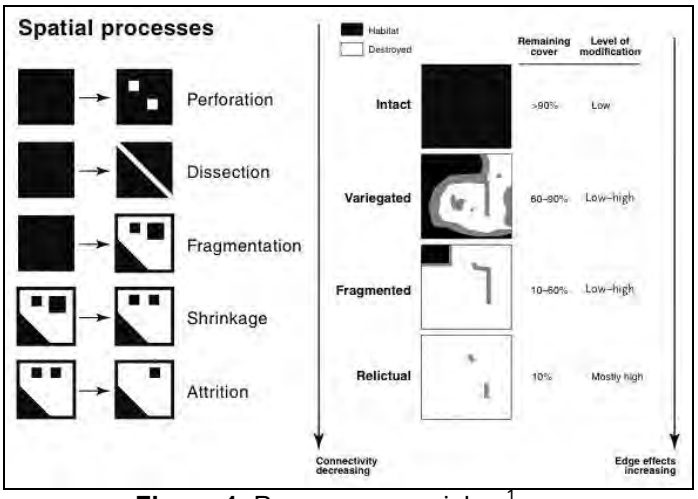


Figura 1. Procesos espaciales.[1]

Lindenmayer y Fischer (2006) proponen la utilización de modelos conceptuales que consideren la percepción de las especies o la percepción del ser humano, con el fin de entender los procesos ecológicos. Modelos del paisaje basados en especies, permiten conceptualizar la distribución particular estas pero imposibilitan el estudio y la asociación de los procesos sobre todas las especies, mientras que “modelos de isla” o modelos “parche-corredor-matriz” generalmente se enfocan en respuestas a patrones predeterminados de la cobertura vegetal.

3.1.4 Sensores remotos y cambio del paisaje.

La teledetección espacial es la técnica que permite adquirir imágenes de un objeto o escena de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas aéreas o espaciales (sensores remotos). La base de los procesos de teledetección se encuentra en las características de las interacciones entre la energía incidente sobre la tierra y la forma como ésta es reflejada, ya sea por reflexión de la luz solar o por un haz energético artificial. El análisis

[1] Tomado de Lindenmayer y Fischer, 2006

de estas interacciones determina en gran medida la capacidad de interpretar estados, estructuras y cambios de la superficie terrestre (Chuvieco, 2000; Melo y Camacho, 2005).

La teledetección como ciencia aplicada y dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento ha presentado cambios acelerados, siendo las guerras mundiales los eventos impulsores. El proyecto LANDSAT 1 fue pionero en 1972, con el lanzamiento del satélite ERTS (*Earth Resources Tecnollogy Satallite*) que estuvo operando hasta principios de 1978. El último de la serie, LANDSAT 7 se lanzó al espacio el 15 de abril de 1999. A partir de este ejemplo, comenzaron a desarrollarse otros proyectos de observación terrestre y son numerosos los países que han dispuesto de medios propios de teledetección: Entre ellos destacan los satélites SPOT de Francia, RADARSAT de Canadá, el MOS de Japón, el IRS de la India y el ERS de la Agencia Espacial Europea.

Los datos provenientes de sensores remotos constituyen un aporte fundamental a la ecología del paisaje, ya que permiten estimar patrones y medir procesos a una escala ecológica amplia en forma directa. Esta información es una herramienta para estudios sobre las características superficiales del terreno, como son la tipificación de ambientes, de vegetación y la descripción del uso de la tierra (Teillet *et al.,* 1997; Guichón *et al.,* 1999; Chuvieco, 2000; Turner *et al.,* 2001).

a. Extracción de la información y clasificación de las imágenes.

Existen diversas formas de extraer la información que contienen los productos de los sensores remotos, la más común se realiza por medio de la clasificación supervisada desarrollada bajo el método de Máxima Verosimilitud (*Maximum Likelihood*), regla de decisión paramétrica basada en la probabilidad que un pixel pertenezca a una clase particular. Así, la ecuación básica asume que estas probabilidades son iguales para todas las clases y que la información de entrada (contenida en cada banda) tienen una distribución normal, considerado como el método clasificador más usado y robusto en teledetección (ERDAS 2002; IDRISI 2006)

Esta interpretación y evaluación visual pretende extraer información espacial a partir del análisis de la imagen y sus cualidades como (Pérez y Muñoz, 2006; Campbell, 2007):

a) *El brillo*, referido al tono relativo de los objetos o la cantidad de energía reflejada por estos.

b) *El color*, característica a la cual el ojo humano es más sensible a las variaciones cromáticas frente a las variaciones de intensidad luminosa; es una característica importante en la interpretación visual de imágenes debido a la posibilidad de combinar diferentes bandas del espectro.

c) *La textura*, cualidad referida a la frecuencia con la que suceden los cambios tonales, es decir, el contraste espacial entre los elementos que se evidencia por la agregación de rasgos unitarios, esta característica se relaciona con la rugosidad de la superficie y se considera clave para la diferenciación de las coberturas.

d) *La forma*, se refiere a la característica bidimensional y tridimensional de los elementos en la imagen.

e) *El tamaño*, relativo de cada elemento y es considerado de acuerdo a la resolución espacial y la escala a la cual es desplegada la imagen.

f) *El patrón,* se refiere a la distribución de los elementos y la repetición de formas en áreas determinadas.

g) *Las sombras,* evidencian las formas del relieve y es una característica dependiente de la hora y fecha de adquisición de la imagen, lo que genera errores en la identificación de las anteriores características.

Además, como información de apoyo a los criterios de clasificación se determinan índices que realzan características de la superficie, como el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), es un parámetro calculado a partir de los valores de la reflectividad a distintas longitudes de onda (rojo e infra-rojo cercano), es decir, la diferencia normalizada de las dos bandas y cuyo rango de variación está comprendido entre -1 y 1, donde los números positivos corresponden a zonas con vegetación y mayor productividad primaria. De estos valores se obtiene información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia del suelo y las condiciones atmosféricas (Jensen, 1996; Gilabert *et al.,* 1997; Teillet *et al.,* 1997; Chuvieco, 2000).

$$\boxed{NDVI = \frac{NDirc - NDr}{NDirc + NDr}}$$

NDirc corresponde a los Niveles Digitales en la banda del Infra-rojo Cercano y *NDr* a los Niveles Digitales en la banda del Rojo. El NDVI fue calculado para cada imagen con el fin de resaltar las coberturas vegetales dado que éstas presentan contrastes más altos en las bandas rojo e infrarrojo cercano.

b. Análisis del paisaje.

Obtenida la información básica y temática de la superficie terrestre es posible realizar análisis particulares del paisaje. Este análisis consta de un conjunto de métricas de *composición*

(como el área, la cantidad, la densidad) y de *configuración* (indica la distribución y el grado de conectividad o aislamiento) de los elementos que constituyen un paisaje, es lo que se denomina patrón del paisaje y su cuantificación es uno de los requisitos básicos en el análisis de la heterogeneidad, el cambio y la relación con procesos ecológicos en el paisaje. Para el cálculo de estos índices y métricas están disponibles un sinnúmero de paquetes computacionales que operan fuera o dentro de software SIG (Turner *et al.,* 2001; McGarigal, 2002).

La estructura general del paisaje se describe por índices básicos de composición y estructura, los utilizados en este estudio (McGarigal, 2002):

- *Área de clase o cobertura (AC) y su porcentaje en el paisaje (PLAND)*. Son medidas de la composición del paisaje, la primera cuantifica las hectáreas ocupadas por cada clase de cobertura, su valor es interpretado directamente y es insumo de muchas otras métricas. La segunda cuantifica la abundancia de cada tipo de cobertura en el paisaje, es una medida relativa y permite comparar fácilmente diferentes paisajes.
- *Número de parches (NP) y la densidad de parches (DP)*. Estas métricas cuantifican la subdivisión o fragmentación de una clase, su limitación está dada por la escala y resolución de análisis, la primera cuantifica la cantidad de fragmentos de cada cobertura, mientras que la densidad calcula el número de parche por km^2. Ésta facilita la comparación entre paisajes de diferentes áreas pero puede ser redundante con el número de parches.
- *Índice de forma del paisaje (LPI)*. Permite cuantificar el área ocupada por el parche más grande de cada cobertura, a la vez que estima la dominancia y conectancia de las coberturas.
- *Relación perímetro-área con base en la dimensión fractal (PAFRAC)*. Corresponde a un índice de forma basado en la relación que existe entre el perímetro y el área de los parches. Permite estimar la complejidad de la forma del paisaje a partir de los tamaños de los parches de cada cobertura.

c. Identificación de cambios.

La detección de cambios en el paisaje se refiere a la identificación de diferencias en el estado de éste observado en dos tiempos diferentes, siendo el punto inicial para comprender los factores y procesos de los cambios en la superficie de la tierra. Un acercamiento a los sucesos de transformación del paisaje por medio del análisis del cambio en el uso y cobertura del suelo, incluye la descripción de cuáles coberturas han cambiado, cuándo y dónde han ocurrido dichos cambios. Al conocer los patrones espaciales y temporales de cambio en el

paisaje, es posible integrarlos con variables ambientales y socioeconómicas que den una idea sobre la evolución del mismo, sus tendencias y estimación de escenarios futuros (Koomen y Stillwell, 2007; Turner *et al.,* 2007; Sui *et al.,* 2008; Long *et al.,* 2009).

Así mismo, existen diversas técnicas que varían de acuerdo al propósito del estudio, es decir, qué se pretende saber: ¿El paisaje está cambiando?, ¿Qué está cambiando? y ¿Cuánto está cambiando?. También de acuerdo a los datos disponibles para la comparación ya sean imágenes o mapas temáticos, la escala temporal (tiempo real o no real de los datos disponibles), el contenido de los cambios detectados (temáticos o geométricos) y su dimensión ya sea en 2D ó 3D. Este tipo de análisis requiere una buena selección de los datos y realizar algunos pre-procesos como correcciones geométricas y correcciones radiométricas para disminuir las inconsistencias entre datos de diversos sensores (Sui *et al.,* 2008).

Se identifican dos grandes metodologías para el análisis de cambios, el análisis bi-temporal y el uso de trayectorias de tiempo o series de tiempo. El método bi-temporal incluye los algoritmos de detección que están referidos a aproximaciones directas entre las distintas fuentes (comparación directa), comparaciones post-análisis desde imágenes clasificadas y la integración de todos los datos en un modelo. En cuanto a la metodología de trayectorias de tiempo, el análisis dispone de series de tiempo para identificar tendencias del cambio (Sui *et al.,* 2008).

Para la estimación y modelación de los cambios en las coberturas vegetales y usos del suelo, la metodología más empleada es la comparación bi-temporal de imágenes clasificadas en diferentes categorías. Esta metodología permite saber si el paisaje está cambiando y qué está cambiando, no requiere pre-procesos complejos, por otra parte la precisión de la detección del cambio va a estar sujeta a la calidad del proceso de clasificación (Sui *et al*., 2008).

d. Identificación de paisaje futuro

Los mapas de cobertura en cada año e información de los cambios identificados, son el insumo para la estimación de la tendencia del paisaje y la generación de un escenario futuro. Para este proceso existen algunas herramientas de modelación, basadas en principios económicos, interacciones espaciales, métodos de autómata celular, redes neuronales artificiales, análisis estadísticos, técnicas de optimización, simulaciones basadas en reglas de decisión, modelos multi-actores y micro-simulación (a nivel de individuo o actor que influencia el cambio). Cada metodología presenta sus limitaciones y son utilizadas de acuerdo a objetivos particulares (Koomen y Stillwell, 2007).

Los métodos más empleados son aquellos basados en autómatas celulares, redes neuronales artificiales y análisis estadístico. El análisis de Cadena de Markov (CM) es un proceso estocástico utilizado para modelar cambios en el tiempo y obtener representaciones de tendencias futuras para un punto dado en el tiempo. Se basa en las características de la dinámica interna del sistema, sin tener en cuenta variables explicativas y descriptivas. Considera que el estado de un sistema en el tiempo t_1 puede ser predicho por el estado del sistema en los tiempos t_{-1} y t_0 (ERDAS, 2002; IDRISI, 2006).

La CM representa un sistema que varía su estado a lo largo del tiempo, siendo cada cambio una transición del sistema. Estos cambios no están predeterminados, aunque sí lo está la probabilidad del próximo estado en función de los estados anteriores, probabilidad que es constante en el tiempo. En algunos casos en una transición el nuevo estado puede ser el mismo que el anterior y que exista la posibilidad de influir en las probabilidades de transición actuando sobre el sistema (Aaviksoo, 1995; Liu *et al.,* 2008).

Para definir una CM finita, es necesario (Aaviksoo, 1995; Sarabia, 1996):

- Un conjunto de *estados* del sistema. Son la caracterización (cualitativa y/o cuantitativa) de la situación en que se halla el sistema en un instante dado, siendo mutuamente excluyente.
- Definir el ciclo de Markov ("paso"). Período de tiempo que sirve de base para examinar las transiciones entre estados (ejemplo, un mes, un año).
- Definir la *transición* del sistema. Cambio sufrido por el *estado* en dos temporalidades modelado por la cadena.
- Definir una *ley de probabilidad condicional*. Define la probabilidad del nuevo estado en función de las anteriores.

Consideremos a $E_1, E_2 \ldots, E_k,$ los estados mutuamente excluyentes de un experimento aleatorio en cualquier tiempo. Inicialmente en el tiempo t_0, el sistema puede estar en cualquiera de estos estados. Sea a_{0j} (j = 0, 1,..., k) la probabilidad absoluta de que el sistema se encuentre en el estado E_j en t_0. Se define p_{ij} como la probabilidad de transición de un paso de ir al estado i en t_{n-1}, al estado j en t_n, es decir, la probabilidad de que en el siguiente período (paso) se encuentre en E_j, dado que en el período inmediatamente anterior estuvo en E_i. Supongamos que estas probabilidades son estacionarias (no cambian) a través del tiempo. Las probabilidades de transición del estado E_i al estado E_j se describen forma matricial así:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & \cdots & p_{1k} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & \cdots & p_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{k1} & p_{k2} & p_{k3} & \cdots & p_{kk} \end{bmatrix}$$

Por ejemplo p_{23} es la probabilidad de estar en el estado *3* en el siguiente paso, dado que en este momento se encuentra en el estado *2*. Se debe cumplir que:

$$\sum_{j}^{k} p_{ij}=1, \text{ para toda } i \quad \text{y} \quad p_{ij} \geq 0, \text{ para toda } i \text{ e } j.$$

Nos interesa conocer la probabilidad de que ocurra E_j en la transición *n*, dados $\{a_{0j}\}$ y *P* de una CM. Estas se conocen como las probabilidades absolutas del sistema después de un número específico de *n* transiciones. Se llaman $\{a_{nj}\}$ a estas probabilidades absolutas después de *n* transiciones. La expresión general de $\{a_{nj}\}$ en términos de $\{a_{0j}\}$ y *P* se puede calcular de la siguiente manera:

$$a_j^{(1)}=a_1(0)p_{1j}+a_2(0)p_{2j}+a_3(0)p_{3j}+\ldots=\sum_i a_i^0 p_{ij} \quad \text{y} \quad a_j^{(2)}=\sum_i a_i^{(1)}p_{ij}\sum_i\left(\sum_k a_k^{(0)}p_{ki}\right)p_{ij}=\sum_k a_k^0\left(\sum_i p_{ki}p_{ij}\right)=\sum_k a_k^{(0)}p_{kj}^{(2)}$$

Donde $p^{(2)}_{kj} = \Sigma p_{ki}p_{ij}$ es la probabilidad de transición de dos pasos o de segundo orden, es decir, la probabilidad de ir del estado *k* al estado *j* en exactamente dos transiciones.

Por inducción se puede ver que:

$$a_j^{(n)}=\sum_i a_i^{(0)}\left(\sum_i p_{ik}^{(n-1)}p_{kj}\right)=\sum_k a_i^{(0)}p_{ij}^{(n)}$$

Donde p_{ij} es la probabilidad de transición de *n* pasos u orden n dada por la formula recursiva:

$$p_{ij}^{(n)}=\sum_k p_{ik}^{(n-1)}p_{kj}, \text{ en general para todo } i \text{ y } j, \quad p_{ij}=\sum_k p_{ik}^{(n-m)}p_{kj}^{(m)}, \quad 0<m<n$$

Los elementos de una matriz de transición mas alta $p^{(n)}_{ij}$ se obtienen de forma directa por *multiplicación matricial*. Así:

$$P^2=P\cdot P, \quad P^3=P^{(2)}\cdot P=P^2\cdot P=P^3, \quad \text{y en general} \quad P^{(n)}=P^{(n-1)}\cdot P=P^{n-1}\cdot P=P^n$$

Como resultados se obtiene: una matriz de probabilidades condicionadas o de transición entre todas las clases que indica la probabilidad de que un pixel de una clase dada cambie a otra clase o se mantenga en la misma para el período siguiente (probabilidades espacialmente

condicionadas); una *matriz de áreas de transición* que indica el número de píxeles o su equivalente en área que pueden cambiar y un *conjunto de mapas de probabilidad* condicional (0-1) para cada una de las categorías en el tiempo t_1, como proyección desde t_0. Para ello se tiene en cuenta el número de unidades temporales (años, que definen el número de iteraciones) transcurridos entre t_{-1} y t_0, y entre ésta última fecha y la que se pretende modelar (t_1), asumiendo una evolución lineal (ERDAS, 2002; IDRISI, 2006; Peña *et al.,* 2007).

Particularmente, las matrices de transición dadas por las cadenas de Markov, asumiendo los supuestos en el ámbito ambiental y territorial, son generalmente utilizadas para estudiar y simular el crecimiento urbano (Sun *et al.,* 2007; López *et al.,* 2001), la tasa de deforestación y cambios en el uso del suelo (Bermúdez *et al*., 2000; Briceño, 2005; Flamenco-Sandoval *et al.,* 2007) toma de decisiones y manejo de recursos naturales (Williams, 2009) entre otras aplicaciones, estos autores resaltan la utilidad y validez del método probabilístico para el análisis de cambios y la toma de decisiones.

Con base en los anteriores productos y sus combinaciones mediante el diseño de redes Neuronales Artificiales (RNA) es posible espacializar el paisaje futuro esperado. Esta metodología que consiste en algoritmos con elementos simples de entrada, llamadas neuronas y conexiones que operan en paralelo. Dos o más neuronas pueden ser combinadas en varias capas, que a su vez conforman una red. La arquitectura de la red neuronal está conformada por tres capas o layers, así: capas de entrada, capas ocultas y capas de salida. Las capas ocultas no tienen una relación directa con el mundo real, sin embargo, el número de capas ocultas y neuronas requeridas para obtener una aproximación más precisa no se pueden establecer. La neurona es un elemento de transformación, cuya producción es resultante de multiplicar la señal de entrada por un peso. Cada neurona suma la información de la capa inferior y se aplica con una función de transferencia para obtener una capa de salida.

La arquitectura más común es la red multicapa feed-forward neural o perceptrón multicapa (MLP), que se basa en el procedimiento supervisado, es decir, la red construye un modelo basado en ejemplos de datos con salidas conocidas. Permite la predicción de un objeto de salida para un objeto de entrada determinado o un conjunto de objetos de entrada.

La arquitectura de la MLP es una red de capas neuronales, en la que los elementos no lineales (neuronas) se disponen en capas sucesivas, y los flujos de información son unidireccionales, desde la capa de entrada a la capa de salida, a través de la capa oculta. Cuando la red se ejecuta, los valores de la variable de entrada se colocan en las unidades de entrada, y luego en las unidades ocultas y progresivamente a la capa ejecutada de salida. Cada

uno de ellos calcula su valor de activación mediante la adopción de la suma ponderada de las salidas de las unidades en la capa anterior. El valor de activación se transmite a través de la función de activación para producir los resultados de la neurona. Cuando toda la red se ha ejecutado, los resultados se entregan en la capa de salida como el resultado de toda la red (Ver figura 2).

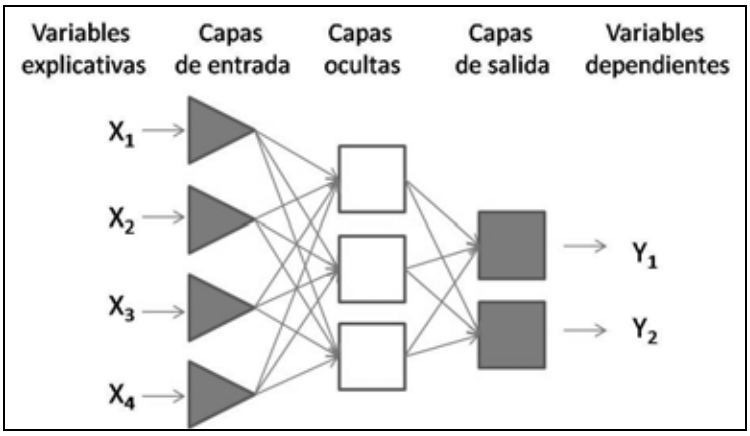


Figura 2. Diagrama de una RNA de tres capas, entrada, ocultas y de salida. Las variables de entrada X_n (es decir, cobertura en cada año); Y_n son variables de salida (es decir, la cobertura esperada en x años).

3.2 Estudio de caso: paisajes cafeteros de Colombia, producción vs. conservación

3.2.1 Cultivo del café en Colombia.

Las regiones cafeteras de Colombia se extienden a lo largo del relieve andino en una franja que va desde los 1000 a 2000 m.s.n.m., en la región central y oriental en el cual se encuentran las condiciones climatológicas aptas para el cultivo (Figura 3). En Colombia se tiene que sólo un 24% de toda la zona cafetera esta cultivada en café, (con una predominancia del 33% cultivado al sol, 28% a la semisombra y 39% a la sombra), 34% en pastos, 33% áreas boscosas y el 9% restante en otros cultivos y usos (Baker y Duque, 2007; Osorio y Acevedo, 2008).

Figura 3. Ubicación zonas productivas de café en Colombia. (Fuente: Elaboración propia)

La distribución del cultivo de café sobre el territorio colombiano, aparte de las condiciones climáticas favorables, se debe también al afán por incorporar tierras a la productividad agrícola, a la generación de divisas y la subsistencia de las familias, así, la historia justificó la apertura de áreas boscosas de ladera para destinarlas al cultivo del café en la mayor parte de la zona andina colombiana (Junguito y Pizano, 1991; Vásquez, 1997)

Sin embargo, la forma de cultivo a libre exposición donde no se garantizan medidas de conservación de suelos y aguas, sumada a la ocupación de las cabeceras de las cuencas, las márgenes de los cursos de agua y las zonas escarpadas, es la responsable de la pérdida de recursos boscosos, florísticos y faunísticos de gran importancia, de la erosión y sedimentación hídrica y de la pérdida de la calidad del paisaje en la zona cafetera colombiana (Vásquez, 1997).

a. Un poco de historia: Tipos de cultivo, variedades de café y tecnificación.

Las variedades que se cultivaron en Colombia hasta finales de los años 70 (*Típica de porte alto, Borbón, amarillo Chinchiná, Maragogipe y Mundo Novo*) se establecían en un sistema agrológico que presentaba una fisionomía de tipo boscosa: un estrato denso de cafetos de gran porte superpuesto por un estrato superior de especies arbóreas que le proporcionaba sombrío al cultivo. Con la introducción posterior de la variedad “caturra” proveniente del Brasil y más adelante de la variedad “Colombia”, la tecnología del cultivo varió notablemente en favor de

mayores niveles de productividad, manejo y cosecha, pero en detrimento de las ventajas ambientales que ofrecía el antiguo sistema (Vásquez, 1997; Osorio y Acevedo, 2008).

Las variedades de la especie *Coffea arabica L.* que se cultivan en Colombia, presentan cada una técnicas estandarizadas de cultivo en términos de insumos, densidad de siembra, porcentaje de cobertura con sombra, estas son: Variedad *Típica* y Variedad *Borbón* donde la sombra es un elemento fundamental en la estructura del agroecosistema; Variedad *Caturra*, Variedad *Colombia* y Variedad *Castillo* que frecuentemente se encuentran sembradas a plena exposición solar (Osorio y Acevedo, 2008).

Así, de acuerdo al tipo de cultivo y su correspondiente manejo, las situaciones que afectan la conservación de aguas y suelos, se explican por la exposición más frecuente del suelo a la erosión debido a la eliminación del dosel, el aumento en las actividades de laboreo y el menor tiempo en la renovación de cafetales, situaciones típicas en cultivos intensivos (Baker y Duque, 2007).

b. Dinámica del cultivo con relación a la economía colombiana.

El cultivo de café esta caracterizado por el dinamismo frente a los precios de cotización en los mercados internacionales. Particularmente la gran bonanza de la segunda mitad de los años 70 fue responsable del incremento de aproximadamente el 40% del área cultivada que se presentó en esa década y muchas de las áreas que se incorporaron eran tierras que se debían proteger y conservar: partes altas de las cuencas hidrográficas, reservas de fauna y flora. La ocupación de tales lugares bajo la forma de cultivo a libre exposición, es sin duda el mayor impacto ambiental generado históricamente por la caficultura (Junguito y Pizano, 1991; Osorio y Acevedo, 2008).

Aunque el sistema tecnificado se mantiene y se impulsa por grandes caficultores en algunas regiones del país, existe por el contrario una tendencia a regresar al sistema de sombra particularmente incentivada por las certificaciones con criterios ambientales. Aunque para estos cultivos se estima una disminución en la producción del 10%, en los cultivos a plena exposición solar hay probablemente una mayor incidencia de los problemas relacionados con plagas y enfermedades (Osorio y Acevedo, 2008).

c. Caficultura y otras actividades en el suroeste de Antioquia.

El suroeste antioqueño comprende 24 municipios, en una extensión de 3.956 km^2. Este territorio está en la vertiente oriental de la cordillera Occidental de los Andes al sur occidente del

departamento, es la zona más cafetera del departamento, también se cultiva caña de azúcar, maíz, yuca y plátano y algunas áreas están dedicadas a la ganadería (Rodríguez, 1998).

A principios de siglo XX el sistema de agricultura suplía la canasta familiar, el cultivo de café fue promovido por grandes empresarios. Estos primeros intentos no afectaron significativamente los ecosistemas, ni los recursos naturales, por estar acompañados de vegetación arbórea, aprovechando la sombra y haciendo un beneficio sencillo. En la década del 70, por recomendación de la Federación Nacional de Cafeteros, el cultivo tradicional comenzó a ser reemplazado por el cultivo sin sombrío de alta densidad con altos insumos en fertilizantes sacrificando los ecosistemas naturales y los cafetales tradicionales, como respuesta a una política de producción intensiva y a la ampliación de la demanda por parte del mercado internacional (Osorio y Acevedo 2008).

El desarrollo de la caficultura en la década del 80's le permitió al suroeste ser una de las regiones con mayor nivel de vida del departamento de Antioquia, donde integra algunas áreas potenciales al "café tecnificado". Las últimas estadísticas generadas por La Federación de Cafeteros para algunas regiones del departamento de Antioquia indican un disminución gradual en la superficie destinada a cultivos tradicionales y por el contrario indica un aumento en el área de cultivos tecnificados, tanto que excede en 3,7 (miles de hectáreas) disponibles por la transición entre sistemas de cultivo, es decir, se expande la superficie cultivada en café (CENICAFE). Esto se puede apreciar en la tabla 1 y las figuras 4 y 5.

Tabla 1. Área cultivada con café según nivel de tecnificación - septiembre de 2009

	2007	2008	2009
Tradicional	6,2	5,7	4,8
Tecnificado envejecido	39,5	37,3	32,8
Tecnificado	81,1	86,1	92,9

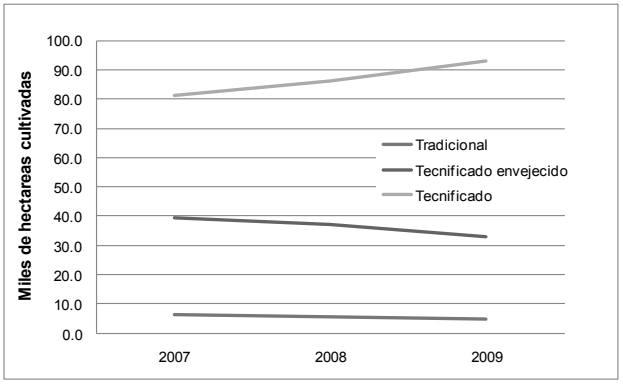


Figura 4. Comportamiento del área cultivada en café según la tecnificación, en Antioquia.

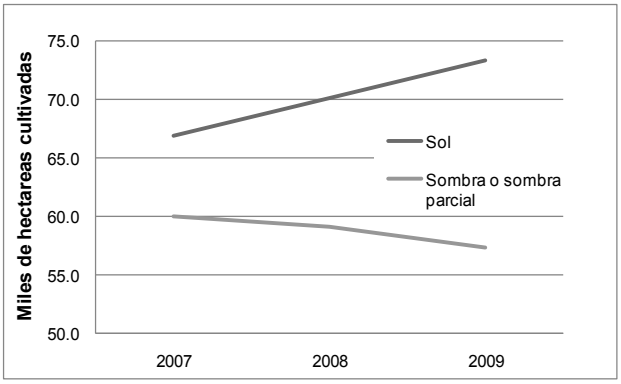


Figura 5. Comportamiento del área cultivada en café según exposición al sol, en Antioquia

Otros productos que se han desarrollado en el cordón cafetero son el resultado de los planes que implementa el Comité de Cafeteros bajo los programas de Diversificación Agropecuaria, promocionando productos básicos, que sustenten la economía familiar. Por su parte, la actividad y producción ganadera, comprende las regiones de vertiente baja y cálida, con valles aluviales, ubicados a lo largo de la ribera del río Cauca y parte media del río San Juan, no se presenta en un cordón continuo, sino dispersa en zonas aledañas a los ríos y quebradas, dando lugar a fragmentos de pastos, que compiten con los cultivos de café y deterioran la ribera de las cuencas dejándolas sin cobertura vegetal.

d. La dimensión ambiental en el suroeste de Antioquia

La desaparición y disminución del recurso agua está relacionada directamente con la pérdida de las coberturas vegetales en las zonas de regulación o recarga hídrica, así como con la pérdida paulatina de las zonas forestales protectoras, las cuales han sido objeto de presión o tala por la ampliación de las fronteras agrícolas y pecuarias. En especial, por la presencia de nuevos cultivos de café, los cuales llegan hasta la ribera de los cauces y se ubican en la zona de bosques primarios y secundarios.

La zona posee en su territorio una franja de bosque altoandino que bordea la cuenca en su parte alta; se destaca la formación natural de los farallones del Citará; luego continúa altitudinalmente la franja cafetera entre la cota de los 1.200 hasta los 1.800 m.s.n.m, hasta llegar a los valles de los ríos Cauca y San Juan, la interacción de factores climáticos, geográficos, fisiográficos y edáficos dan lugar a una alta diversidad en flora y fauna, debido a la gran variedad de condiciones medio ambientales. Los cultivos de café y la potrerización de estas zonas hacen que la vegetación natural se limite a las zonas de protección de áreas de fuerte pendiente y a los retiros sobre las fuentes hídricas.

e. Áreas naturales y de importancia ecología en el suroeste de Antioquia.

Se destaca la formación boscosa ubicada en **Los Farallones del Citará**, un cordón montañoso y área de reserva regional, son áreas de difícil acceso, que conservan relictos boscosos significativos, y son hábitat de especies faunísticas en peligro de extinción. Dentro de este sistema se destacan los siguientes corredores biológicos:

- **El Alto Fernando-Cabeza del Niño-La Teta, El Alto Cañaveral-San Bartolo**. El municipio de Andes concentra gran parte del cordón boscoso que involucra a los Farallones del Citará, en diferentes estados de degradación, ubicado en límites con el departamento del Chocó, se trata de bosques en zonas muy escarpadas, con presión por extracción de madera.

- **El Alto Ventanas**. Ubicado en el municipio de Jardín en límites con el departamento de Caldas; esta zona se considera de alta vulnerabilidad por la adecuación de la vía Jardín - Riosucio, que incrementa la presión sobre el bosque aledaño a la carretera.
- **La Cuchilla del Paramillo**. Nacimiento del río San Juan, la zona está comprendida por bosque secundario y primario con mediana intervención antrópica, que radica en la extracción de especies arbóreas de gran valor comercial y la caza de especies de la fauna con fines comerciales.

a

b

Fotografía 1. Áreas naturales y de conservación en el Suroeste de Antioquia, a. Farallones de Citará, b. Cerros Tusa y Bravo.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Determinar el cambio y tendencia en las coberturas vegetales asociados a la producción del café y su relación con la permanencia de zonas boscosas naturales y su conectividad estructural.

4.2 Objetivos específicos

I. Describir la estructura del paisaje con relación a la conectividad física de los bosques en los años 1986, 1997 y 2007.

II. Caracterizar los cambios en las coberturas del paisaje durante en las últimas tres décadas.

III. Identificar la tendencia y escenario futuro en el uso del suelo del paisaje.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

El estudio se realizó en la cuenca del río San Juan, que comprende los municipios de Andes, Hispania, Betánia y Jardín, en el suroeste del Departamento de Antioquia, Colombia. El área corresponde a 88.000 ha, aproximadamente entre las coordenadas 76°5'34,05"W; 5°51'16,9"N; y 75°43'35,44"W; 5°28'48, 44"N (Figura 6).

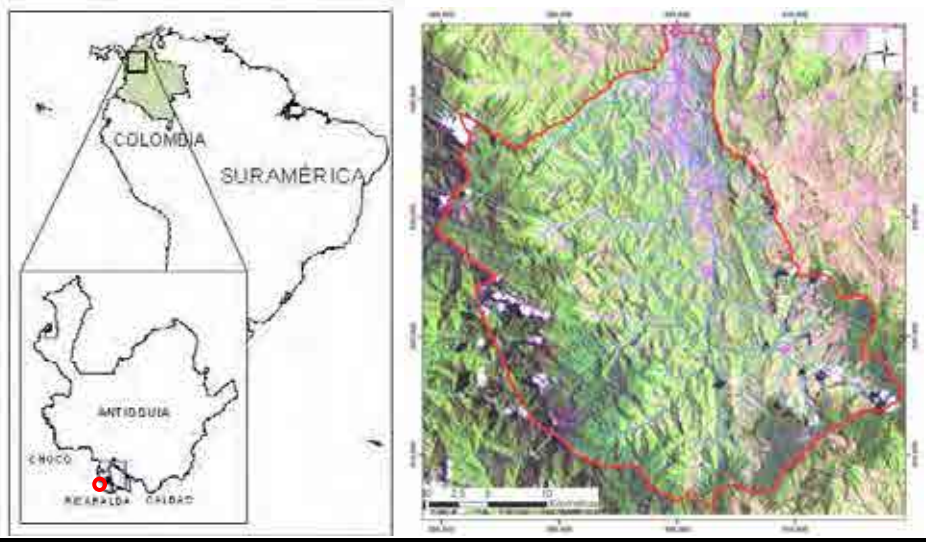


Figura 6. Ubicación área de estudio. (Fuente: Elaboración propia)

5.2 Materiales

Se utilizaron imágenes satelitales Landsat TM y ETM+, obtenidas en la base de datos en línea del ESDI[2] (*Earth Science Data - Global Land Cover Facility*) y USGS[3] (*U.S. Geological Survey*). La zona de estudio está cubierta por la imagen con Path/Row: 009/56, se obtuvo un conjunto de imágenes Landsat TM® de las décadas 80´s, 90´s y actuales, de las cuales se procesaron las imágenes de las fechas 09/1986, 08/1997 y 03/2007; las demás se utilizaron como información de referencia, así como el modelo de elevación SRTM[4] (*Shuttle Radar Topography Mission*).

Además, con el apoyo de La Federación Nacional de Cafeteros, el Centro Nacional de Investigación en Café (CENICAFE) y La Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) se obtuvo información secundaria básica y temática, así como otras imágenes de diferentes sensores que se utilizaron para validar la información extraída de las imágenes satelitales Landsat TM®.

5.3 Metodología

I. *Descripción de la estructura del paisaje con relación a la conectividad física de los bosques en los años 1986, 1997 y 2007.*

A cada imagen se le realizó un proceso de evaluación de la calidad para su posterior tratamiento, además se utilizaron filtros y combinaciones entre bandas (RGB) que permitieron diferenciar y extraer la mayor información posible sobre las coberturas existentes.

La información temática del territorio se obtuvo haciendo uso de técnicas matemáticas y estadísticas, para la clasificación de las imágenes, implementadas mediante algoritmos en programas informáticos (ERDAS 9.1®). De esta manera, la clasificación de imágenes se realizó en las coberturas del suelo de acuerdo al grado de resolución permitida por la imagen, considerando un área mínima de mapeo (UMM) de 1,0 ha. Se diferenciaron las clases de *Áreas boscosas, Pastizales, Cultivos tradicionales, Cultivos intensivos, Áreas sin vegetación y Nubes*.

La clasificación supervisada de cada imagen se realizó siguiendo las siguientes fases:

(1) Fase de entrenamiento o definición digital de categorías, en la cual a partir de una evaluación visual de las imágenes se determinaron los parámetros (el brillo, el color, la textura, la forma, el tamaño, el patrón y las sombras) para diferenciar los tipos de coberturas. En este

[2] ESDI, URL://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp
[3] USGS, URL:http://glovis.usgs.gov/
[4] SRTM, URL://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp

punto se diferencian áreas piloto para cada una de las coberturas que se pretenden clasificar, indicadas anteriormente.

(2) Fase de agrupación de los píxeles de la imagen en cada una de las categorías antes establecidas. Con base en las “semillas” o firmas espectrales de cada cobertura definida se agruparon en las coberturas descritas.

(3) Fase de comprobación de los resultados, por medio de puntos de control y visitas a campo. Este proceso se realizó con la clasificación supervisada previa de las imágenes y la ayuda de 60 puntos de control que validan la información sobre los valores digitales y criterios de agrupación.

Como información de apoyo al proceso de clasificación se determinó el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) para cada imagen, con el objetivo de complementar y validar los criterios de clasificación y diferenciación entre coberturas similares como el cultivo de café tradicional (mixto) y las áreas boscosas. La validación de la clasificación de las imágenes se obtuvo mediante el *Índice Kappa*.

La estructura general del paisaje fue descrita y comparada mediante el cálculo de las métricas espaciales más utilizadas en los estudios de fragmentación y cambios en las coberturas vegetales, con índices básicos de composición y estructura, tales como: el *Área de clase o cobertura (AC) y su porcentaje en el paisaje (PLAND)*, el *Número de parches (NP) y la densidad de parches (PD)*, el *Índice de forma del paisaje (LPI)* y la *Relación perímetro-área con base en la dimensión fractal (PAFRAC)*. Estas métricas fueron calculadas mediante el software de análisis espacial Fragstat 3.3®, para identificar el cambio y fragmentación de las coberturas principalmente en las Áreas boscosas (McGarigal y Ene, 2001; Turner *et al* 2001; McGarigal, 2002; Rutledge, 2003).

II. Caracterización de los cambios en las coberturas del paisaje en las últimas tres décadas.

Posterior a la clasificación de las imágenes, su validación y la descripción de la estructura del paisaje, se procedió a la estimación de los cambios en el uso y cobertura del suelo con énfasis en las coberturas boscosas. La metodología desarrollada para la detección y análisis de cambios fue la *comparación bi-temporal de imágenes post-analizadas o clasificadas*. El análisis consistió en la comparación directa de las imágenes multi-temporales clasificadas en el mismo número y tipo de clases.

Esta comparación permitió, entre otros, ver los cambios relativos entre épocas, cambios netos y transiciones entre coberturas, donde se considerarán aspectos históricos a evaluar

especialmente con relación a los cambios específicos en el cultivo. Además se realizaron análisis de cambios en la estructura del paisaje (comparación de métricas) y de la conectividad estructural relativa a los fragmentos de bosque.

Estos análisis se realizaron para las imágenes, las cuales representan algunos eventos de interés según los actores productivos y ambientales. A manera de contextualización, se relacionaron los cambios en el paisaje y su estructura con eventos tales como: el cambio de la forma de cultivar el café (tradicional – intensivo), renovación de cultivos, información que fue aportada por los censos cafeteros en cada municipio, la creación de las entidades ambientales (p.ej. CORANTIOQUIA) y con políticas relevantes a nivel comercial (p.ej. cafés ecológicos), proyectos productivos alternativos de otros cultivos para el sostenimiento de la familia campesina, entre otros sucesos importantes.

III. Identificar la tendencia y escenario futuro en el uso del suelo.

Los mapas de cobertura en cada año e información de los cambios identificados, fueron el insumo para la estimación de la tendencia del paisaje y la generación de un escenario futuro. Mediante el análisis de Cadena de Markov (CM), combinado con algoritmos de redes neuronales artificiales (RNA).

Como resultados del CM se obtuvo: una matriz de probabilidades condicionadas o de transición entre todas las clases, que indica la probabilidad de que un pixel de una clase dada cambie a otra clase o se mantenga en la misma para el período siguiente (probabilidades espacialmente condicionadas); una *matriz de áreas de transición* que indica el número de píxeles o su equivalente en área que pueden cambiar.

La determinación del cambio se realizó para las temporadas 1986(t_0) a 1997(t_1), a partir del cual se estimó la matriz de cambio a 10 años es decir para el 2007(t_2). Posterior a esto se generó otra matriz de cambio 1997(t_1) a 2007(t_2) con el objetivo final de estimar un escenario futuro a 10 años, esto es para el 2017 (t_3), es decir, la matriz de cambio global se calculó con base en la matriz producto de las probabilidades de cambio antes estimadas. Este paisaje "futuro", fue estimado como el escenario de mayor probabilidad, el cual fue generado espacialmente a partir de un modelo de *Redes Neuronales Artificiales* (RNA) con base en la historia ocupacional de las coberturas, la probabilidad de transición condicionada dada por el proceso de Markov y las condiciones de cambio vecinales y lógicas entre las coberturas.

La ubicación espacial de los cambios y la estimación del paisaje futuro se realizó con base en las coberturas que históricamente ocuparon cada lugar y sus probabilidades de

transición condicionadas a su vecindad y patrón de transición. Esto se estimó por medio del análisis de Redes Neuronales Artificiales (RNA).

El análisis de RNA se generó en las plataformas GNU PostgreSQL©[5] y PostGIS©[6], creando un paisaje compuesto por filas y columnas de celdas de 30x30 m con la información de la cobertura existente en cada fecha de estudio 1986, 1997, 2007 y la cobertura más probable de acuerdo a su historia y patrón de cambio. También se generaron reglas condicionadas de cambio debido a la vecindad de cada celda.

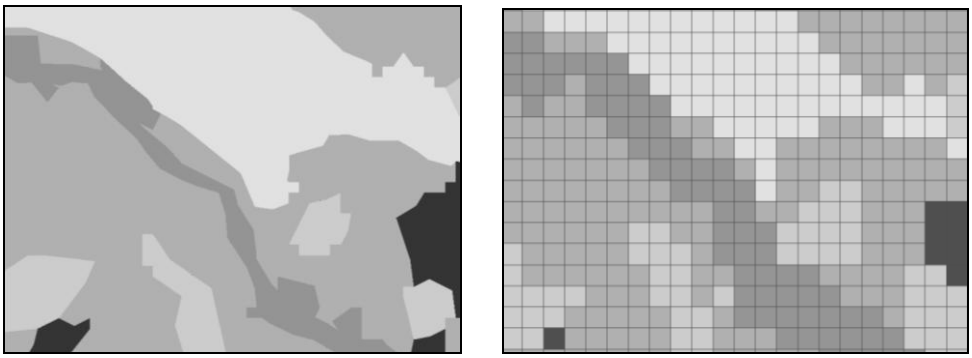


Figura 7. Generación del paisaje en celdas vectoriales con la información histórica en cada celda.

Las capas temáticas de interés, es decir el conjunto de variables en el modelo neuronal, son catalogadas según la cobertura en cada año, regla definida anteriormente por el proceso de Markov como las únicas variables que definen el cambio, y con la ayuda de la matriz de transición de condiciones. De esta manera cada entrada en la variable temática tiene un valor codificado, asignado según la regla específica.

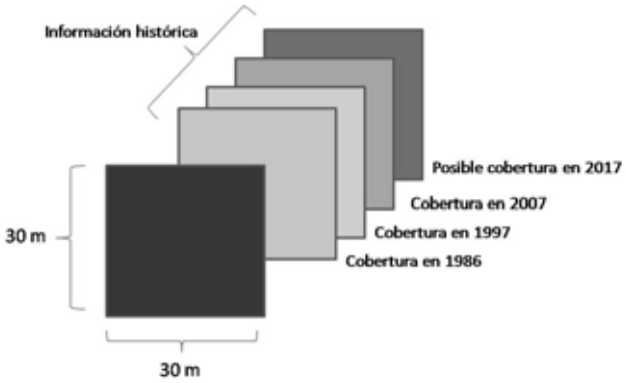


Figura 8. Información almacenada en cada celda del paisaje.

[5] http://www.postgresql.org/
[6] http://postgis.refractions.net/

La condición de cambio condicionada a la vecindad fue generada por todas las posibles combinaciones de las coberturas vecinas que puede tener una celda central (Ver anexo I).

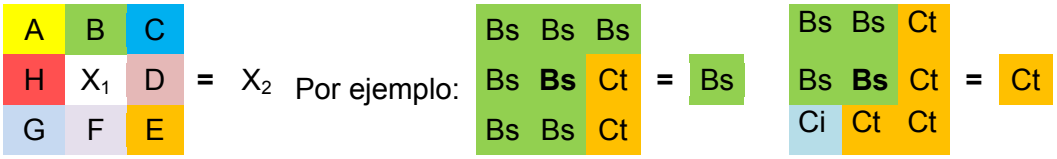


Figura 9. Esquema de regla de vecindad almacenada en cada celda del paisaje.
Bs: Áreas Boscosas, Ct: Cultivos tradicionales y Ci: cultivos intensivos.

Donde X_1 es la celda con la cobertura objetivo y A, B, C, D, E, F, G y H son las coberturas vecinas, X_2 es el resultado de cambio debido a la posible influencia por la existencia de otra cobertura que este adyacente a esta. Estas reglas se generaron para establecer restricciones espaciales lógicas de transición entre las coberturas, basadas en la cantidad de borde compartido y el grado de transformación de las celdas vecinas que por adyacencia se esperaría algún “contagio” para el cambio de uso o por el contrario no sucede el cambio por el desarrollo normal de la sucesión vegetal. Para este caso, se establecieron escenarios de conservación, con un énfasis especial en la persistencia de los bosques existentes debido a la participación de entidades ambientales en la zona en busca de un desarrollo sostenible en la región.

Como regla general, la cantidad de borde o vecinos ejerce la presión sobre la celda objetivo, siendo las coberturas más “agresivas” los pastos y cultivos tradicionales con usos dominantes en la región. Los cultivos intensivos, por su dinámica y manejo, se esperaría que afecten por vecindad a pastos y áreas sin vegetación.

En la figura 10, se esquematiza el proceso para describir el cambio en las coberturas y la estructura del paisaje para obtener una estimación de sus escenarios futuros. Donde, C_ct_{x-y} es el cambio en cobertura y C_et_{x-y} es el cambio en estructura, ambos en el tiempo *x* a *y*.

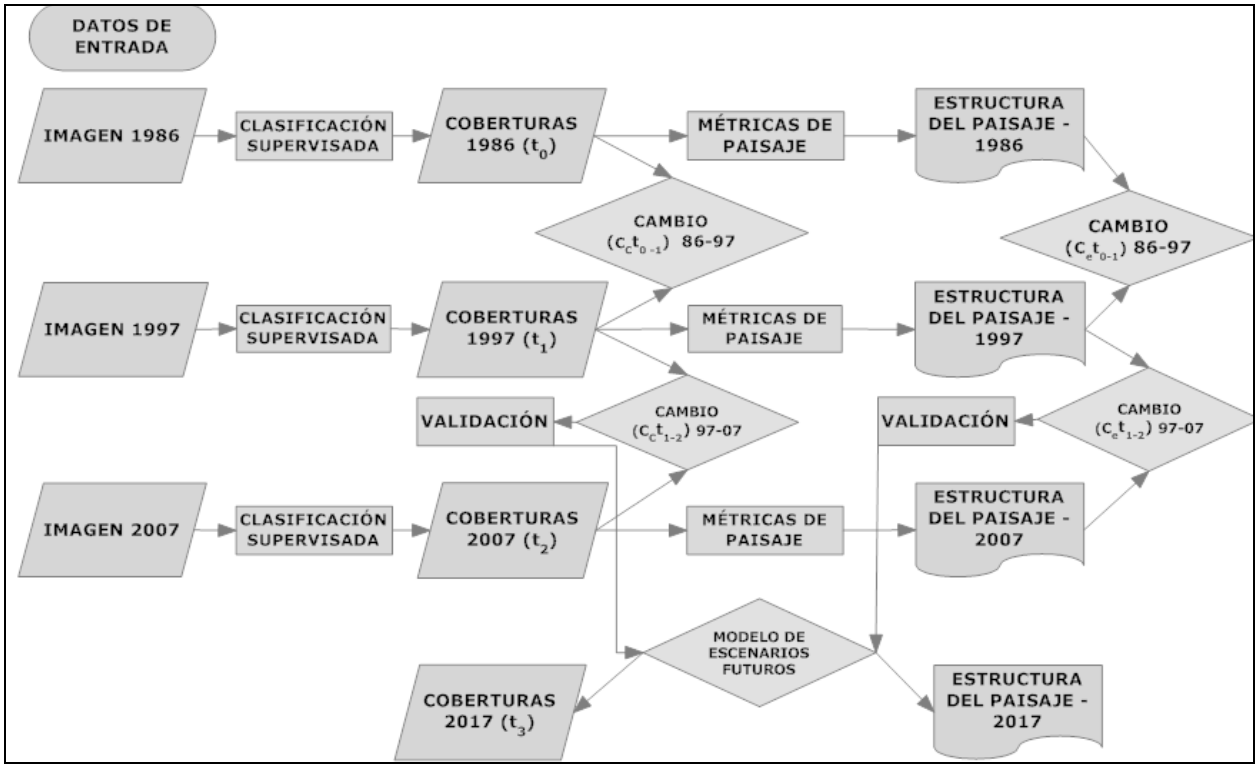


Figura 10. Esquema del proceso de caracterización del cambio y estructura del paisaje, asi como la estimación del paisaje futuro.

Discutir los resultados en relación con el aporte de elementos de base para el manejo y conservación de los bosques con base en el estado de permanencia y conectividad estructural de los mismos como apoyo a las estrategias de conservación en estos paisajes. De esta manera, estos escenarios se contrastaron con las políticas de conservación y tenencia de la tierra expuestas en los Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT) de los municipios involucrados y en los informes de las autoridades ambientales, con el fin de presentar una idea de las posibles estrategias de conservación y proveer información para la toma de decisiones para el manejo sostenible del suelo y desarrollo regional en estos paisajes.

6. RESULTADOS

6.1 Identificación del paisaje: Clasificación de las coberturas del suelo en 1986, 1997 y 2007.

Las coberturas del suelo identificadas, mediante la interpretación visual de las imágenes, fueron:

Áreas boscosas: Corresponden a aquellas áreas naturales de menor transformación en su estructura y función. Dentro de esta categoría están los bosques densos, bosques secundarios, intervenidos o en recuperación y áreas boscosas de ribera o quebradas. En la interpretación visual de las imágenes se identificaron como las zonas con texturas gruesas y densas, asociadas generalmente a las cimas de las montañas y quebradas. En la combinación 5,4,3 (RGB), los píxeles presentan un color verde oscuro denso y en la evaluación del índice de vegetación (NDVI) se observan valores alrededor de 0,55 (Ver Fotografías 2 a. y b.).

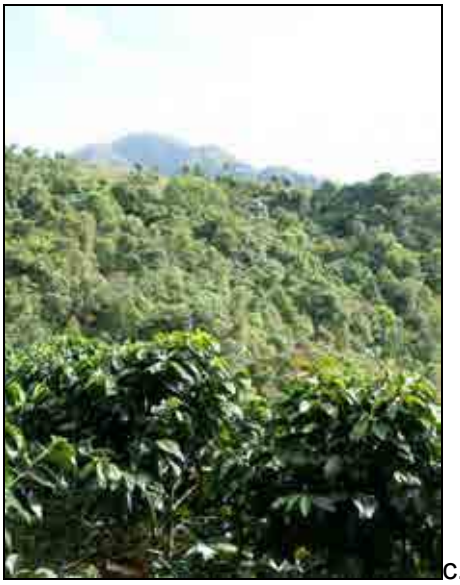
***Cultivos tradicionales*:** Esta cobertura incluye los cultivos de café bajo sombra de árboles y cultivos mixtos (café – plátano, frutales, huertas y cultivos rústicos) generalmente en las laderas de las montañas y cerca a las quebradas. Estas áreas se identifican en la imagen con una textura heterogénea poco densa y en la combinación 5,4,3 (RGB) los píxeles presentan un color verde claro intercalado con verde oscuro, el NDVI se encuentran alrededor de 0,63 (Ver Fotografía 2 c.).

***Cultivos intensivos*:** Corresponden a cultivos de café sin sombra o monocultivos, con mayor transformación, manejo y dinámica. En la imagen, corresponden a áreas “discretas” con homogeneidad en su textura, formas más regulares, alto brillo y contraste. En la combinación 5,4,3 (RGB) presentan un color verde claro intenso y brillante. El NDVI superior a 0,65, característico coberturas manejadas con una alta productividad primaria (Ver Fotografía 2 d.).

***Áreas sin vegetación*:** Zonas urbanas y suelos desnudos asociados a derrumbes, quemas intensas, adecuación de áreas de cultivos intensivos, canales de ríos y quebradas. En la imagen se caracterizan por su bajo brillo pero alto contraste, en colores fucsia o rojizo de los píxeles y se observan valores de NDVI menores a 0,25 (Ver Fotografía 2 e.).

Pastos*:* Corresponde a la cobertura vegetal de porte bajo. Se identifican como áreas con una cobertura vegetal de textura poco densa y homogénea, contrastante. En la combinación RGB 5,4,3 se diferencia por su color entremezclado de rosado y gris. Los valores de NDVI en los píxeles son alrededor de 0,35 (Ver Fotografía 2 f.).

a.

b.

c.

d.

e.

f.

Fotografía 2. a. y b. Áreas boscosas; c. Cultivos tradicionales, d. cultivos intensivos; e. Áreas sin vegetación, zonas urbanas y f. Coberturas de pastizales

Con base en la identificación de coberturas anterior se realizó la clasificación de las coberturas en cada imagen (1986, 1997 y 2007). Se generaron los mapas de coberturas por medio de la clasificación supervisada bajo el método de máxima verosimilitud, posterior a esto se realizaron procesos de filtrado y corrección de grano en el formato raster, hasta establecer el área mínima de mapeo. Como resultado de esto se generaron los mapas que se presentan a continuación en la figura 11.

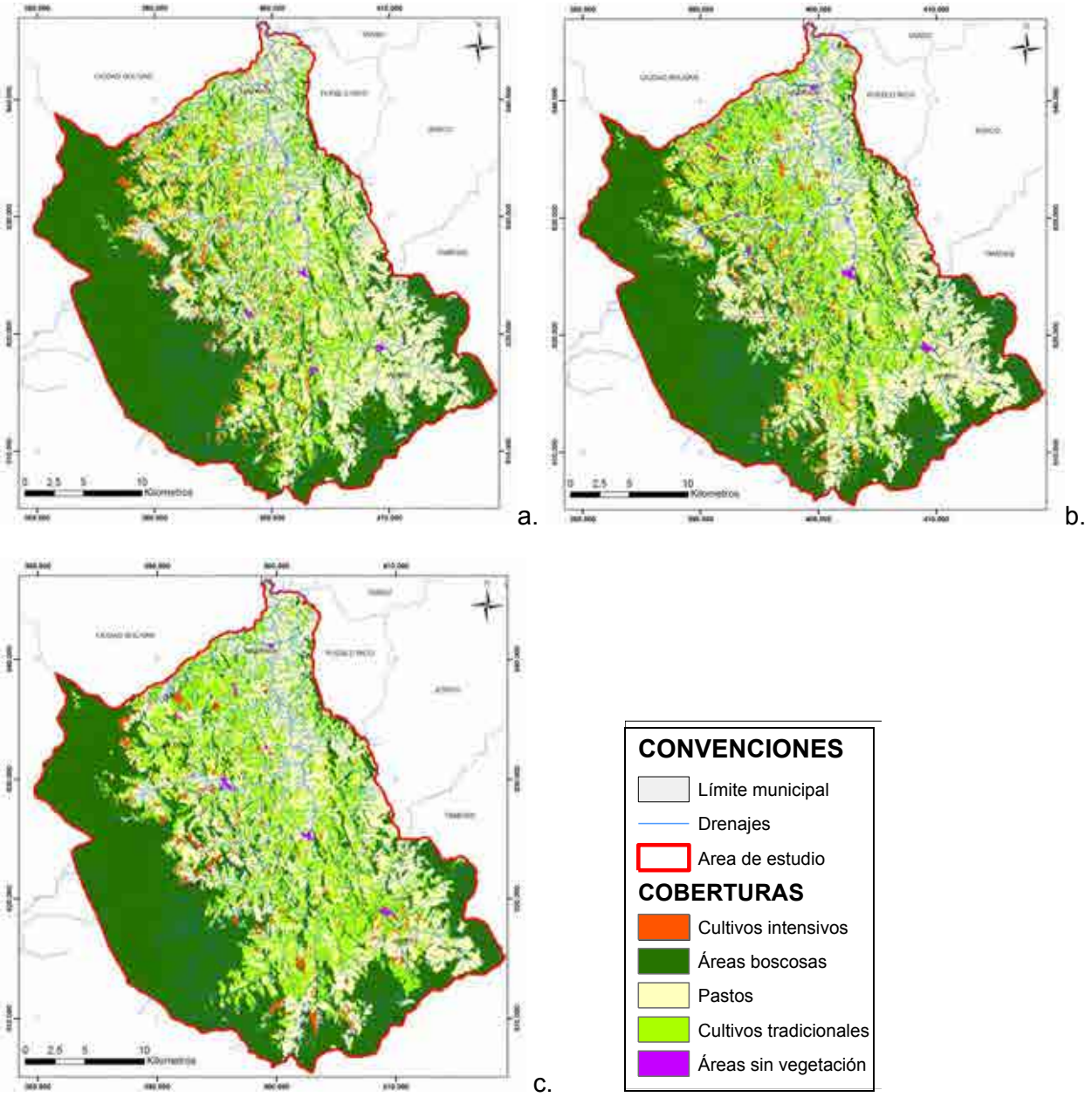


Figura 11. Resultado de la clasificación supervisada de las imágenes Landsat TM: a) 1986, b) 1997 y c) 2007

6.2 Validación de la clasificación.

La validación general de la clasificación se realizó por medio de la "*Evaluación de Precisión o Accuracy assessment*" y el "*Índice Kappa*" con la comparación de los puntos de control y la imagen final clasificada, así la precisión para la clasificación de cada cobertura fue superior al 77%, siendo el valor más bajo para la clase de Áreas boscosas, pues la mayor parte de los puntos de control fueron tomados en los bordes de los bosques lo que podría generar estos valores bajos.

En cuanto al índice Kappa, el valor total de la clasificación fue de 0,77; presentando algunas variaciones en la clase de *Cultivos tradicionales*, esto debido a su confusión para la interpretación con base en las características visuales, previamente tenida en cuenta con las *boscosas*.

6.3 Estructura del paisaje 1986 – 1997 – 2007.

Cambio de la estructura del paisaje 1986 a 1997.

El interés particular fue interpretar lo que ha pasado con la estructura espacial de los fragmentos de *Áreas boscosas* que aún permanecen. De esta manera se puede observar que en el transcurso de 11 años, desde 1986 a 1997, las coberturas boscosas perdieron cerca de 3% de su área, el número de fragmentos y su densidad aumentó cerca del 13%, indicando que no sólo hay menos área de bosques sino, que en 1997 esta cobertura se encuentra más fragmentada con una mayor densidad por km^2, y con menor área promedio por parche.

El índice LPI indica el porcentaje del paisaje que está ocupado por el parche más grande de cada cobertura. Así, el área de estudio posee un fragmento extenso en *Áreas boscosas* el cual inicialmente comprendía cerca 30% del total del paisaje y disminuyó su valor en 4,1% a 1997, sin perder la dominancia en el paisaje. Estos resultados en la estructura de las *Áreas boscosas* indican que los fragmentos de bosque disminuyeron en área, se fragmentaron aumentando la cantidad de parches y los fragmentos de mayor área se concentraron en ciertas áreas. En cuanto al índice de forma, la variación es mínima indicando que se mantiene una forma irregular de los parches.

Para la clase de *Cultivos tradicionales*, se evidenció un aumento en su área total del 18%, al igual que el área promedio de sus parches, pero el número de parches y su densidad disminuyó de manera importante en un 35%, indicando que para esta cobertura la fragmentación disminuyó por un aumento en sus áreas generando la conexión física entre fragmentos, formando parches más grandes. Además, el valor del índice LPI aumenta en un

480%, es decir, esta conexión generó un fragmento que aumentó considerablemente la dominancia y su porcentaje de participación en el paisaje.

Tabla 2. Métricas del paisaje para los años 1986 y 1997.[7]

COBERTURA	AC			NP			LPI			PAFRAC		
	1986	**1997**	**%**	**1986**	**1997**	**%**	**1986**	**1997**	**%**	**1986**	**1997**	**%**
Pastos	29363,31	28189,35	-4%	684	818	20%	10,79	10,41	-4%	1,47	1,47	0%
Cultivos tradicionales	**16045,56**	**18916,74**	**18%**	**1294**	**835**	**-35%**	**1,14**	**6,62**	**480%**	**1,41**	**1,47**	**4%**
Cultivos intensivos	2540,34	1907,19	-25%	642	464	-28%	0,06	0,05	-15%	1,36	1,38	1%
Áreas Boscosas	**39649,23**	**38500,02**	**-3%**	**623**	**706**	**13%**	**29,37**	**28,16**	**-4%**	**1,43**	**1,43**	**0%**
Áreas sin vegetación	362,43	447,57	23%	86	49	-43%	0,04	0,08	105%	1,30	1,46	12%

En el caso de los *Pastos*, siendo la segunda cobertura dominante en el paisaje, se observó una disminución en su área total y el área promedio de parches, mientras que el número de estos y su densidad aumentaron en 20%, indicando una fragmentación o transición entre coberturas, de acuerdo con el índice LPI se demuestra que se mantiene el parche más grande ocupando cerca del 10% del paisaje.

Los *Cultivos intensivos* presentaron una disminución en todas las métricas indicando una transición de coberturas con la tendencia a ser la cobertura más dinámica, cerca de un 25% del área inicial y 28% del número de parches originales presentaron una transición o cambio de cobertura, evidenciando los ciclos de renovación del cultivo.

Cambio de la estructura del paisaje 1997 a 2007.

El cambio en la estructura del paisaje entre 1997 y 2007 con relación a la clase de *Áreas boscosas*, presentó una baja disminución del área total y un leve aumento en el área promedio de los fragmentos. El número de parches disminuye cerca de un 10%, indicando la pérdida de parches pequeños y recuperación de bordes, que hace que la dominancia del parche más grande este aumentara cerca de un 30% con relación a 1997 y respecto a los parches de la misma categoría de las demás coberturas.

Tabla 3. Métricas del paisaje para los años 1997 y 2007.[7]

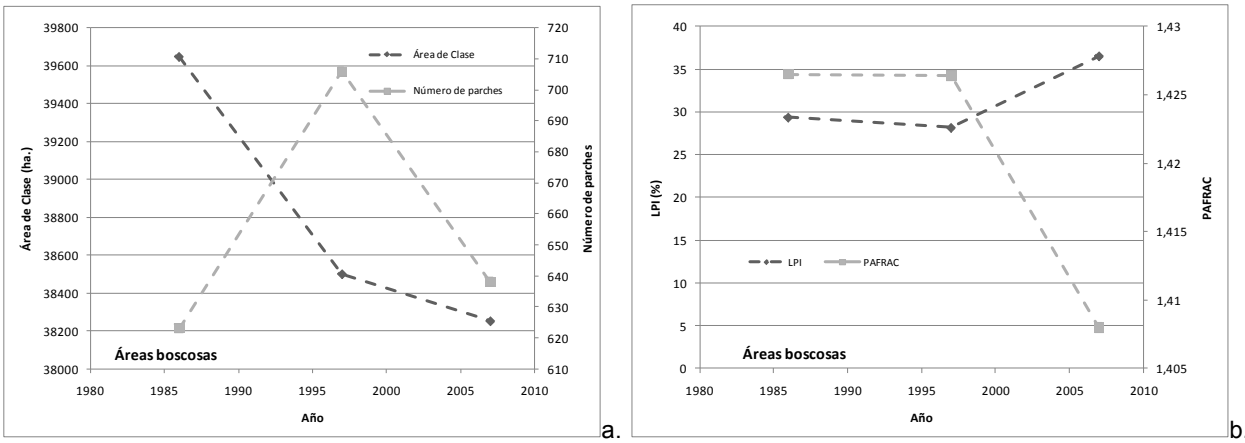
COBERTURAS	CA			NP			LPI			PAFRAC		
	1997	**2007**	**%**	**1997**	**2007**	**%**	**1997**	**2007**	**%**	**1997**	**2007**	**%**
Pastos	28189,35	25739,01	-8,7%	818	811	-0,9%	10,4066	7,9906	-23,2%	1,4724	1,4577	-1,0%
Cultivos tradicionales	**18916,74**	**21767,76**	**15,1%**	835	853	2,2%	6,6222	7,6969	16,2%	1,469	1,3952	-5,0%
Cultivos intensivos	1907,19	1836,45	**-3,7%**	464	319	**-31,3%**	0,054	0,0854	**58,1%**	1,3767	1,3092	**-4,9%**
Áreas Boscosas	**38500,02**	**38251,35**	**-0,6%**	**706**	**638**	**-9,6%**	**28,164**	**36,558**	**29,8%**	**1,4264**	**1,408**	**-1,3%**
Áreas sin vegetación	447,57	366,3	-18,2%	49	64	30,6%	0,0843	0,0702	-16,7%	1,4624	1,2518	-14,4%

[7] Donde, AC: Área de clase (ha); NP: Número de parches, LPI: Índice del parche más grande (%) (*Largest Patch Index*), PAFRAC: Índice de forma, relación fractal, %: Porcentaje de de cambio

Para los *cultivos tradicionales* se observa un aumento del 15% en el área total, no siendo así en el número de parches; indicando un aumento en el área de los parches ya existentes y transiciones entre coberturas. En cuanto a su dominancia en el paisaje también mantiene un aumento aunque relativamente bajo respecto a la temporalidad anterior.

Cambio de la estructura del paisaje 1986 – 1997 – 2007.

En general el comportamiento de la estructura básica del paisaje en el transcurso de 20 años se observa en las siguientes gráficas, que evidencian la tendencia para las coberturas de interés *Áreas boscosas*, *cultivos tradicionales y cultivos intensivos* (ver figuras 12, 13 y 14).

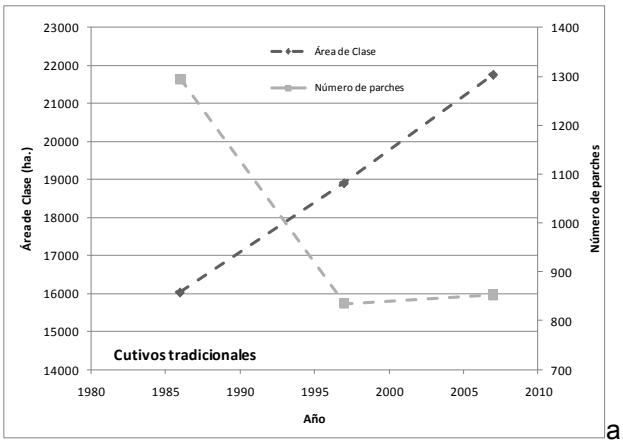


a. b.

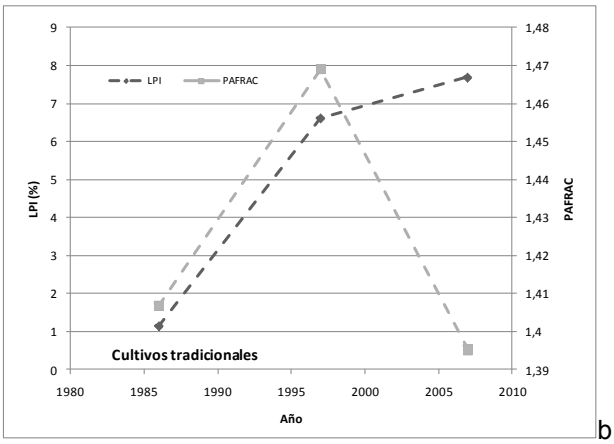
Figura 12. Tendencia general del cambio en la estructura del paisaje para las Áreas boscosas. a) AC y NP; b)LPI y PAFRAC

Áreas Boscosas: La tendencia inicial indicó la disminución acelerada en el área total de la cobertura. Contrario a esto se observa un aumento importante en el número de parches, indicado una etapa inicial de fragmentación de la cobertura. Luego se observa una disminución en la cantidad de parches y una disminución menos pronunciada del área, lo que indicaría la recuperación de ciertas áreas y la pérdida o transición entre coberturas en otras áreas en los últimos años.

Comparando el comportamiento entre la dominancia de cobertura que expresa el índice LPI durante la temporalidad se observó una tendencia a aumentar ligeramente y además de mantenerse sobre las demás coberturas. Por otra parte, el índice de forma (PAFRAC) tiende a disminuir indicando que el bosque está perdiendo la forma irregular por afectación de pequeños relictos o el borde de los mismos tendiendo a ser más rectos y regulares.



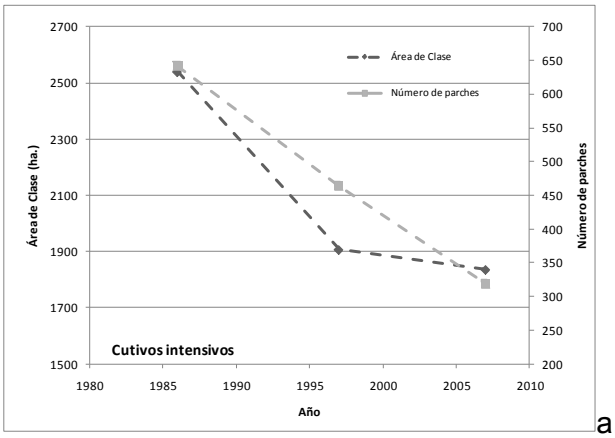
a.



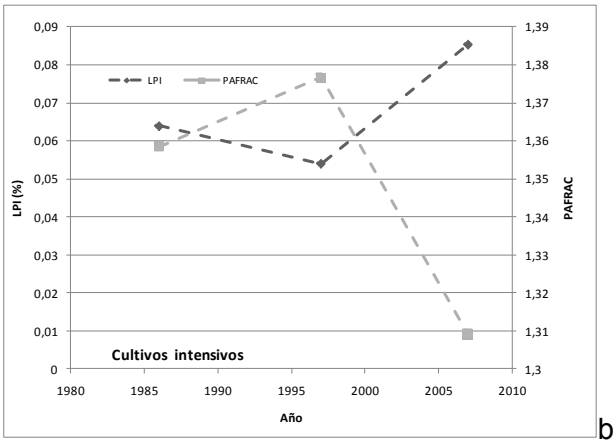
b.

Figura 13. Tendencia general del cambio en la estructura del paisaje para las Cultivos tradicionales. a) AC y NP; b)LPI y PAFRAC

Cultivos tradicionales: Esta cobertura presenta una tendencia inversa a las coberturas boscosas, se observa un aumento importante y casi constante del área total, mientras que el número de parches o fragmentos inicialmente disminuye manteniéndose casi constante al final, este comportamiento está indicando que los parches que antes existían se conectaron generando un cobertura continua en el paisaje. Al comparar el índice LPI se demuestra el aumento en la dominancia del parche más grande de esta cobertura, pero mucho menos que las coberturas boscosas. Por su parte el índice de forma no mostró una variación importante y evidencia la forma irregular de los fragmentos.



a.



b.

Figura 14. Tendencia general del cambio en la estructura del paisaje para las Cultivos intensivos. a) AC y NP; b) LPI y PAFRAC

Cultivos intensivos: En general la tendencia de esta clase fue a disminuir en área total y número de parches; de igual manera, se observó que su valor de LPI es insignificante y respecto a otras coberturas, no demostró dominancia. En el índice de forma se observó un valor

bajo, lo que se esperaría para estas coberturas que merecen mayor manejo y que por lo general exhiben formas más regulares, de bordes más rectos.

6.4 Caracterización de los cambios y transiciones entre las coberturas durante 1986 y 1997.

En el análisis anterior se determinó el cambio en la estructura de las coberturas, sin embargo, a partir de éste no es posible identificar entre qué coberturas ocurren estos cambios o transiciones. En el siguiente análisis se presentan los cambios más importantes entre las coberturas, es decir, las transiciones más representativas con especial énfasis en las áreas boscosas.

De acuerdo con la metodología planteada, en los procesos de Markov, se generaron las matrices de transición de áreas y porcentajes que representan la cantidad, así como la proporción de área de una clase en particular que se mantiene de t_0 a t_1 (en la diagonal), y las que tienen transición, su lectura es de izquierda a derecha. La matriz de transición tanto por área como por porcentaje, se presenta en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Matriz de transición por área (ha) entre 1986 y 1997.

		AÑO 1997					
		Pastos	Cultivos tradicionales	Cultivos intensivos	**Áreas Boscosas**	Áreas sin vegetación	**TOTAL ÁREA (ha) 1986**
AÑO 1986	Pastos	28009,31	1233	-	-	121	29363,31
	Cultivos tradicionales	-	16045,56	-	-	-	16045,56
	Cultivos intensivos	**176**	**470**	**1893,34**	**-**	**1**	**2540,34**
	Áreas Boscosas	**4**	**1155**	**13**	**38477,23**	**-**	**39649,23**
	Áreas sin vegetación	-	14	-	23	325,43	362,43
	AREA TOTAL (ha)1997	28189,31	18917,56	1906,34	38500,23	447,43	87960,87

Tabla 5. Matriz de transición por porcentaje entre 1986 y 1997.

		AÑO 1997					
		Pastos	**Cultivos tradicionales**	Cultivos intensivos	**Áreas Boscosas**	Áreas sin vegetación	**∑% transición 1997**
AÑO 1986	Pastos	95,4	**4,2**	0,0	0,0	0,4	100
	Cultivos tradicionales	0,0	**100,0**	0,0	0,0	0,0	100
	Cultivos intensivos	6,9	**18,5**	74,5	0,0	0,0	100
	Áreas Boscosas	**0,0**	**2,9**	**0,0**	**97,0**	**0,0**	**100**
	Áreas sin vegetación	0,0	**3,9**	0,0	6,3	89,8	100

Estas matrices, así como el diagrama de transición permiten la comparación directa de cuáles fueron los cambios más importantes por cobertura. Para las *áreas boscosas* se observa que entre 1986 y 1997 un 97% del área original se mantuvo y solo un 3% cambió de uso a *Cultivos tradicionales*, algunas prácticas muy comunes incluyen la eliminación de la vegetación más baja y densa y dejar los árboles con dosel más alto como sombra (Tablas 4 y 5; Figura 15).

Los *cultivos intensivos* aparentemente son más dinámicos. Cerca del 18% del área original pasó a ser *cultivos tradicionales*, transición causada posiblemente por el abandono de algunas áreas de cultivo o cambio de uso de estas tierras en cultivos transitorios de subsistencia familiar por su alta productividad en el tiempo.

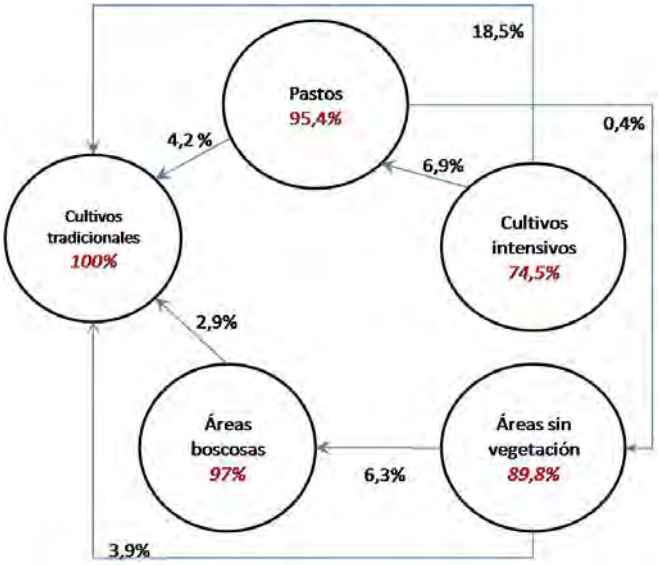


Figura 15. Diagrama de transición de coberturas 1986 -1997

En general todas las coberturas en este paisaje tuvieron transiciones hacia los *cultivos tradicionales*. En la figura 16 se observan espacialmente los cambios o transiciones sufridas por las *Áreas boscosas* hacia las demás coberturas. Es evidente la dinámica en la vertiente occidental del río San Juan y la presión existente sobre las áreas boscosas. En esta vertiente existe mayor presión por la ocupación del territorio que es más desagregada que en la vertiente oriental, que a su vez va ligado a la cantidad de vías de acceso.

En la figura 17 se identifican las áreas de transición de todas las coberturas hacia cultivos tradicionales. En el caso particular de los pastos, los cambios se observan en las partes altas de las subcuencas que corresponden a laderas de mayor pendiente, inicialmente degradas por el pastoreo y luego utilizadas en cultivos de rápido crecimiento.

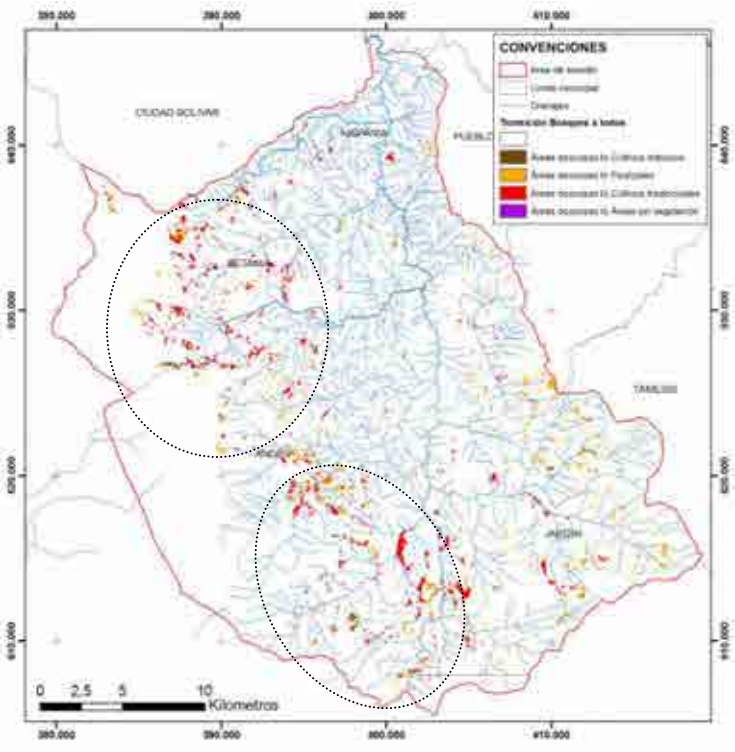


Figura 16. Ubicación espacial de las principales transiciones de Áreas boscosas a las otras coberturas, 1986 - 1997.

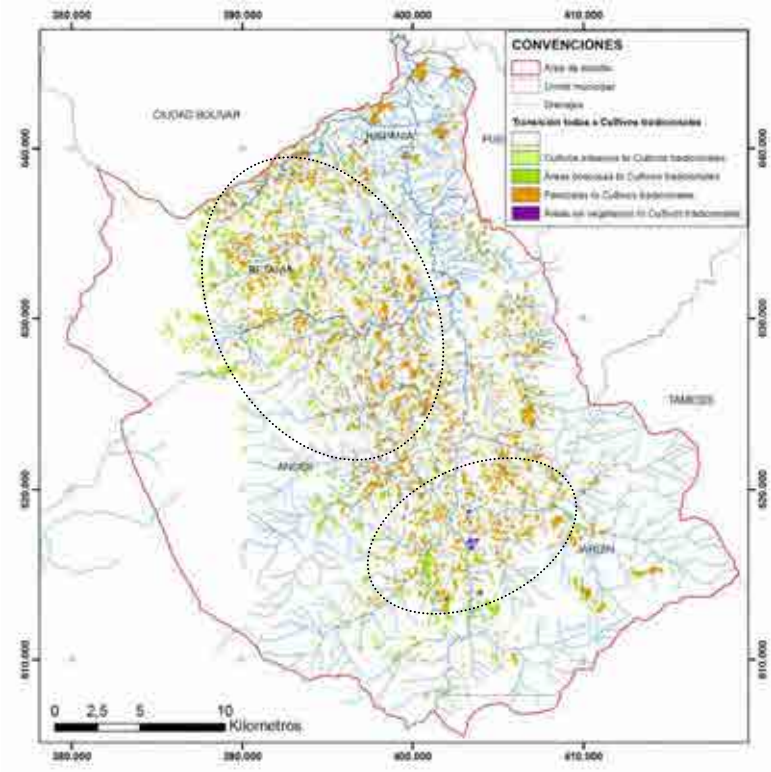


Figura 17. Ubicación espacial de las transiciones de todas las coberturas a Cultivos tradicionales entre 1986 y 1997

La matriz de probabilidades condicionadas para el cambio estimado para el año 2007 (t_2=10 años después), que sirve de insumo para hallar la probabilidad de cambio al año 2017, indicó que se espera que del área de *Áreas boscosas* en t_1 se mantenga un 94%, y por transición de coberturas pierda un 6% en *Cultivos tradicionales*. En cuanto a los *cultivos intensivos* se espera que sólo mantenga un 56% de su área anterior y un 33% pase a *cultivos tradicionales*.

Tabla 6. Matriz de probabilidades condicionadas de transición para el año 2007

	Pastos	Cultivos tradicionales	Cultivos intensivos	**Áreas Boscosas**	Áreas sin vegetación	**$\sum p_{ij}$ transición 2007**
Pastos	0,91	0,08	0,00	0,00	0,01	1,00
Cultivos tradicionales	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Cultivos intensivos	0,12	0,33	0,56	0,00	0,00	1,00
Áreas Boscosas	0,00	0,06	0,00	0,94	0,00	1,00
Áreas sin vegetación	0,00	0,08	0,00	0,12	0,81	1,00

En cuanto los *Pastos* se espera que se mantengan un 91%, y que cerca del 8% pase a ser *Cultivos tradicionales*, así mismo se espera que estos mantengan el 100% pero además reciban nuevas áreas por transición de otras coberturas, por lo que se espera que para esta cobertura en t_2 aumente su dominancia (Ver figura 18).

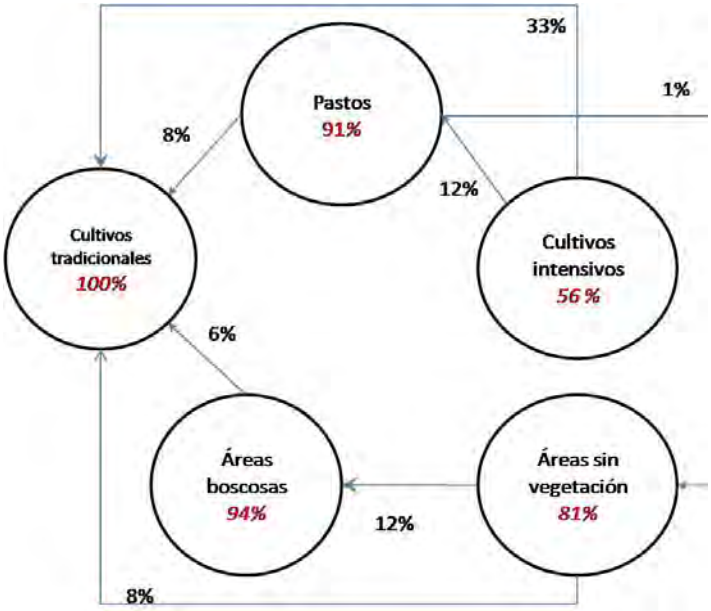


Figura 18. Diagrama de Probabilidad condicionada de transición de coberturas 1986 -1997 a 2007

6.5 Caracterización de los cambios y transiciones entre las coberturas durante 1997 y 2007.

En el análisis de cambio entre (t_1 - t_2) 1997 y 2007, se observó que las *Áreas boscosas* fueron la coberturas con más transiciones a todas las coberturas del paisajes, pero en bajo porcentaje, se mantiene intacto un 99% del área original. El cambio se debe sólo unas pocas áreas correspondientes a bordes que se afectan por el aumento de *cultivos tradicionales*.

Por su parte los *Cultivos tradicionales* son las coberturas que siguen en aumento por transición principalmente por los *cultivos intensivos* cerca de un 11% del área anterior. Los Pastos aumentan por la transición (o recuperación) de un 34% de *Áreas sin vegetación*.

Los *Cultivos intensivos* tienen un cambio neto de pérdida de 71 ha. aunque ganaron por transición de pastos, que es más de lo que pierden por cambio a otros tipos de cultivos.

Tabla 7. Matriz de transición por área (ha) entre 1997 y 2007.

		AÑO 2007					
		Pastos	Cultivos tradicionales	Cultivos intensivos	Áreas Boscosas	Áreas sin vegetación	TOTAL ÁREA 1997
AÑO 1997	Pastos	25553,35	**2486**	150	-	-	28189,4
	Cultivos tradicionales	-	**18877,7**	-	-	39	18916,7
	Cultivos intensivos	-	**215**	1664,19	-	28	1907,2
	Áreas Boscosas	**34**	**189**	**22**	**38250,02**	**5**	**38500,0**
	Áreas sin vegetación	152	**-**	-		295,57	447,6
	AREA TOTAL (ha) 2007	25739,35	**21767,7**	1836,19	38250,02	367,57	87960,83

Tabla 8. Matriz de transición por porcentaje entre 1997 y 2007.

		AÑO 2007					
		Pastos	Cultivos tradicionales	Cultivos intensivos	Áreas Boscosas	Áreas sin vegetación	**∑% transición 2007**
AÑO 1997	Pastos	91	9	1	0,0	0,0	100
	Cultivos tradicionales	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100
	Cultivos intensivos	0,0	11	87	0,0	1	100
	Áreas Boscosas	0,0	0,01	0,0	99	0,0	100
	Áreas sin vegetación	34	0,0	0,0	0,0	66	100

El diagrama de la figura 16, facilita la compresión de estos cambios. A diferencia de la anterior transición, el 1% de los cultivos intensivos pasan a ser áreas sin vegetación, comportamiento esperado pues la renovación de cultivos conlleva a la eliminación total de la cobertura vegetal para prepararlo para los nuevos cultivos. En la figura 20 se resaltan las áreas

de mayor cambio de las coberturas hacia los cultivos tradicionales, y aún predomina la dinámica en la vertiente occidental del río San Juan.

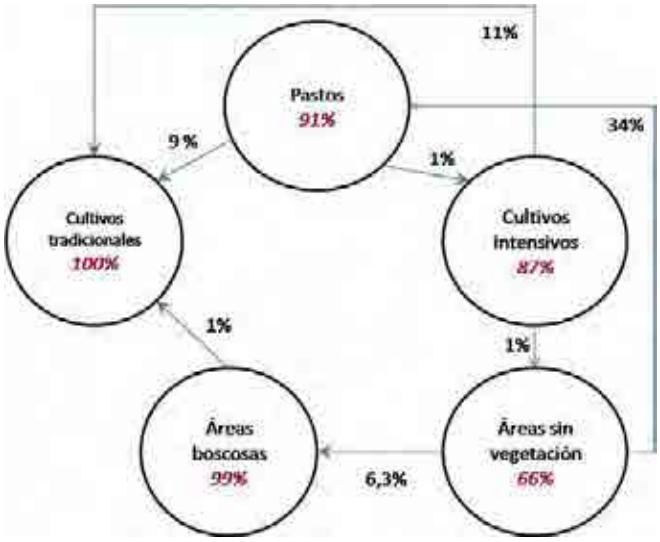


Figura 19. Diagrama de transición de coberturas 1997 - 2007

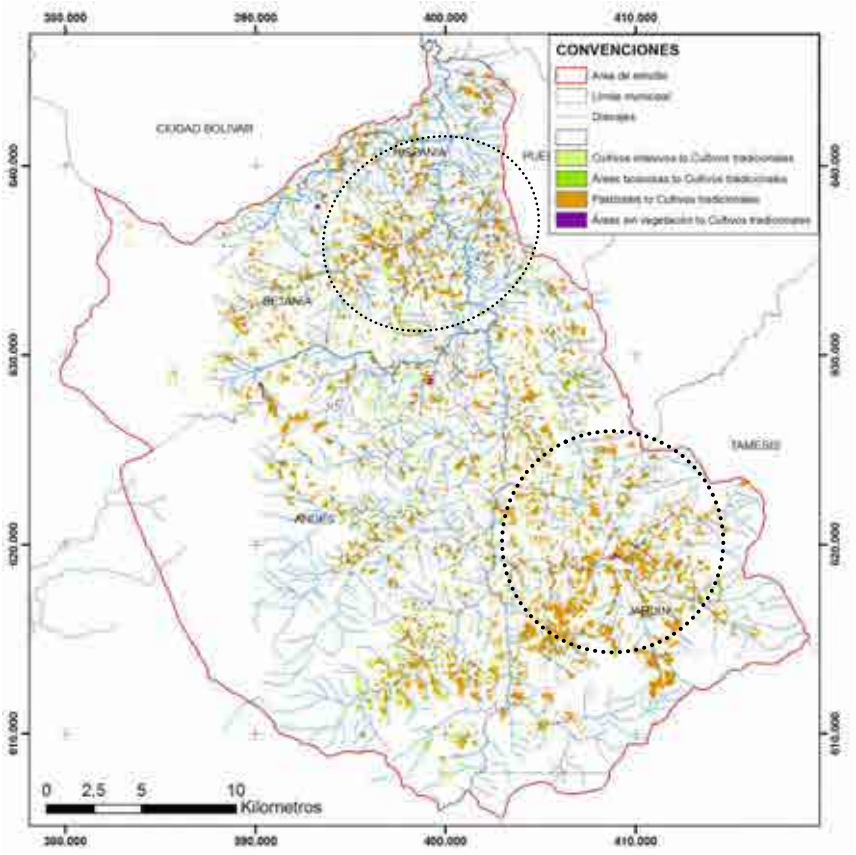


Figura 20. Ubicación espacial de las transiciones de todas las coberturas a Cultivos tradicionales entre 1997 y 2007

6.6 Estimación de la tendencia y escenario futuro en el uso del suelo, al año 2017.

La tabla 9 presenta la matriz de probabilidades condicionadas para las transiciones de las coberturas a 2017. Esta matriz es el producto de las dos matrices de transición anteriores por lo tanto mantiene la probabilidad de cambio histórica. Para el caso de *Pastos,* se espera que mantengan su área en un 87% y el 13% pasen a *Cultivos tradicionales*. Igualmente se mantiene la tendencia a disminuir los *cultivos intensivos* perdiendo área hacia *cultivos tradicionales.* Sin embargo ganaría área por parte de los *pastos*, evidenciando así su dinámica en la rotación del uso de la tierra. Los *Cultivos tradicionales* mantienen su incremento en el área por transición de las demás coberturas.

Por su parte las *Áreas boscosas* tienen un 96% de probabilidad de mantener un 96% de su área original, perdiendo un 4% de su área para *Cultivos tradicionales*, pero ganando por la recuperación el 6% de las *Áreas sin vegetación*.

Tabla 9. Matriz de probabilidades condicionadas de transición para el año 2017

	Pastos	Cultivos tradicionales	Cultivos intensivos	**Áreas Boscosas**	Áreas sin vegetación	**$\sum p_{ij}$ transición 2017**
Pastos	0,87	0,13	0,01	0,00	0,00	1,00
Cultivos tradicionales	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Cultivos intensivos	0,06	0,27	0,65	0,00	0,01	1,00
Áreas Boscosas	0,00	0,04	0,00	0,96	0,00	1,00
Áreas sin vegetación	0,30	0,04	0,00	0,06	0,59	1,00

De esta manera, se han estimado los posibles cambios, que de acuerdo con el comportamiento sufrido en los 20 años de las transiciones entre las coberturas se esperaría para los 10 años siguientes, aunque estas posibles transiciones hasta el momento sólo están estimadas de manera cuantitativa, sin embargo, espacialmente estos cambios aún no está ubicados en el paisaje de estudio, para lo cual se utilizan los insumos tales como, las coberturas en cada año, los valores de probabilidades condicionadas, el patrón de cambio entre las coberturas y las condiciones vecinales.

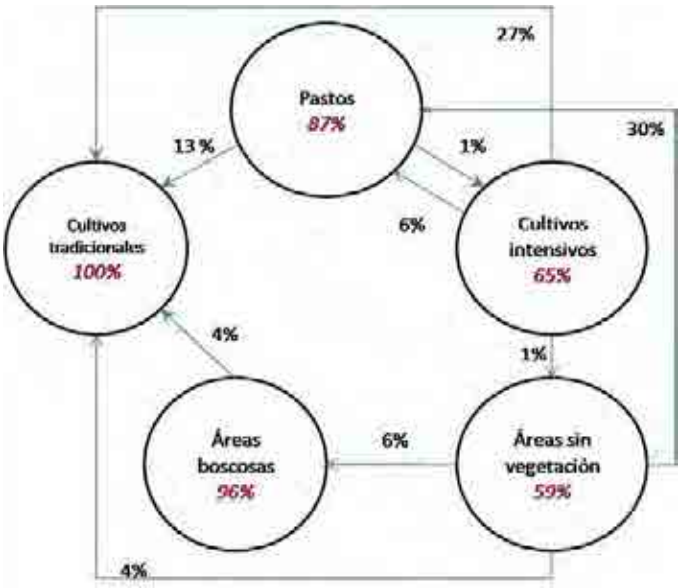


Figura 21. Diagrama de Probabilidad condicionada de transición de coberturas 1986 - 1997- 2007 a 2017

Ubicación espacial de las transiciones en 2017

La figura 22 representa el paisaje para el año 2017, resultado de la combinación de las variables antes descritas mediante la simulación por RNA, para la escogencia de la cobertura para cada una de las 266.700 celdas que componen el paisaje.

De acuerdo al análisis de la estructura del paisaje futuro, dadas las condiciones de cambio establecidas en este trabajo, se observó que la cobertura de *Áreas boscosas* disminuye su área en 1,1%, el número de parches por el contrario aumenta de manera importante y reduce la dominancia del parche más grande. Este comportamiento muestra que la cobertura aunque no perdió un área significativa y sus parches se subdividieron incrementando su densidad.

En el caso de los cultivos tradicionales se observan cambios reducidos en el área total y el número de parches, pero se resalta el aumento en la dominancia del parche más grande que ocuparía un 17% del paisaje. Esto indicaría que el cambio en la estructura de esta cobertura se debió a los cambios sufridos por las demás favoreciendo su dominancia en el paisaje.

En *Pastos* lo que se observa es una dominancia en aumentó, así como en el número de parches, lo que probablemente haya sucedido por la ocupación histórica de la celda en la transición de *áreas sin vegetación* y de *cultivos intensivos*.

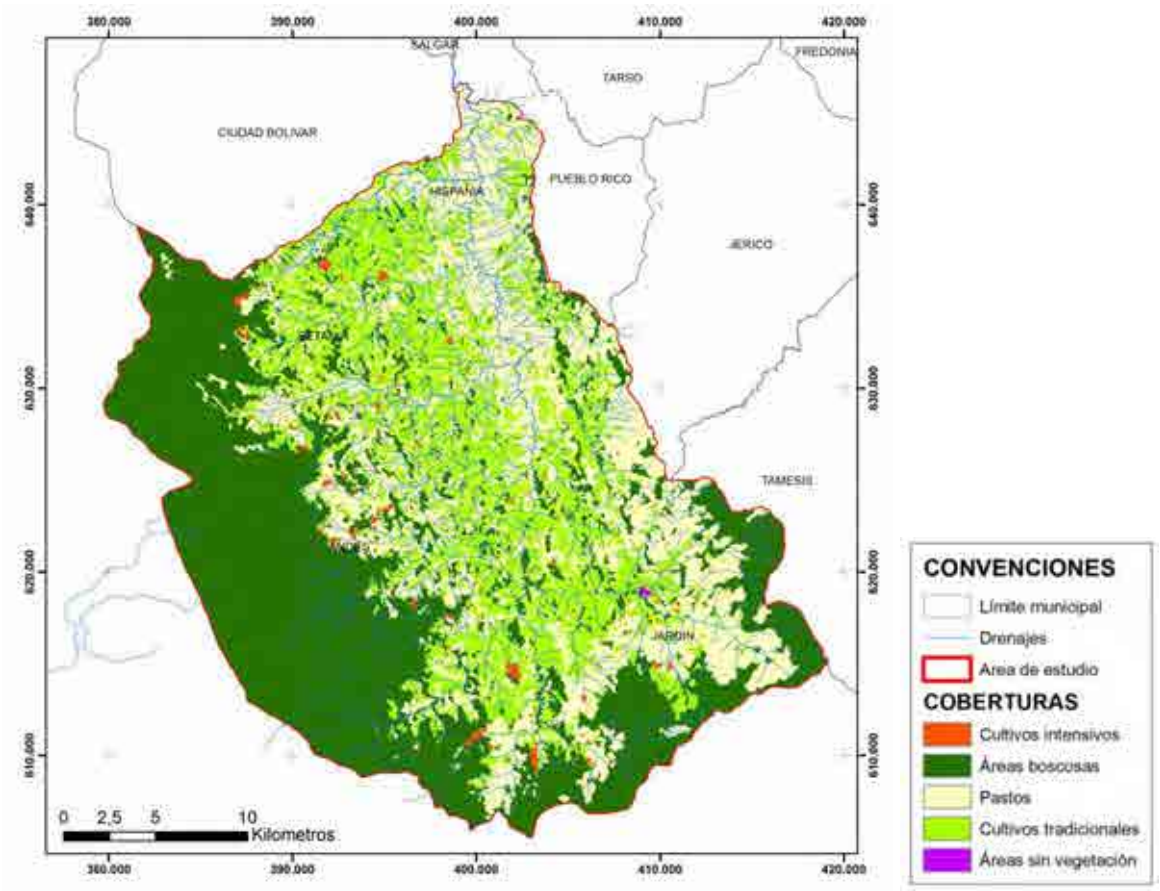


Figura 22. Paisaje estimado al año 2017

En general, se aprecia que las coberturas más cambiantes en estructura son los *Pastos*, los *Cultivos intensivos* y las *Áreas sin vegetación*. Es importante anotar que por las reglas generadas tanto de ocupación histórica como de vecindad, son las más dinámicas e influyentes en la afectación de las áreas boscosas y cultivos tradicionales, mientras que estas últimas son "estables" en el tiempo debido a los manejos culturales.

Tabla 10. Estructura del paisaje en 2017

COBERTURA	CA			NP			LPI			PAFRAC		
	2007	**2017**	**%**	**2007**	**2017**	**%**	**2007**	**2017**	**%**	**2007**	**2017**	**%**
Pastos	25739,01	27514,35	6,9%	811	2058	153,8%	7,9906	9,0413	13,1%	1,4724	1,4551	-1,2%
Cultivos tradicionales	**21767,76**	**21942,9**	**0,8%**	**853**	**874**	**2,5%**	**7,6969**	**17,0299**	**121,3%**	**1,469**	**1,372**	**-6,6%**
Cultivos intensivos	1836,45	618,48	-66,3%	319	111	-65,2%	0,0854	0,0602	-29,5%	1,3767	1,2431	-9,7%
Áreas Boscosas	**38251,35**	**37838,34**	**-1,1%**	**638**	**1055**	**65,4%**	**36,558**	**28,2247**	**-22,8%**	**1,4264**	**1,351**	**-5,3%**
Áreas sin vegetación	366,3	46,8	-87,2%	64	18	-71,9%	0,0702	0,0303	-56,8%	1,4624	1,4064	-3,8%

AC: Área de clase (ha.); NP: Número de parches, LPI: Índice del parche más grande (*Largest Patch Index*), PAFRAC: Índice de forma, relación fractal, %: Porcentaje de de cambio

La tendencia en la permanencia de área se mantiene de forma similar para *Áreas boscosas*, *Pastos* y *Cultivos tradicionales*, no siendo así para *Cultivos intensivos* y *Áreas sin*

vegetación, en estas coberturas prevaleció más el cambio por vecindad que por la historia de ocupación, haciéndolas más dinámicas.

Para la cobertura principal de interés, las *Áreas boscosas* pierden área por transición a *Pastos*, contrario a lo esperado que fuera a *Cultivos tradicionales.* Así, se estimó una pérdida de cerca del 6% hacia pastos y mientras que se registró una ganancia por parte de *Cultivos tradicionales*, *Cultivos intensivos* y *Áreas sin vegetación*. Los *Cultivos tradicionales* pierden cerca de 7% de su área original por recuperación a áreas boscosas, eventos que pueden suceder por recuperación de bordes o abandono de cultivos, pero a su vez es ganada por transiciones de las demás coberturas.

Las coberturas que exhiben transiciones por pérdida son los *Cultivos intensivos* y las *Áreas sin vegetación*, esta última según la simulación disminuye (Ver tablas 11 y 12)

Espacial y cuantitativamente se observa una homogenización del paisaje dado por la dominancia de áreas boscosas, cultivos tradicionales y pastos así como de la participación del sus parches más grandes, los dos últimos usos se caracterizan por ser de mayor productividad y tradicionalidad en la región (ver figura 22).

La pérdida de bosques entre 2007 y 2017 se ubica espacialmente en los bordes de los fragmentos generalmente colindantes con pastos, dichos cambios se presentan en las vertientes medias de la cuenca (Ver figura 23).

Tabla 11. Matriz de transición por área (ha) entre 1997 y 2007.

		AÑO 2017					
		Pastos	**Cultivos tradicionales**	Cultivos intensivos	**Áreas Boscosas**	Áreas sin vegetación	**TOTAL ÁREA 2007**
AÑO 2007	Pastos	**24659,62**	**1080**				25739,6
	Cultivos tradicionales		**20255,45**		1511		21766,5
	Cultivos intensivos	**442**	**440**	618,48	336		1836,5
	Áreas Boscosas	**2307**			**35944,52**		**38251,5**
	Áreas sin vegetación	**106**	**167**		47	46,8	366,8
	TOTAL AREA 2017	**27514,62**	**21942,45**	618,48	37838,52	46,8	87960,87

Tabla 12. Matriz de transición por porcentaje entre 2007 y 2017.

		AÑO 2017					
		Pastos	Cultivos tradicionales	Cultivos intensivos	**Áreas Boscosas**	Áreas sin vegetación	**% ÁREA 2007**
AÑO 2007	Pastos	96	4	0,0	0,00	0,00	100
	Cultivos tradicionales	0,00	93	0,0	7	0,00	100
	Cultivos intensivos	24	24	34	18	0,00	100
	Áreas Boscosas	**6**	**0,0**	**0,0**	**94**	**0,00**	**100**
	Áreas sin vegetación	29	46	0,0	13	13	100

De este análisis se destaca que los fragmentos de bosque o áreas naturales que permanecieron desde 1986 al 2007, y que según la simulación aún permanecerían en el paisaje al año 2017. Estos fragmentos vistos a la escala de la cuenca hidrográfica enmarcan una red de zonas naturales conectadas físicamente por cultivos tradicionales, coberturas mixtas que si bien no son bosques, la estructura de estos sistemas agroforestales podría funcionar como corredor para muchas especies de aves, pequeños mamíferos e insectos. (ver Figura 24)

Así mismo, físicamente existe una barrera o interrupción de esta red por la configuración del cañón del río San Juan sobre el eje norte del paisaje, pues está la cobertura dominante son pastos. Se destaca la conservación y permanencia de la zona boscosas sobre la divisoria de aguas correspondiente a la reserva natural de los Farallones del Citará en el sector suroccidental en los municipios de Andes y Betania, así mismo, en el sector suroriental en el municipio de Jardín.

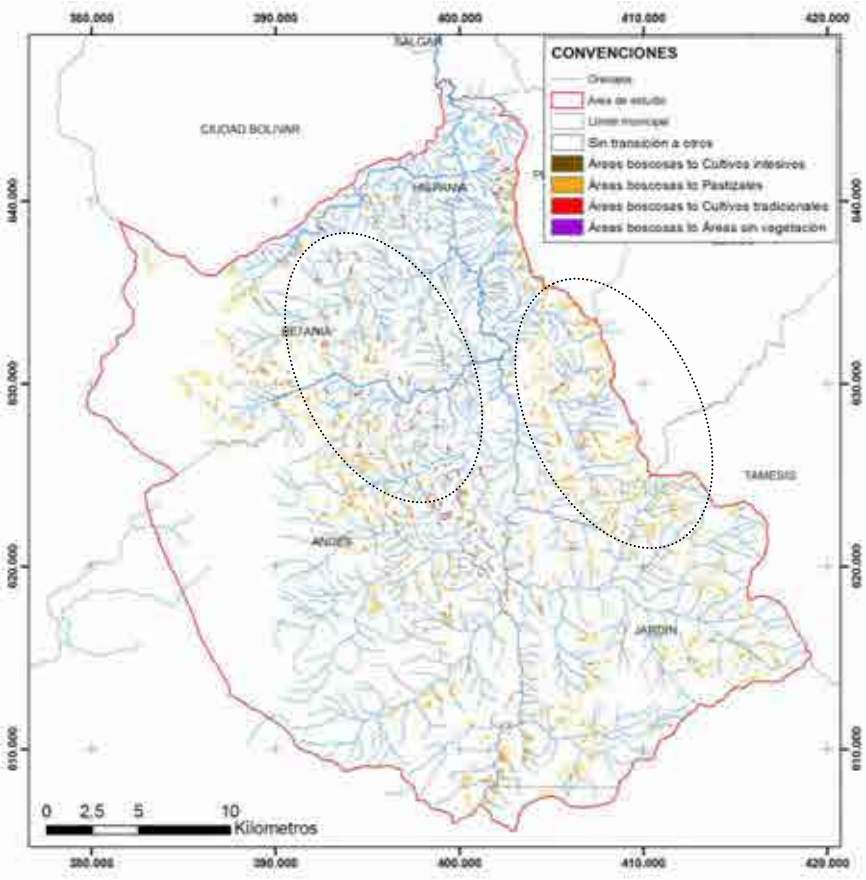


Figura 23. Mapa de transiciones de Áreas boscosas a las otras coberturas entre 2007 y 2017

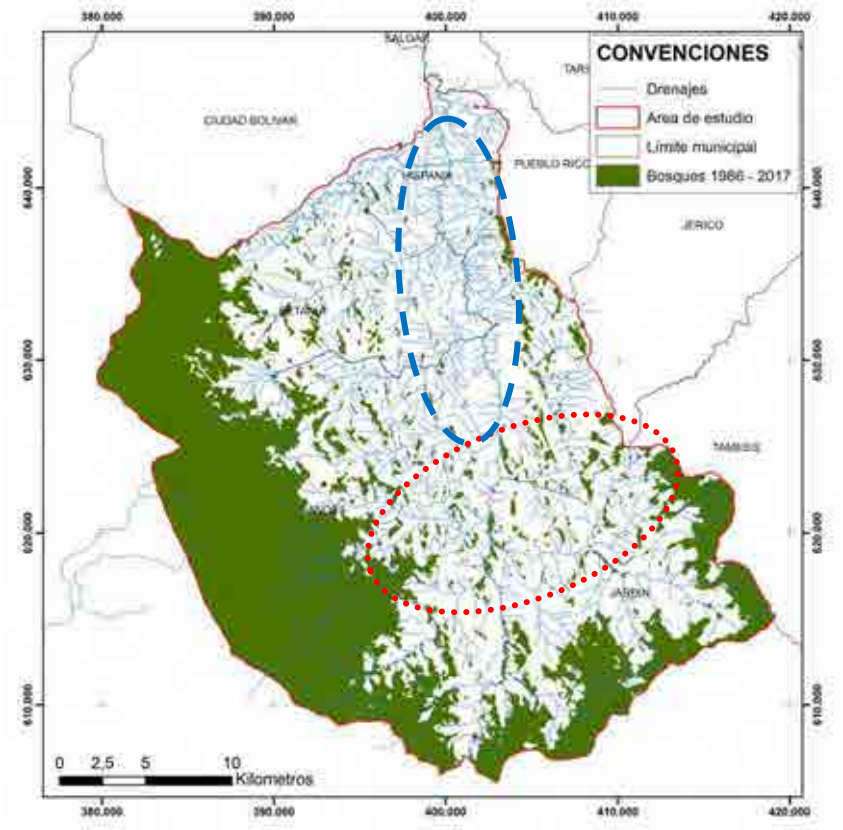


Figura 24. Mapa de permanencia de la clase Áreas boscosas a las otras coberturas entre 1986 y 2017.

Los fragmentos de bosque se ubican principalmente sobre las cimas de las montañas y alrededor de algunas quebradas, se evidencia en algunos drenajes la pérdida de esta cobertura. De esta manera es posible evidenciar las tendencias hacia un escenario futuro del paisaje y la configuración que de acuerdo a la historia se ha mantenido y es donde los esfuerzos de conservación deberían apuntar, para generar estrategias de manejo en que la producción de café y la conservación de estas áreas naturales sean sostenibles, así como en los últimos 20 años, asegurando el bienestar en un paisaje cultural cafetero.

7. DISCUSIÓN

La cuenca del río San Juan, objeto de este estudio, representa un paisaje cultural cafetero, con una sociedad y economía tradicional basada en el cultivo del café, inmerso en un mosaico de usos del suelo como la ganadería y otros cultivos mixtos. En general estos paisajes no son homogéneos a escala regional o local, por el contrario constituyen un mosaico donde se combinan actividades agropecuarias mixtas y diferentes tipos de caficultura, siendo el monocultivo, o café tecnificado, y el policultivo o caficultura tradicional las tecnologías extremas en el manejo de los cultivos (Osorio y Acevedo, 2008; Sánchez *et al.,* 2008).

En este análisis, se destacaron los *cultivos tradicionales* como una cobertura que demostró mantener la dominancia en el tiempo y su constante transición, este tipo de cultivo se caracteriza por su heterogeneidad y de acuerdo con otros estudios han mostrado el mantenimiento de la conectividad, estructura y biodiversidad similar a los bosques con alto grado de intervención (Moguel y Toledo, 1999; Philpott y Dietsch, 2003; Rappole *et al.,* 2003; Numa *et al.,* 2005). Estos sistemas presentan tecnológicas agroforestales donde los huertos caseros, representan combinaciones de cultivos asociados con los elementos forestales acompañan al arbusto de café, de donde además se cosechan otros productos durante el año, el café es un cultivo permanente y que da soporte económico, social y cultural al agroecosistema (Osorio y Acevedo, 2008).

Los *Cultivos intensivos*, mostraron una mayor dinámica, con tendencia a la disminución, estos son reconocidos como un cultivo que exige rotación, manejo y de mayor impacto ecológico. Según Gulh (2004), en Colombia, la superficie de café tecnificado en monocultivos pasó del 0% en 1970 al 70% en 1997, sin embargo Osorio y Acevedo (2008), indican que esta dinámica y el aumento de los cultivos intensivos no se dá en todas las regiones cafeteras, no todas las áreas se tecnificaron; pues la tradición, las aptitudes y vocación de uso de la tierra han tenido una influencia significativa en el uso actual cafetero. Simultáneamente con los cambios ambientales por el proceso de tecnificación de la caficultura, se ha dado la persistencia de formas tradicionales de producción e iniciativas investigativas en materia de gestión ambiental y agroecología, a favor de los sistemas agrícolas mixtos, en aspectos como la diversidad específica, temporal, espacial, estructural y funcional que sobresalen por su existencia al interior de los policultivos (Rappole *et al.,* 2003; Osorio y Acevedo, 2008).

El uso de la información aportada por los sensores remotos y su facilidad de adquisición como las imágenes Landsat TM y ETM+ ha incrementado el interés por estos análisis de detección de cambios y su modelación (Baker, 1989; Seto *et al.,* 2002; Boakye *et al.,* 2008; Sui *et al*., 2008; Aguayo *et al.,* 2009). En el presente estudio la información base consistió en un conjunto de imágenes satelitales Landsat TM, escenas que por su información homóloga facilitó la interpretación y extracción de las coberturas con criterios similares evitando el sesgo por la utilización de otro tipo de sensor con información a diferente escala y detalle. Lo anterior no significa que la información extra sea innecesaria, por el contrario la mayoría de estudios en el tema, enfatizan que el uso de información complementaria es de gran utilidad y además aporta variables explicativas que enriquecen el modelo espacial, teniendo en cuenta la estandarización de los datos a la escala adecuada del análisis.

En la metodología utilizada, un proceso importante fue la clasificación de las imágenes para obtener los mapas de coberturas en cada año, este proceso estuvo guiado por la resolución y calidad de la imagen así como el reconocimiento en campo y puntos de control del terreno. De acuerdo con el índice kappa, se encontró la confusión entre las firmas espectrales de las *Áreas boscosas* y los *Cultivos tradicionales*, principalmente en zonas más heterogéneas donde los parches de bosques estaban inmersos en la matriz de cultivos mixtos, estos últimos por lo general poseen una estructura y dosel similar a las coberturas boscosas, en este proceso los puntos de control definieron realmente la diferenciación entre estas dos coberturas. Gulh (2009), en un análisis en imágenes SPOT, de mejor resolución espacial, reafirma la confusión entre estas dos coberturas, sugiere una interpretación y clasificación manual, así como, el uso de censos en las fincas y puntos de control.

La dinámica del paisaje estudiada a partir de la detección de los cambios o transiciones entre las coberturas evidenció tendencias en la configuración de las coberturas en los 20 años de análisis, así:

a) Las *áreas boscosas* presentaron una tendencia inicial a la fragmentación con disminución en el área total y aumento en el número de parches. Esta pérdida o transición entre coberturas principalmente fue hacia *cultivos tradicionales* en sitios específicos como los bordes de los bosques y quebradas.

   Además, mantiene la dominancia del parche más grande del paisaje sobre las demás coberturas, éste se ubica en el sector suroccidental del paisaje y corresponde a la reserva natural de los Farallones del Citará, que ha sido presionado en sus bordes por la expansión de la frontera agrícola aún en zonas con altas pendientes.

   En los últimos 10 años de análisis se muestra la recuperación de zonas inmersas o cercanas a las grandes masas boscosas, estos resultados están indicando la pérdida de parches pequeños aislados y cierta recuperación de bordes que por lo general son áreas de protección de quebradas, abandono de tierras o el producto de políticas de protección ambiental. Estudios de cambio de coberturas en el suelo entre 1979 y 2003, en Colombia, demostraron que los bosques naturales no presentaron variaciones o pérdidas significativas, pero evidenciaron una alta dinámica de transformación de coberturas, donde se presentan cambios hacia rastrojos o pastizales, aspecto que refleja aumento de los procesos de fragmentación en los bosques tropicales (González y Toro, 2008).

b) Los *cultivos tradicionales* presentaron un comportamiento inverso a las *coberturas boscosas*, con una tendencia al aumento del área total y disminución del número de

parches, generando una cobertura contínua en el paisaje, aumentando su dominancia en la parte media de la cuenca. Es la cobertura que mantiene el 100% de la cobertura inicial y por transición recibe área de otras coberturas. Gulh (2009), indica para la zona cafetera de Santander (nororiente de Colombia), esta cobertura constituye una de las más frecuentes en paisajes cafeteros, es un uso del suelo de manejo tradicional de largo plazo y permite la diversificación de los productos.

c) Los *cultivos intensivos* presentan una disminución en todas las métricas indicando una pérdida de área por transición de coberturas, hacia cultivos tradicionales y hacia áreas sin vegetación, sin embargo obtuvo área por parte de los pastos, evidenciando así su dinámica en la rotación del uso de la tierra patrón común en estos tipos de cultivos.

   Es la cobertura más dinámica ya que su proceso de renovación y cambio es necesario en el termino de 8 - 10 años, tiempo en el cual el *Cultivo intensivo* es productivo, luego debe ser renovado mientras tanto se siembran otros productos (cultivos cortos, huertos leñeros...etc), actividades que eliminan por completo la cobertura del suelo y cambian de cultivo para "hacer descansar la tierra". Este ciclo hace que la tendencia de la cobertura sea más dinámica y por la espacialidad temporal de este análisis no se evidencie un aumento o disminución claro del cultivo en la región. Gulh (2004), indica que entre 1970 y 1997 el porcentaje del área sembrada en café intensivo aumentó en todo el país, pero teniendo en cuenta que éste es un cultivo de ciclo corto, concluye que el cambio de paisaje es más rápido en zonas cafeteras con sistema de producción intensivo que con el sistema tradicional.

El comportamiento de estas coberturas y en particular para los *cultivos tradicionales*, responden a eventos y generación estrategias de diversificación de cultivos y seguridad alimentaria para la comunidad, esto debido a que el cultivo del café, necesita entre 18 y 24 meses para su primera cosecha, tiempo en el que existe la oportunidad para diversificar la producción y generar ingresos adicionales a los del café (CENICAFE[8]), a esto se adiciona los cambios en el mercado del café que hacen optar por otros cultivos de rápido crecimiento y comercio interno.

En el caso de las *coberturas boscosas*, la pérdida importante de área y fragmentación hasta 1997 contrarrestada por su recuperación en 2007, coincide con la creación de autoridades ambientales por la Ley 99 del año 1993[9], las Corporaciones Autónomas

[8] Tomado de http://cenicafe.org/modules.php?name=Sistemas_Produccion
[9] Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente. Hoy Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Regionales, que para el caso de estudio, la cuenca del río San Juan está en la jurisdicción de CORANTIOQUIA[10] territorial Citará, entidad que ha identificado los ecosistemas estratégicos como áreas de reserva o áreas protegidas, con el fin de poder incluir la conservación y manejo de estos ecosistemas en los planes de gestión de la entidad.

Así mismo, la dominancia de los cultivos tradicionales, se mantiene probablemente por el apoyo e interés por parte de actores tanto productivos como ambientales por alcanzar la sostenibilidad de la región, y establecen que "…*con la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, se tiene un convenio para contribuir a la sostenibilidad ambiental, económica y social del suroeste antioqueño y a la conservación del corredor biológico cuchilla Jardín-Támesis y Farallones del Citará, a través de la producción sostenible de cafés de conservación y de altura en los municipios de Andes, Betania, Ciudad Bolívar y Jardín. Con el convenio se pretende establecer bosques con especies nativas, renovar cultivos de café con tecnologías limpias y establecer proyectos productivos agroecológicos…*"[11]

Este tipo de sucesos e interacciones sociedad-naturaleza son las acciones moldeadoras y explicativas de los cambios más importantes observados en un paisaje cafetero con economía tradicional y a pequeña escala. De esta manera se configura un paisaje actual resultado de la historia de uso, eventos y directrices que desencadenan cambios para los cuales se desarrollan estrategias en el manejo de estos ecosistemas. Con base en lo anterior es posible simular un paisaje futuro, tal como en este estudio, donde la historia de ocupación y cambio, forzado por la vecindad o cercanía con otros usos generaron la distribución espacial más probable de las coberturas.

Así, sumado a estas matrices de Markov y la definición de reglas de cambio por vecindad, permitieron generar una red neuronal para simular un paisaje tendencial a 2017. El cual mediado por la historia de ocupación por cada cobertura y restringido por la vecindad o cercanía entre las coberturas de mayor impacto y dinámica con coberturas más estables. En cuanto a los cambios o transiciones espaciales entre las coberturas, se observa que la tendencia estimada por la matriz de transición entre el año 1997 y 2007 (Tabla 9), es coherente las transiciones y permanencia de algunas coberturas generado por la simulación, aunque cuantitativamente el paisaje estimado no es exactamente igual al generado por las matrices de probabilidad de cambio. En general, se observó un comportamiento con la tendencia esperada en la dinámica del paisaje para el año 2017.

[10] Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia.
[11] Corantioquia. http://www.corantioquia.gov.co/

Las coberturas que exhiben transiciones por pérdida son los *Cultivos intensivos* y las *Áreas sin vegetación*, esta última según la simulación disminuye; es probable que las condiciones de vecindad establecidas forzaran y determinaran este cambio, además, se debe tener en cuenta que desde un principio debido a la escala de análisis en la categoría *Áreas sin vegetación* se incluyó las áreas urbanas, lo que no sería lógico que disminuyeran su área.

Las combinaciones de estos sistemas constituyen una estrategia agrícola y una amplia gama de combinaciones al interior de diferentes arreglos agroforestales en diversidad de climas, microclimas y hábitats, que en estrecha relación con los conocimientos tradicionales y aportes institucionales, centros de investigación y productores organizados han propiciado el paisaje cafetero que existe actualmente y que históricamente se ha transformado de acuerdo a las tendencias económicas y sociales a nivel local y regional (Osorio y Acevedo 2008).

8. CONCLUSIONES

Generalmente los estudios en los ecosistemas asociados a paisajes cafeteros, se han centrado en identificar el grado de afectación que el cultivo de café tiene sobre los procesos ecológicos y la biodiversidad en un momento determinado. El estudio de la dinámica de los paisajes y por ende de estos ecosistemas, permite obtener información de la historia de ocupación y cambios que las coberturas han sufrido, de esta manera los resultados indican o complementan como variables explicativas para estos los procesos naturales observados.

En los estudios del cambio espacio-temporal del paisaje, se resalta la importancia de tener una metodología clara y lógica de acuerdo con la información base, partiendo de datos básicos y generales como las imágenes satelitales, que den cuenta de procesos y patrones a la misma escala de análisis, así mismo es necesario datos de campo e información secundaria que se complementen para explicar los cambios en la cobertura y uso de la tierra y facilitar una visión en conjunto del comportamiento de los cambios y la tendencia que presentan los mismos.

De acuerdo con los resultados en este trabajo, el comportamiento de la estructura del paisaje entre 1986 y 2007 se observa una tendencia a la homogenización de las coberturas mediante la disminución de parches y aumento de la dominancia tanto para áreas boscosas como cultivos tradicionales, así como la disminución del índice de forma generando parches con bordes más regulares.

Se destacan tres usos del suelo predominantes, estos son: las *áreas boscosas* dominando las zonas altas de la cuenca y con fragmentos dispersos en la zona media vulnerables al cambio, distribuidos en las cimas y drenajes del paisaje, los *cultivos tradicionales*

dominando la parte media de la cuenca, siendo una cobertura de manejo a largo plazo y que presentó mayor cantidad transiciones aumentando su dominancia, y los *pastos* ubicados principalmente en la parte baja de la cuenca, ejerciendo presión sobre los cultivos tradicionales y áreas boscosas de estas zonas. Es probable que el resultado de cambio observado, haya estado y siga siendo moldeado y asociado a las estrategias económicas y ambientales generadas por los actores interesados al nivel local.

La descripción del paisaje y la caracterización espacial de los cambios evidencian la pérdida de pequeños parches de *áreas boscosas* así como la fragmentación por la transición a *cultivos tradicionales*. En general la pérdida de bosques fue en promedio de 0,2% anual, y según la simulación se espera que pase al 0,3% anual, esto requiere de la atención por parte de las entidades ambientales para la protección de los fragmentos remanentes que se han mantenido inmersos en la matriz de cultivos tradicionales en los últimos 20 años y se encuentran vulnerables al cambios por la presión de las coberturas vecinas, además de la importancia de configurar redes locales de conexión ecológica entre las vertientes de la cuenca aprovechando la calidad estructural de una matriz como los cultivos tradicionales, en particular aquellos que se manejan bajo sombras mixtas.

Las cadenas de Markov, como método para el análisis de cambios de uso, resulta ser un método clave para el estudio de la dinámica de los elementos en el territorio, aportando información útil en la comparación de la cantidad de área que cambia por cobertura, responde a las preguntas *qué* y *cómo* está cambiando el paisaje, para generar propuestas de asignación de usos y actividades permisibles en la ordenación, uso del espacio y la planificación del territorio, a escala regional.

La descripción del patrón espacial del paisaje y su cambio en el tiempo, proporciona una base cuantitativa pero es necesaria la modelación espacial para responder la pregunta en *dónde* están sucediendo los cambios e indagar en estos impactos y así facilitar la gestión del paisaje en las coberturas y uso del suelo en el futuro. Una aproximación por medio de la simulación de redes neuronales permitió la integración de variables espaciales como las reglas de cambio condicionado a la vecindad y variables cuantitativas asignadas a las probabilidades de transición generada por la matriz producto del proceso de Markov. Mediante la generación de algoritmos de programación se logró espacializar e identificar el paisaje más probable.

A partir de un escenario en beneficio de la conservación y mantenimiento de las áreas boscosas existentes y la restricción para usos de mayor impacto ecológico, se estimó un paisaje que aún así demuestra la pérdida de áreas boscosas y el incremento en el área destinada a los

usos productivos. Se logró identificar los fragmentos de bosques que permanecerían y deberían ser objeto de conservación para generar las redes ecológicas que conecten las vertientes, particularmente entre los municipios de Jardín (sector sur del paisaje) y Andes (sector oriental), esta conexión entre fragmentos se facilitaría mediante los cultivos tradicionales, apoyando la diversidad de coberturas y dosel.

La dinámica de los *cultivos intensivos*, exhibe una disminución y tendencia a la pérdida de esta cobertura, aparte de evidenciar un ciclo productivo corto de este sistema de cultivo por su dinámica y manejo; se reconoce como un resultado engañoso o sesgado a la escala de análisis, pues en estos municipios predominan los minifundios y en esa medida cada propietario destina área cultivos intensivos, no es posible diferenciar estos pequeños parches a la resolución de la imagen satelital Landsat TM. Por lo tanto las zonas acá identificadas corresponden a áreas extensas, puntuales y dispersas con el apoyo de la información de campo; para este tipo de cultivos se recomendaría un análisis con mejor detalle en la información básica tanto en la escala espacial como temporal.

Así mismo, el grado de confusión entre coberturas como fue el caso de las *Áreas boscosas* y los *Cultivos tradicionales*, donde algunos pequeños fragmentos de bosque inmersos en los sistemas agroforestales quedaron dentro de esta última clase, sugieren un análisis de separabilidad con información de campo y la utilización de índices de vegetación; de esta manera, el grado de subjetividad y generalización en las coberturas que el investigador impone en el proceso en pasos iniciales, debe disminuir en la medida que aumente el nivel de detalle de la clasificación y de la información utilizada.

Es necesaria para futuros estudios la discriminación clara de las áreas urbanas, construcciones aisladas y una base cartográfica completa de vías de acceso, pues son variables importantes en el análisis de procesos del cambio como variables impulsadores de este. Metodológicamente, este estudio demuestra la importancia de la integración de diversas series de datos temporales y de hacer contrastantes escenarios futuros basados en matrices de transición y reglas de vecindad propiciadas por estrategias o políticas de manejo y uso del suelo sobre la región. A fin de mejorar el presente análisis, los modelos espacialmente explícitos deben ser desarrollados bajo un conocimiento más preciso de la dinámica de cambio, mediante variables sociales, ambientales, económicas y que logren un mejor diagnóstico de las zonas más vulnerables al cambio.

9. BIBLIOGRAFÍA

AAVIKSOO K. 1995. Simulating vegetation dynamics and land use in a mire landscape using a Markov model. *En*: Landscape and Urban Planning. Vol 31. Pp: 129 – 142.

AGUAYO M., PAUCHARD A., AZÓCAR G. y PARRA O. 2009. Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *En*: Revista Chilena de Historia Natural Vol.82. Pp:361-374.

BAKER, W. 1989. A review of models of landscape change. *En*: Landscape Ecology. Vol 2. N2. Pp: 111 – 133.

BAKER, P.S; DUQUE O., H. 2007. Guía para la caficultura sostenible en Colombia. Un trabajo articulado con los caficultores, extensionistas y la comunidad. Chinchiná – Colombia, Cenicafé. Pp: 312.

BASTIAN O. 2001. Landscape Ecology – towards a unified discipline?. *En*: Landscape Ecology 16. Pp: 757–766.

BERMÚDEZ R.T., PÁEZ G., VELÁSQUEZ S., MOTTE E. 2000. Cambio del uso y cobertura de la tierra y la conservación del bosque en dos áreas protegidas – Costa Rica. *En*: Revista Forestal Centro Americana. Pp: 21 -26.

BOAKYE E. ODAI S. N., ADJEI K. A. ANNOR F. O. 2008. Landsat Images for Assessment of the Impact of Land Use and Land Cover Changes on the Barekese Catchment in Ghana. *En*: European Journal of Scientific Research. Vol.22 No.2 Pp: 269 – 278.

BRICEÑO V, F. 2005. Las cadenas de Markov en el análisis de cambios y asignación de usos de la tierra. *En*: Revista Geográfica Venezolana, Vol. 46(1). Pp: 35-45.

BUNCE, R.G.H. y JONGMAN R.H.G. 1993. An introduction to landscape ecology. *En*: Landscape ecology and agroecosystems. Lewis Publishers. Pp. 3-9.

BÜRGI, M., HERSPERGER A.M. AND SCHNEEBERGER, N. 2004. Driving forces of landscape change -current and new directions. *En*: Landscape Ecology. Vol. 19. Pp: 857–868.

BÜRGI M. y RUSSELL E. W.B. 2001. Integrative methods to study landscape changes. *En*: Land Use Policy. Vol 18. Pp: 9-16

CAMPBELL J. B. 2007. Introduction to Remote Sensing, 4th Edition. NY. Guilford Publications. Pp: 626.

CENICAFE. Federación Nacional de Cafeteros, Centro Nacional de Investigaciones de Café CENICAFÉ. [En Línea] < http://www.cenicafe.org/> [consulta: junio de 2009]

CHUVIECO, E. 2000. Fundamentos de teledetección espacial. Rialp, S.A. Madrid España. Pp: 568.

CORANTIOQUIA. 2004. Actualización plan de gestión ambiental regional 1998 – 2006. Subdirección de planeación y estrategias corporativas. Medellín. Pp: 354.

CORANTIOQUIA. 2008. ECODIVERSOS, Espacial Áreas Protegidas. Boletín informativo, Corporación Autonoma Regional del Centro de Antioquia, CORANTIOQUIA. Pp:12. [En línea] < www.corantioquia.gov.co > [Consulta: noviembre de 2009]

ERDAS 2002. ERDAS Field GuideTM, ERDAS®LLC, Atlanta.

ESDI. Earth Science Data Interface, Global Land Cover Facility. [En línea] <//glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp> [consulta: abril de 2009]

FLAMENCO-SANDOVAL A, MARTÍNEZ R M., MASERA O.R. 2007. Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. En: Biological Conservation 138. Pp: 131 –145.

FORMAN, R.T.T. 1995. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

FORMAN, R.T y GODRON, M. 1981. Patches and structural components for a landscape ecology. *En*: BioSciene. Vol. 31, N. 10. Pp. 733-740.

GILABERT, M.A., GONZALES-PIQUERAS, J. y GARCIA-CANO, J. 1997. Acerca de los Índices de Vegetación. *En*: Revista de Teledetección. N.8. Pp: 1-10.

GILMOUR, D. 2005. El mosaico del paisaje. En: Restaurando el paisaje forestal. Introducción al arte y ciencia de la restauración de paisajes forestales. SERIE TÉCNICA OIMT. N. 23. Pp. 45 – 54.

GONZÁLEZ M. P. & TORO L.J. 2008. Caracterización de la fragmentación de bosques en el periodo 1979-2003, en un paisaje del bosque húmedo tropical en el nordeste Antioqueño (Colombia). Memorias Seminario Internacional Bosques Tropicales y Desarrollo. Medellín, Colombia. Pp: 113.

GUHL, A. 2004. Café y cambio de paisaje en la zona cafetera colombiana entre 1970 y 1997. Cenicafé 55. N. 1. Pp: 29-44.

GULH, A. 2009. Evaluación de la cobertura boscosa en el municipio de Aratoca (Santander) Bosque, café con sombrío y certificación Rainforest Alliance. Centro Interdiciplinario de Estudios sobre Desarrollo – CIDER. Pp: 34.

GUICHÓN, M.L., ANGELINI, M.E., BENÍTEZ, A., SERAFINI, M.C., CASSINI, M.H. 1999. Caracterización ambiental de la cuenca del río Luján (Argentina) aplicando dos metodologías de procesamiento de información satelitaria. Revista de Teledetección. N.11 Pp: 1-7.

IDRISI, 2006. IDRISI Andes® Manual, Clark University.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS ALEXANDER VON HUMBOLDT, (IAvH). **2008.** Línea de investigación en Paisajes. [En línea]: <www.humboldt.org.co.>. [consulta: octubre de 2008]

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS ALEXANDER VON HUMBOLDT, (IAvH). **2008.** Proyecto Andes. [En línea]: <http://andes.humboldt.org.co/mostrarpagina.php?codpage=200&id=512> [consulta: octubre de 2008]

JENSEN, J.R. 1996. Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective. Prentice Hall, New Jersey. 316 Pp.

JUNGUITO B, R.; PIZANO, D. 1991. Producción de café en Colombia. Bogotá. Ed. Nomos. Pp:300.

KOOMEN, E.; STILLWELL, J. 2007. Modelling Land-Use Change. Theories and methods. *En*: Modelling Land-Use Change. Progress and Applications. GeoJournal Library. Vol. 90. Pp: 1-21.

KOOMEN, E.; STILLWELL, J.; BAKEMA, A.; SCHOLTEN, H.J. **2007**. Modelling Land-Use Change. Progress and Applications. GeoJournal Library. Vol. 90, Pp:414

LINDENMAYER D. B., FISCHER J. 2006. Habitat fragmentation and landscape change: an ecological and conservation synthesis. Island Press, Washington D.C.

LIU D.; SONG K.; TOWNSHEND J. R.: GONG P. 2008. Using local transition probability models in Markov random fields for forest change detection. *En*: Remote Sensing of Environment Vol.112. Pp: 2222–2231

LONG H., LIU Y., WU X., DONG G. 2009. Spatio-temporal dynamic patterns of farmland and rural settlements in Su–Xi–Chang region: Implications for building a new countryside in coastal China. En: Land Use Policy. N. 26. Pp: 322–333.

LÓPEZ E, BOCCO G, MENDOZA M, DUHAU E. 2001. Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe A case in Morelia city, Mexico. *En*: Landscape and Urban Planning 55. Pp: 271–285.

McGARIGAL, K. 2002. Landscape pattern metrics. En: EL-SHAARAWI A.H. y PIEGORSCH W.W. (Eds.) Encyclopedia of environmetrics, Vol. 2. Pp. 1135-1142.

McGARIGAL, K. y ENE, E. 2001. Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure, version 3.3. Corvallis: Oregon State University.

McINTYRE, S. Y R. HOBBS 1999. A frameword for conceptualizing human effects on landscapes and its relevance to management and research models. *En*: Conservations Biology. N.13. Pp: 1282 – 1292.

MARÍN, A. L. 2005. Análisis de la conectividad estructural del paisaje en ecosistemas intervenidos de la cordillera occidental (municipios de Jardín y Andes, Antioquia). Tesis de grado Ingeniería Forestal. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Facultad de Ciencias Forestales. Pp: 70.

MELO W., L.H. y CAMACHO Ch., M.A. 2005. Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamiento de cobertura y uso de la tierra. Centro de Investigación y Desarrollo de Información Geográfica -CIAF-. Instituto Geográfico Agustin Codazzi. Pp. 156.

MOGUEL, P. y TOLEDO, V. 1999. Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems in Mexico. Conservation Biology. Vol. 13 N. 1. Pp: 11-21.

NAGENDRA, H.; MUNROE, D.K.; SOUTHWORTH, J. 2004. From pattern to process: landscape fragmentation and the analysis of land use/land cover change. Agriculture, Ecosystems and Environment. N.101. Pp: 111-115.

NUMA, C., VERDÚ, J.R., SANCHEZ-PALOMINO, P. 2005. Phyllostomid bat diversity in a variegated coffee landscape. *En*: Biological Conservation N.122 Pp: 151-158.

OLSEN L.M, DALE V. H. Y FOSTER T. **2007**. Landscape patterns as indicators of ecological change at Fort Benning, Georgia, USA. *En*: Landscape and Urban Planning. N.79. Pp: 137–149.

OSORIO V, J. y ACEVEDO T. A. (EDS). 2008. Paisaje cultural cafetero. Risaralda. Colombia. Pereira. Universidad Católica Popular del Risaralda – Universidad Tecnológica de Pereira y Corporación Autónoma Regional del Risaralda. Pp: 213 – 232.

PEÑA J., BONET A., BELLOT J., SÁNCHEZ J.R., EISENHUTH D., HALLETT S. & ALEDO A. 2007. Driving forces of land-use change in a cultural landscape of Spain. A preliminary assessment of the human-mediated influences. En: Modelling Land-Use Change. Progress and Applications. GeoJournal Library. Vol. 90. Pp: 97-115.

PÉREZ GUTIÉRREZ, C.; MUÑOZ NIETO, A.L. 2006. Teledetección: nociones y aplicaciones. Ávila. Pp: 359

PHILPOTT, S.M. y DIETSCH, T. 2003. Coffee and Conservation: a Global Context and the Value of Farmer Involvement. *En*: Conservation Biology. Vol 17 No 6. Pp: 1844-1846

PICKETT, S.T.A y CADENASSO, M.L. 1995. Landscape Ecology: Spatial Heterogeneity in Ecological systems. En: Science. Vol. 269. Pp. 331-334.

POSTGRESQL. PostgreSQL Global Development Group. [En línea] <http://www.postgresql.org/ > [consulta: abril de 2010]

POSTGIS. Extensión de soporte geográfico para los objetos de PostgreSQL. [En línea] <http://postgis.refractions.net/> [consulta: abril de 2010]

PROAVES,**2009.** Fundacion ProAves. [En linea]: < www.proaves.org.co> [consulta: octubre de 2008]

RAPPOLE, J.H; KING, D.I y VEGA J.H. 2003. Coffee and Conservation. *En*: Conservation Biology. Vol. 17 No 1. Pp: 334-336

RODRÍGUEZ, M. M. 1998. Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Jardín 1998-1999. Fase de Diagnostico, Documento Técnico. Tomo I. Pp: 313.

RUTLEDGE, D. 2003. Landscape indices as measures of the effects fragmentation: can pattern reflect process? DOC Science Internal Series 98. Pp 27. [En línea] <http://sof.eomf.on.ca/Biological_Diversity/Ecosystem/Fragmentation/Indicators/Shape/Documents/Landscape_fragmentation_%20process.pdf > [consulta: agosto de 2009]

SANCHEZ C, L.M.; VELEZ J.G.; DURAN S.M.;GARCÍA R.; BOTERO J.E. 2008. Estudio regional de la biofiversidad en los paisajes cafeteros de Santander. *En*: Boletin técnico CENICAFE. N. 31. Pp: 68.

SARABIA V, A. 1996. Cadenas de Markov. En: La investigación operativa. Universidad Pontificia Comillas de Madrid. España. Pp: 315 – 358.

SEPP, K y BASTIAN, O. 2007.Introduction: Studying landscape change: Indicators, assessment and application. *En*: Landscape and Urban Planning N.79. Pp: 125–126

SETO K. C., WOODCOCK C. E., SONG C., HUANG X., LU J., KAUFMANN R. K. 2002. Monitoring land-use change in the Pearl River Delta using Landsat TM. *En*: Int. J. Remote Sensing, vol. 23, N. 10. Pp:1985–2004.

SUI H., ZHOU Q., GONG J., & MA G. 2008. Processing of multitemporal data and change detection. *En*: Advances in photogrammetry, remote Sensing and spatial Information Sciences: 2008 ISPRS Congress Book – Li, Chen & Baltasavias (eds).

SUN H., FORSYTHE W., WATERS N. 2007. Modeling Urban Land Use Change and Urban Sprawl: Calgary, Alberta, Canada. *En*: Networks and Spatial Economics N.7. Pp: 353–376

TEILLET, P.M, STANENZ, K. y WILLIAMS, D.J. 1997. Effects of Spectral, Spatial, and Radiometric Characteristics on Remote Sensing Vegetation Indices of Forested Regions. *En*: Remote Sens. Environ. N. 61. Pp: 139-149

TURNER, M.G.; GARDNER, R.H. y O'NEILL, R.V. 2001. Landscape Ecology in Theory and Practice. Springer-Verlag New York, Inc. United States of America. Pp: 401.

TURNER II B. L., LAMBIN E. F., y REENBERG A. 2007. Land Change Science Special Feature: The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. En: Proc. Natl. Acad. Sci. USA N.104: 20666–20671. [En línea] <www.pnas.org_cgi_doi_10.1073_pnas.0800052105> [Consulta: marzo de 2009]

USGS. U. S Geological Survey, Global Visualization Viewer [En línea] <http://glovis.usgs.gov/> [consulta: mayo de 2009]

VÁZQUEZ V. G. 1997. Consideraciones ambientales para la planificación de cuencas hidrográficas en áreas de influencia cafetera en Colombia. *En*: Crónica forestal y del medio ambiente. Universidad Nacional de Colombia. Vol 12. N.1. Pp 6.

VERBURG P. H., STEEG J., VELDKAMP A., WILLEMEN L. 2009. From land cover change to land function dynamics: A major challenge to improve land characterization. *En*: Journal of Environmental Management. N.90. Pp: 1327–1335.

WANG Y, MITCHELL B. R., NUGRANAD-MARZILLI J, BONYNGE G, ZHOU Y, SHRIVER G. 2009. Remote sensing of land-cover change and landscape context of the National Parks: A case study of the Northeast Temperate Network. *En*: Remote Sensing of Environment. N.113. Pp: 1453–1461

WIENS, J.A. 1999. The science and practice of landscape ecology. En: KLOPATEK, J.M. y GARDNER, R.H. (Eds.) Landscape ecological analysis. Springer-Verlag, N.Y. Pp. 371-383.

WILLIAMS B. K. 2009. Markov decision processes in natural resources management: Observability and uncertainty. *En*: Ecological Modelling N. 220. Pp: 830–840

10. ANEXOS

Script diseñados por el profesor Jesús Andrés Cardales para la modelación:

a. Identificación de vecinos por celda

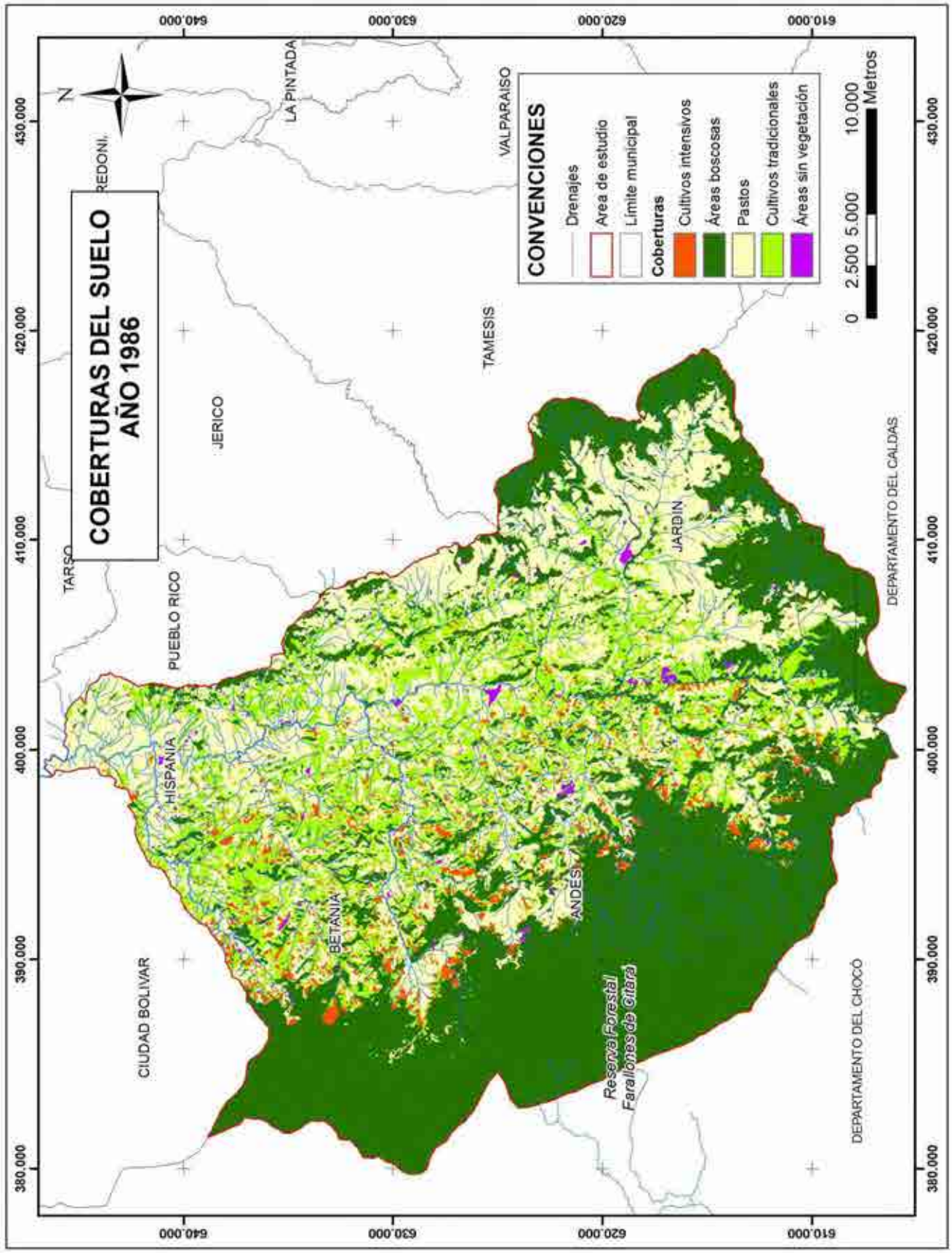
```
CREATE OR REPLACE FUNCTION gvecino()
  RETURNS character varying AS $BODY$
DECLARE
      vecinos record;
      celdas record;
      suma int;
      resta int;
      lista varchar;
      srid integer;
     BEGIN
      lista='Retorno OK!!';
      suma = 0;
      FOR celdas IN EXECUTE
       'SELECT idcelda,c2007 FROM cambio_cb'
       LOOP
        /* suma := suma + celdas.idcelda; */
        srid := celdas.idcelda;
        FOR vecinos IN EXECUTE
        'SELECT idcelda,c2007 FROM cambio_cb WHERE the_geom && ( SELECT the_geom FROM
cambio_cb WHERE idcelda = '||srid||' )'
        LOOP
        /* lista := lista || ',' || vecinos.idcelda; */
        INSERT INTO consulbo VALUES (celdas.idcelda,vecinos.idcelda,vecinos.c2007);
        /* RAISE NOTICE '% suma % id', suma, srid; */
       END LOOP;
       END LOOP;
RETURN lista;
END;
$BODY$
  LANGUAGE 'plpgsql' VOLATILE
  COST 100;
ALTER FUNCTION gvecino() OWNER TO postgres;
```

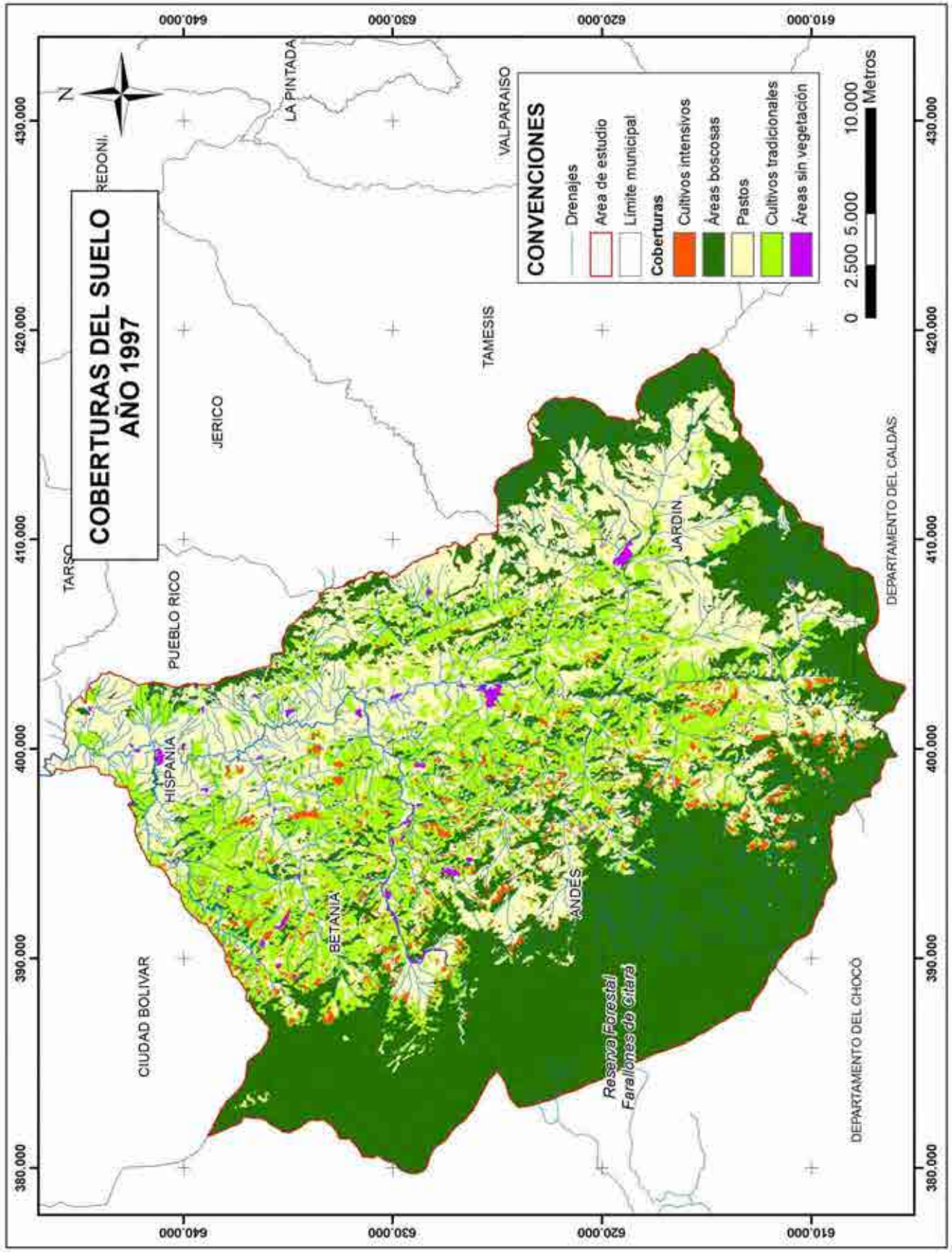
b. Creación de tabla para contar los vecinos adyacentes a la celda objetivo e indicar la cobertura más probable.

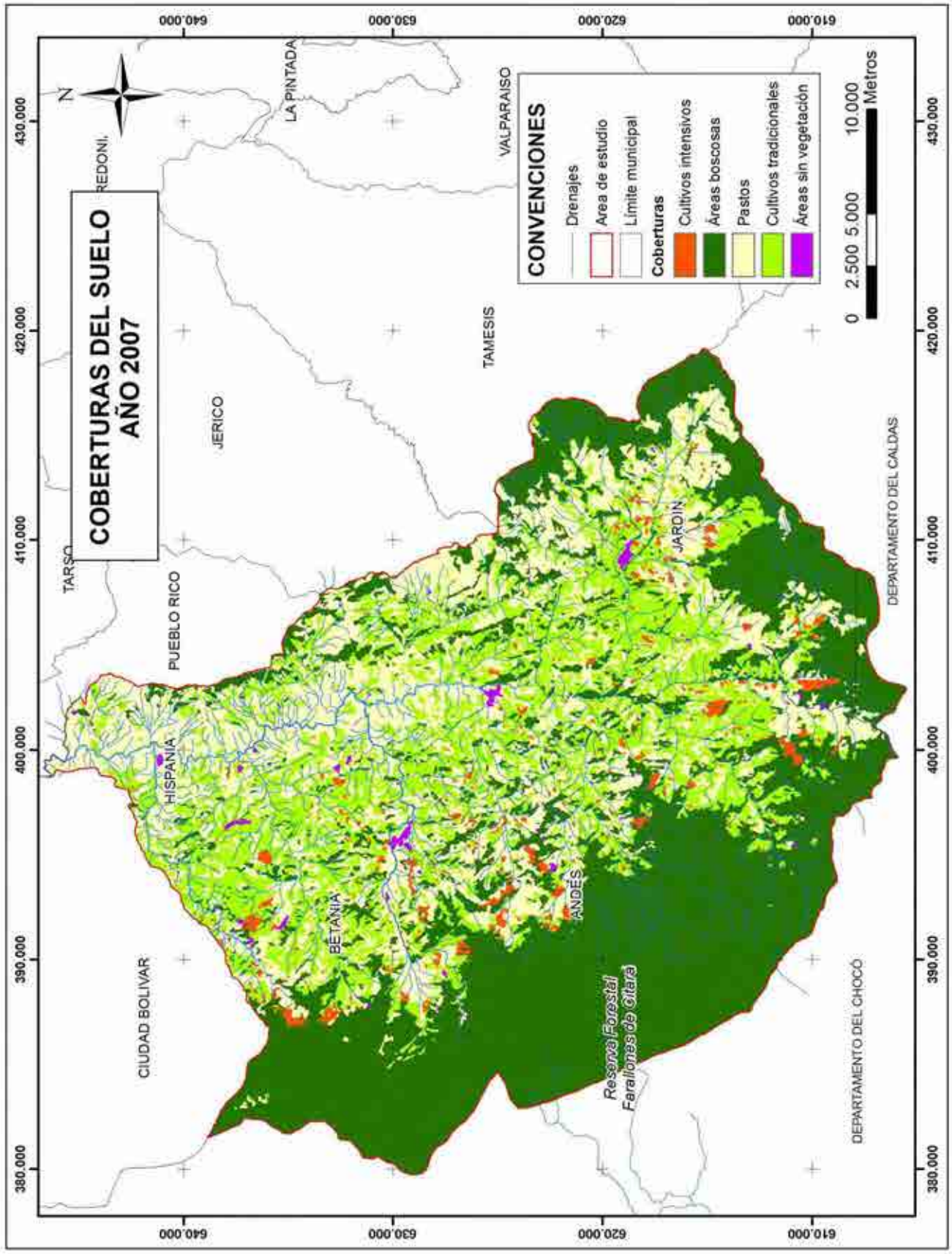
```
-- Table: cob_d17
-- DROP TABLE cob_d17;
CREATE TABLE cob_d17
(
  idcelda numeric(10),
  bos numeric(4),
  cut numeric(4),
  cui numeric(4),
  pas numeric(4),
  asv numeric(4),
  cob17 character varying(25)
)
WITH (
  OIDS=TRUE
);
ALTER TABLE cob_d17 OWNER TO postgres;
```

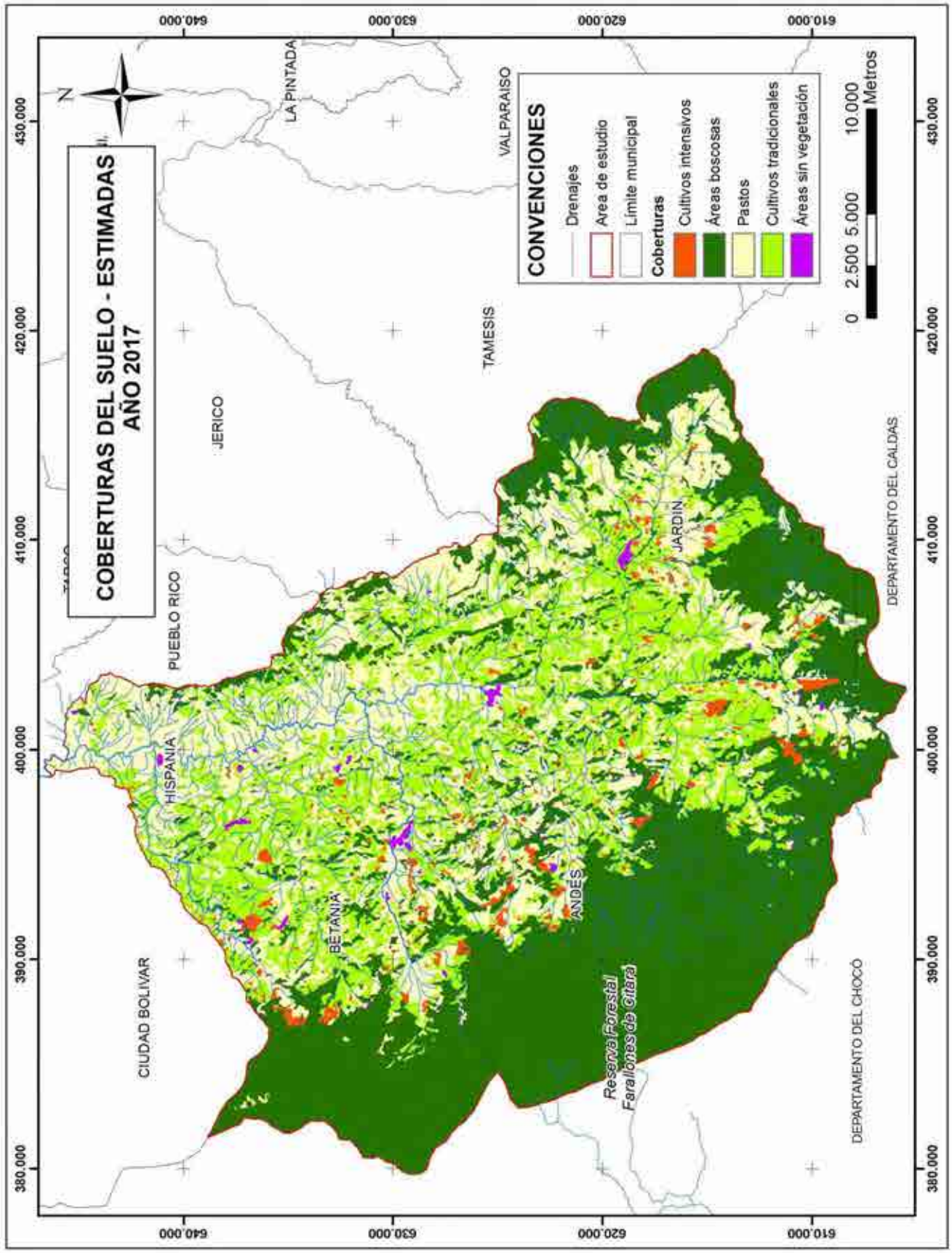
11. MAPAS

- Mapa de coberturas y usos del suelo 1986
- Mapa de coberturas y usos del suelo 1997
- Mapa de coberturas y usos del suelo 2007
- Mapa estimado de coberturas y usos del suelo 2017


COBERTURAS DEL SUELO
AÑO 1986
CONVENCIONES
Drenajes
Area de estudio
Límite municipal
Coberturas
Cultivos intensivos
Áreas boscosas
Pastos
Cultivos tradicionales
Áreas sin vegetación
0 2.500 5.000 10.000
Metros
N
LA PINTADA
VALPARAISO
REDONI.
TAMESIS
JERICO
TARSO
PUEBLO RICO
HISPANIA
BETANIA
ANDES
JARDIN
CIUDAD BOLIVAR
Reserva Forestal
Farallones de Citara
DEPARTAMENTO DEL CALDAS
DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ
610.000
620.000
630.000
640.000
380.000
390.000
400.000
410.000
420.000
430.000


COBERTURAS DEL SUELO
AÑO 1997
CONVENCIONES
Drenajes
Area de estudio
Límite municipal
Coberturas
Cultivos intensivos
Áreas boscosas
Pastos
Cultivos tradicionales
Áreas sin vegetación
0 2.500 5.000 10.000
Metros
N
LA PINTADA
VALPARAISO
REDONI.
TAMESIS
JERICO
TARSO
PUEBLO RICO
HISPANIA
BETANIA
ANDES
JARDIN
CIUDAD BOLIVAR
Reserva Forestal
Farallones de Citara
DEPARTAMENTO DEL CALDAS
DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ
610.000
620.000
630.000
640.000
380.000
390.000
400.000
410.000
420.000
430.000


COBERTURAS DEL SUELO
AÑO 2007
CONVENCIONES
Drenajes
Area de estudio
Límite municipal
Coberturas
Cultivos intensivos
Áreas boscosas
Pastos
Cultivos tradicionales
Áreas sin vegetación
0 2.500 5.000 10.000
Metros
N
LA PINTADA
VALPARAISO
TAMESIS
JERICO
TARSO
PUEBLO RICO
HISPANIA
BETANIA
ANDES
JARDIN
CIUDAD BOLIVAR
Reserva Forestal
Farallones de Citara
DEPARTAMENTO DEL CALDAS
DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ
610.000
620.000
630.000
640.000
380.000
390.000
400.000
410.000
420.000
430.000


COBERTURAS DEL SUELO - ESTIMADAS
AÑO 2017
N
CONVENCIONES
Drenajes
Area de estudio
Límite municipal
Coberturas
Cultivos intensivos
Áreas boscosas
Pastos
Cultivos tradicionales
Áreas sin vegetación
0 2.500 5.000 10.000
Metros
LA PINTADA
VALPARAISO
TAMESIS
JERICO
PUEBLO RICO
HISPANIA
BETANIA
ANDES
JARDIN
CIUDAD BOLIVAR
DEPARTAMENTO DEL CALDAS
DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ
Reserva Forestal
Farallones de Citara
610.000
620.000
630.000
640.000
380.000
390.000
400.000
410.000
420.000
430.000