

**ANÁLISIS DE PAISAJE:
EFECTO DE LAS COBERTURAS
DE LA TIERRA SOBRE LA
CONTAMINACIÓN PRODUCTO DE
LA FERTILIZACIÓN DEL CAFÉ**

*Microcuenca La Frisolera, municipio de
Salamina, Caldas*

* B.Sc. M.Sc., Especialista Técnica, Proyecto
GIA – Manos al Agua

** Ing. Ambiental, Especialista SIG, Aliado
de Plataforma Agua y Café

*** Ingeniero Agrónomo, Director, Proyecto
GIA –Manos al Agua

**** Wageningen University
and Research Environmental Research

María Angélica Montes*

Luis Fernando Urbina**

Rodrigo Calderón***

Ángel de Miguel García****

GESTIÓN INTELIGENTE DEL AGUA



Gestión Inteligente del Agua - Manos al Agua es una Asociación público privada que generó un modelo para habilitar y mejorar los sistemas para la cooperación intersectorial, la caficultura sostenible, la protección ambiental, y la toma de decisiones, que ha permitido contribuir a enfrentar los desafíos del desbalance hídrico para el sector cafetero y su cadena de valor, estableciendo condiciones ambientales, sociales y productivas para: reducir la pobreza, mejorar el bienestar rural, contribuir a la paz y alcanzar el desarrollo sostenible en la zona rural colombiana.



ANÁLISIS DE PAISAJE: EFECTO DE LAS COBERTURAS DE LA TIERRA SOBRE LA CONTAMINACIÓN PRODUCTO DE LA FERTILIZACIÓN DEL CAFÉ

Microcuenca La Frisolera, municipio de Salamina, Caldas



ECOSISTEMAS HÍDRICOS ESTRATÉGICOS

Es un Proyecto a cinco años que trabajó en los departamentos de Antioquia, Caldas, Cauca, Nariño y Valle del Cauca, con un enfoque de manejo de 25 microcuencas en función de la gestión integral del recurso hídrico, vinculando a más de 11.630 familias caficultoras, en una zona de intervención de 148.754 hectáreas.



Socios Fundadores

Roberto Vélez Vallejo
Gerente General
Federación Nacional de Cafeteros, FNC

Jean-Marc Duvoisin
CEO, Nespresso

Mark Schneider
Chief Executive Officer
Nestlé

Alejandro Gamboa Castilla
Director General
Agencia de Cooperación Internacional de Colombia
APC Colombia

Wageningen University and Research

Álvaro L. Gaitán Bustamante
Director Cenicafé

Ministerio de Asuntos Exteriores de los Países Bajos y Netherlands Enterprise Agency

Comité Directivo

Marcelo Burity
Green Coffee Development
Nestlé

Paulo Barone
Sustainability Program - Coffee
Nespresso

Charon Zondervan
Wageningen University and Research
Programme Coordinator
Environmental Sciences Group

Hernando Duque Orrego
Gerente Técnico
FNC

Director del Proyecto Manos al Agua, FNC

Rodrigo Calderón Correa

Comité Técnico Científico

Wouter Wolters
Wageningen University and Research
Environmental Research

Carlo Conforto Galli
Technical Manager Water Resources
Nestlé

Nelson Rodríguez
Investigador Científico
Cenicafé, FNC

Laura Miguel Ayala
Wageningen University and Research
Environmental Research

Comité Operativo

Ricardo Piedrahita
Strategic Sourcing and Sustainability Manager
Supply Chain
Nestlé Colombia

Santiago Arango
Green Coffee Project Manager
Nespresso Colombia

Nelson Rodríguez
Ph.D. en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Investigador Científico
Cenicafé, FNC

Equipo Administrativo, Coordinador, Científico y Técnico del Proyecto

Comité Editorial Cenicafé

Álvaro León Gaitán Bustamante
Ph.D. Director - Cenicafé

Pablo Benavides Machado
Ph.D. Ing. Agrónomo
Entomología - Cenicafé

Diana María Molina Vinasco
Ph.D. Bacterióloga
Mejoramiento Genético - Cenicafé

Carmenza Esther Góngora Botero
Ph.D. Microbióloga
Entomología - Cenicafé

José Ricardo Acuña Zornosa
Ph.D. Microbiólogo
Fisiología - Cenicafé

Paula Jimena Ramos Giraldo
Ph.D. Ing. Electrónico
Poscosecha - Cenicafé

Secretaría Técnica Comité Editorial,
revisión de textos y corrección de estilo

Sandra Milena Marín López
Ing. Agrónoma MSc

Revisión textos Proyecto GIA
Paola Castaño Aristizábal

Revisión editorial
Nelson Rodríguez Valencia
Investigador Científico
Cenicafé, FNC

Diseño y Diagramación
Julieth Sofía Veloza Beltrán

Fotografías
Archivo Cenicafé
David Bonilla Abreo

Mapas
Luis Fernando Urbiana

Tabla de contenido

	Prefacio	6
1	Introducción	9
2	Metodología para Análisis de paisaje	13
	Métricas del paisaje.....	22
	Propuesta metodológica para realizar un análisis de paisaje: paso a paso.....	21
	Paso a paso del análisis del paisaje.....	22
3	Aplicación de la metodología para análisis de paisaje en la microcuenca la frisolera, Salamina – Caldas	31
	Aplicación de la metodología propuesta: paso a paso.....	34
	Diferencia en la concentración entre el escenario GIA y el escenario inicial.....	49
	Discusión.....	57
4	Conclusiones y Recomendaciones	61
	Conclusiones.....	62
	Recomendaciones.....	63
	Bibliografía.....	64



ANÁLISIS DEL PAISAJE

El paisaje son las características visibles de un territorio, las formas de la tierra y como éstas se integran con sus características naturales y antrópicas. En este sentido, el paisaje incluye todos los elementos físicos y bióticos (topografía, recursos hídricos, coberturas de la tierra y clima), pero también incluyen los efectos del hombre en él (infraestructura, usos de la tierra, costumbres y procesos culturales, entre otros).

Para el desarrollo del análisis del paisaje en el marco de la iniciativa del Proyecto Manos al Agua-Gestión Inteligente del Agua-GIA, el paisaje se define como un territorio delineado por un actor determinado, que busca cumplir con unos objetivos específicos. En este sentido, se define como un espacio en el que las instituciones y la comunidad interactúan de acuerdo con las reglas que determinan su entorno y su interacción (Sayer *et al.*, 2013). Este territorio se definió como un sistema de cohesión y delimitación del paisaje cafetero.

El enfoque de paisaje busca proporcionar herramientas y conceptos para asignar y gestionar la tierra, con el fin de lograr objetivos sociales, económicos, ambientales y su buen gobierno, en áreas donde existen diferentes usos de la tierra y que compiten con objetivos ambientales y de protección de la biodiversidad (Sayer *et al.*, 2012), aspecto fundamental para determinar la contribución del Proyecto GIA al manejo del territorio, a través de las microcuencas cafeteras en función de la gestión integral del recurso hídrico y el manejo del paisaje.

Este enfoque implica dar el paso entre las actividades orientadas a proyectos y las actividades orientadas a procesos (Sayer y Wells, 2013), buscando que el territorio sea resiliente para afrontar los cambios, permitiendo integrar objetivos múltiples en busca de mejores beneficios. Para lograrlo, el enfoque de paisaje enfatiza en el manejo adaptativo, el compromiso y el diálogo entre las partes interesadas, y en el cumplimiento de múltiples objetivos (Sayer *et al.*, 2013); elementos fundamentales que hicieron parte de la estrategia integral del Proyecto GIA.

Este documento está dividido en tres apartados. El primero es una introducción al análisis de paisaje, haciendo énfasis en la relación entre el agua y la producción de café, así como una breve descripción de las acciones de reforestación en el marco del Proyecto GIA-Manos al Agua. El segundo apartado, hace referencia a las metodologías utilizadas para el análisis de paisaje y la propuesta metodológica específica que se propone para el desarrollo del presente estudio. El tercer y último apartado, contiene la aplicación de la propuesta metodológica para implementar un análisis de paisaje en función del efecto del uso de la tierra, en la depuración de la contaminación difusa producida por la fertilización del café, en la microcuenca La Frisolera en el municipio de Salamina – Caldas, territorio en el cual se implementó el Proyecto GIA y se dio inicio a un proceso de cambio, para entender el territorio como sistema, sus interacciones y las acciones necesarias para fortalecer el manejo de microcuencas en función de la gestión integral del recurso hídrico.



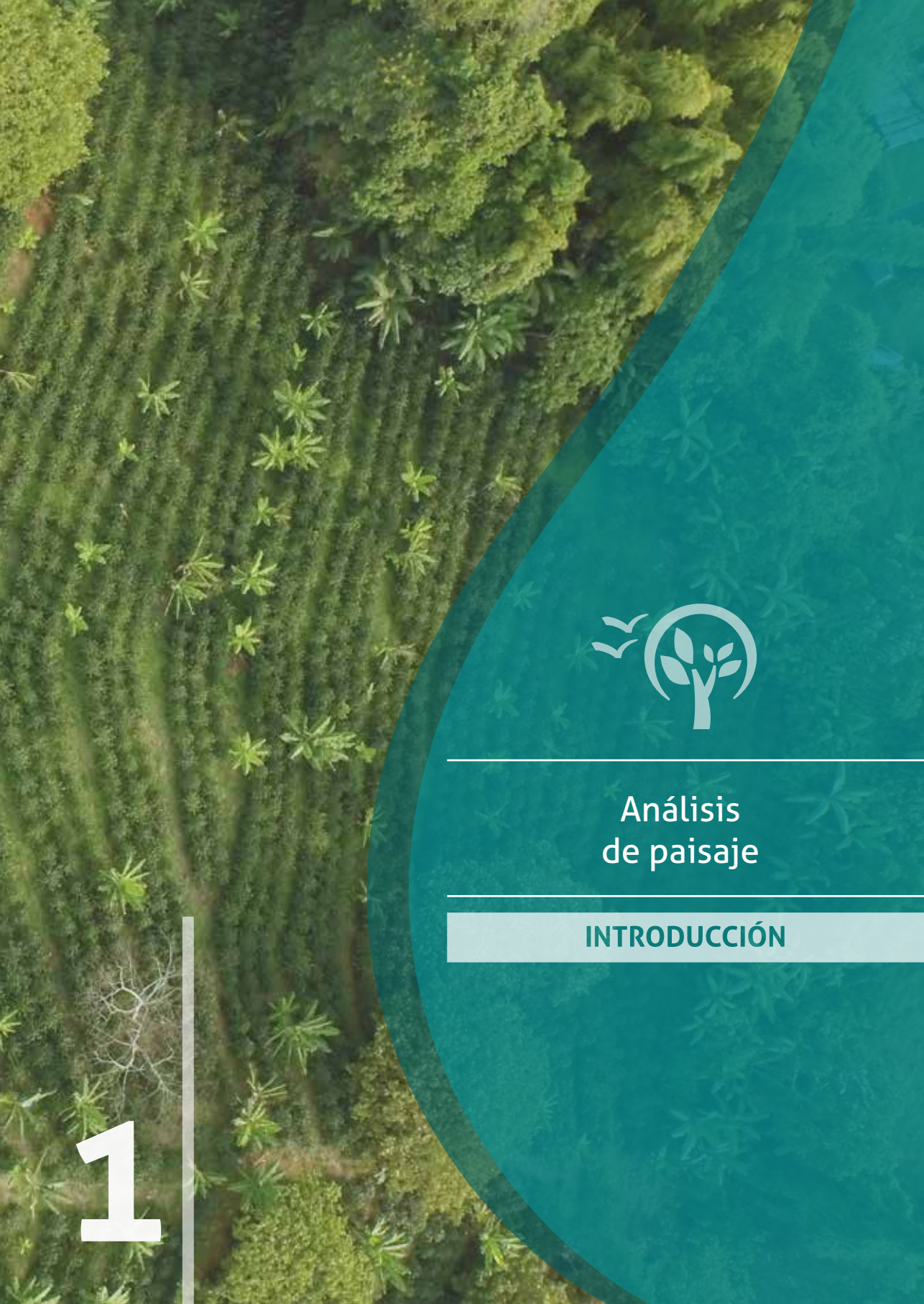
Objetivos del análisis de paisaje en el Proyecto GIA

Este estudio de paisaje busca determinar el efecto de las coberturas de la tierra en la calidad del agua de la microcuenca. De forma específica, busca entender el efecto depurador de las coberturas en la contaminación difusa producida durante la fertilización del café, para lo cual se propone una metodología de 12 pasos, cuyo objetivo es mejorar el análisis a escala de microcuenca, la toma de decisiones y la planificación del territorio desde un enfoque integral, contribuyendo a la adaptación de los paisajes cafeteros a nuevos escenarios de cambio.

Objetivos específicos:

- Definir la metodología para el análisis de paisaje en las microcuencas cafeteras
- Elaborar información de base, para el análisis de paisaje de la microcuenca La Frisolera en Salamina, Caldas (mapa de uso de suelo)
- Identificar de forma preliminar el efecto depurador de los usos de las coberturas de la tierra en la contaminación difusa producida por la fertilización del café
- Hacer una propuesta para emprender acciones futuras con un plan de reforestación específico en la microcuenca, que permita priorizar dónde realizar esfuerzos para mejorar la calidad de agua de la microcuenca
- Con base a la metodología y plan de acción planteado, establecer cuál es el impacto de las acciones propuestas en la microcuenca





Análisis de paisaje

INTRODUCCIÓN

1

Introducción al análisis de paisaje

La agricultura tal y como la conocemos está cambiando. Mientras que el propósito inicial era la producción de alimentos y materias primas, ahora se espera que los agricultores sean reconocidos como administradores del paisaje rural. Para tener credibilidad frente a los usuarios finales, la agricultura debe demostrar de forma efectiva el control de sus impactos sobre el medio ambiente (Gascuel-Odoux *et al.*, 2009).

Desde esta perspectiva, el agua es un recurso clave ya que tiene un valor tanto individual como colectivo. Grandes conflictos alrededor de la calidad de los cuerpos de agua y el agua para el consumo humano son temas que tocan a todas las personas y a todos los sectores (Gascuel-Odoux *et al.*, 2009). En este sentido, es de gran importancia identificar y ganar conocimiento sobre las características del paisaje y sus funciones como punto de partida para la apropiación en el contexto territorial y su contribución con el manejo del recurso hídrico.

Las prácticas agrícolas van cambiando el estado de la cobertura vegetal y las condiciones de la tierra. Las áreas semi-naturales se componen de parches de bosque, bosques riparios, cercas vivas y arroyos, entre otros. La infraestructura humana se superpone sobre el paisaje y comprende carreteras, infraestructura productiva y residencial,

elementos conectados más o menos unos con otros, formando superficies y redes lineales hechas por el hombre. Todas estas características tienen un efecto sobre la hidrología de las microcuencas y cuencas, la erosión y la calidad del agua, y pueden modificar el flujo y el funcionamiento hidrológico e hidro-químico.

El Proyecto Gestión Inteligente del Agua tiene como objetivo ir más allá de la implementación a nivel de finca, por medio de actuaciones transversales, para tener un impacto a nivel de microcuenca. La estrategia central del Proyecto GIA es el manejo del paisaje y del territorio, considerando el agua como el hilo conductor a través del manejo integrado de las microcuencas.

Para el logro de esta estrategia se articulan diferentes sectores y actividades dentro de un área de intervención, fortaleciendo así la resiliencia y la productividad de la región, aplicando un manejo adaptativo, donde siempre hay espacio para la mejora continua, involucrando a las partes interesadas y logrando múltiples objetivos (técnico-económicos, ambientales, sociales y de buen gobierno) a escala de paisaje.



Relación entre el agua y el paisaje

La complejidad del paisaje obliga a realizar análisis inter- y multi-disciplinarios. En este sentido, es necesario entender los vínculos entre los diferentes usos de la tierra y las funciones del agua, debido a que el agua juega un papel fundamental en el ecosistema. Es por eso que el manejo integrado del agua debe incluir la integración de los aspectos relacionados al uso de la tierra; particularmente en el campo de la agricultura, donde el agua debe ser manejada en función de las necesidades de producción y el mantenimiento de las funciones del ecosistema (Falkenmark y Mikulski, 1994).

En el manejo integrado del agua deben tenerse en cuenta los elementos existentes dentro de la cuenca (Klaus-Jürgen, 2010). Una cuenca hidrográfica es un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que sus aguas dan al mar a través de un único río. Una cuenca hidrográfica es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada divisoria de aguas. En este sentido, el paisaje está influenciado por el ciclo del agua y, a su vez, el ciclo del agua se ve afectado por los elementos paisaje (Figura 1).

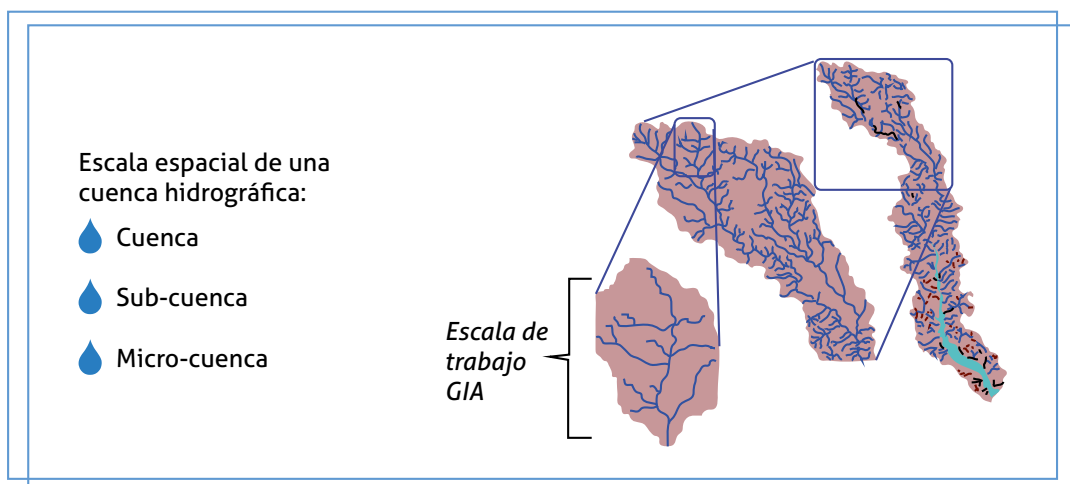


Figura 1. Escala espacial de una cuenca hidrográfica.

El paisaje se humedece desde la atmósfera y el agua retorna a ella a través de la evapotranspiración. Luego de un evento de precipitación, el exceso de agua se convierte en recarga para acuíferos y aguas superficiales. La distribución de este exceso de agua depende tanto de las condiciones físicas del suelo (suelo superficial y topografía) como de su capacidad de infiltración y el grado de saturación con agua ya infiltrada (Falkenmark y Mikulski 1994). En la Figura 2 se observa de forma esquemática el ciclo del agua, así como la relación entre éste y el paisaje.

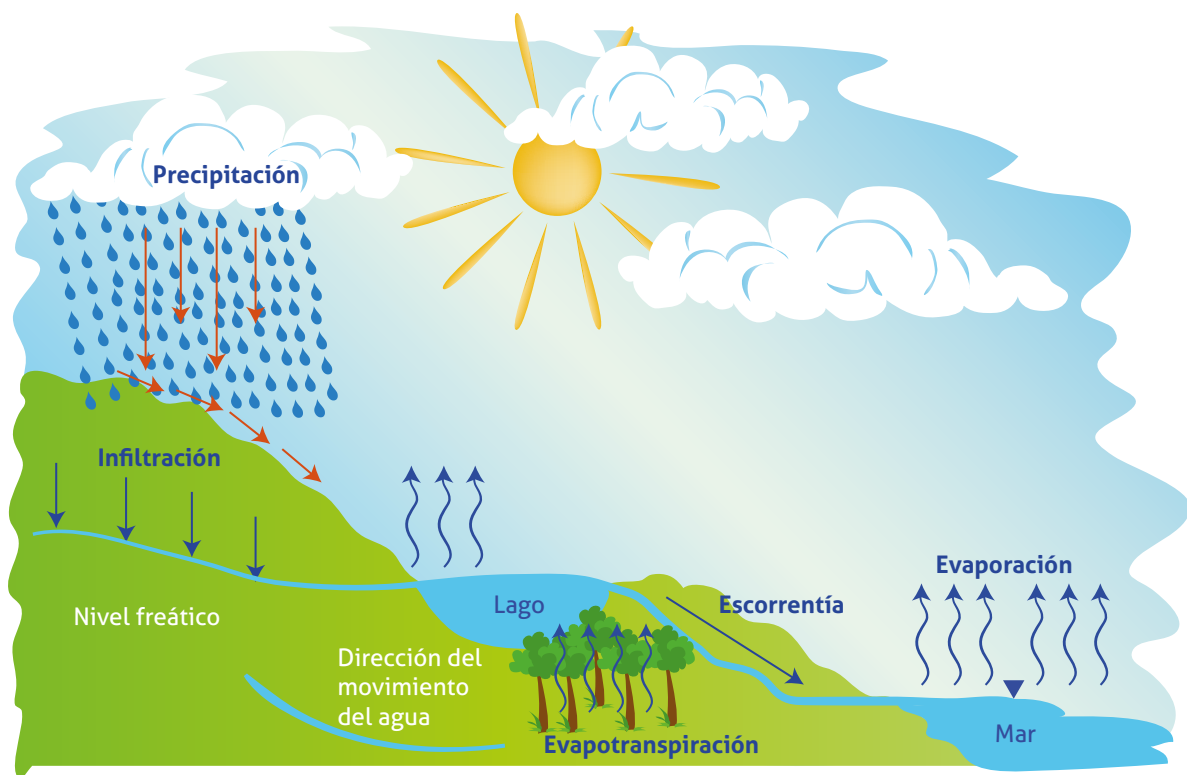


Figura 2. Esquema del ciclo del agua.

La fracción de precipitación que forma la escorrentía superficial depende de la superficie del suelo, las formas del paisaje, las coberturas vegetales y la intensidad de las lluvias. En este proceso es importante resaltar que el agua que pasa a través del paisaje está influenciada por el agua utilizada para actividades humanas, relacionadas con la urbanización, la industria, la agricultura y el turismo, entre otros. Los humanos manipulamos este ciclo de muchas formas, introduciendo químicos a la atmósfera, manipulando el suelo y la vegetación, extrayendo agua de acuíferos y ríos, e introduciendo desechos químicos y biológicos a los cuerpos de agua (Falkenmark y Mikulski 1994). En contraste, las coberturas semi-naturales y boscosas han demostrado tener la capacidad de mitigar y regular los impactos antrópicos dentro del territorio.

Relación entre el agua y la producción de café

Colombia hace parte de la mitad del mundo amenazada por la escasez de agua. A pesar de estar entre los 30 países con más recursos hídricos del mundo, se ha convertido en un país amenazado por la escasez hídrica (IDEAM, 2004), la cual se define como la disponibilidad de agua en cantidad y calidad suficiente en un momento determinado. Según el consenso creciente de los hidrólogos, un país tiene escasez de agua cuando el suministro anual de agua dulce renovable es inferior a 1.000 m³ cúbicos por persona. Esos países probablemente experimenten condiciones crónicas y extendidas de escasez de agua que han de obstruir su desarrollo. El límite crítico inferior es de 500 m³ per capita por año.

La extensión de pastos para ganadería, tierras para agricultura, cultivos ilícitos, minería, urbanización e incendios forestales, han sido la causa de la alta contaminación en las fuentes hídricas y de la pérdida de 140.000 ha de bosque en el año 2014, y de 124.000 ha en el año 2015 (González et al., 2018).

El manejo del agua es fundamental para cualquier actividad agrícola y en la producción de café su uso es de vital importancia. El impacto del cambio climático y la variación en la disponibilidad del recurso hídrico es muy importante y va a ser cada vez más importante. Es por esto que, la producción de café tiene que adaptarse de una manera proactiva a estas nuevas condiciones. A continuación, se describe de forma breve el uso del agua en el café y su efecto contaminante en la misma.

Establecimiento del cultivo café

En relación a los requerimientos hídricos, la disponibilidad hídrica es el primer factor que determina si el sistema de producción puede establecerse a libre exposición solar o bajo sombra. Para establecer un sistema de café es necesario que en una zona no existan más de dos meses consecutivos secos y lluvias inferiores a 100 mm al mes (Jaramillo *et al.*, 2011).

Debido a que la caficultura en Colombia se hace sin riego, la disponibilidad hídrica para el cultivo la determina la capacidad del suelo para retener o almacenar agua y entregarla a la planta (Cenicafé, 2013).

El uso no racional de agroquímicos afecta directamente la salud de los agricultores, los pobladores rurales, la calidad del suelo y la calidad del agua. A medida que los caficultores ignoran la fertilidad del suelo y definen planes generales para la nutrición de sus cultivos, aumentan los riesgos ambientales, ya que estarían aplicando fertilizantes desconociendo su respuesta (Cenicafé, 2013).

El tipo de contaminación que estas prácticas ocasionan se denomina **contaminación de fuente difusa** (Tabla 1), la cual se refiere a la contaminación del agua desde una fuente no puntual, sino desde fuentes como escorrentías de áreas agrícolas que drenan hacia los ríos. De ahí la importancia de conocer el estado de fertilidad del suelo, con el fin de adoptar mejores alternativas a través del uso de los análisis de suelos.

Beneficio del café

El sistema tradicional empleado para el beneficio húmedo del café requiere de altos volúmenes de agua; en promedio se utilizan 40 L de agua por cada kilogramo de café pergamino seco producido. El agua utilizada en el procesamiento del café se contamina con compuestos orgánicos de difícil degradación, específicamente cuando entran en contacto con los frutos del café, después del proceso de despulpado y arrastre del café al tanque de fermentación y en el lavado del grano (Cenicafé, 2013).

Este tipo de contaminación se denomina **contaminación de fuente puntual** (Tabla 1), la cual se define como los puntos específicos de descarga de contaminantes, así como lo es el vertimiento de las aguas mieles del café.

Ante esta realidad, Cenicafé ha desarrollado tecnologías de beneficio húmedo del café de forma eficiente. Estas tecnologías son de escala, es decir, se emplean de acuerdo a la producción y capacidad económica de cada productor, y pueden reducir el consumo de agua entre un 50% y 95% (Cenicafé, 2013).

Tabla 1. Tipos de contaminación presentes en la producción de café

Fase	Actividad	Tipo de contaminación
Cultivo	Aplicación de fertilizantes	Difusa
	Aplicación de plaguicidas	Difusa
	Aplicación de herbicidas	Difusa
Beneficio de café	Vertimiento de aguas mieles del beneficio del café	Puntual

En este libro se analiza la contaminación difusa producida potencialmente por el uso de fertilizantes en el cultivo del café, en relación con el efecto de las coberturas de la tierra y su efecto depurador de esta carga contaminante, antes de que llegue al cuerpo de agua principal.

Importancia de los usos de la tierra en la calidad de agua

Dentro de una cuenca hidrográfica la composición de las coberturas de la tierra juega un papel determinante en la calidad de agua. La tierra agrícola y la urbana o industrial, actúan como fuente de contaminantes mientras que los bosques y los humedales intervienen como sumideros de los mismos. En una cuenca, la entrada de nutrientes y sedimentos está correlacionada positivamente con el porcentaje de coberturas provenientes de la agricultura y zonas urbanas, debido a la aplicación de fertilizantes o herbicidas, o al vertimiento de efluentes de carácter urbano o industrial, mientras que los mismos están correlacionados negativamente con el porcentaje de cobertura de bosque en la cuenca (Clement *et al.*, 2017).

La proporción de bosque es el factor predominante que influye sobre los valores de calidad de agua. Por ejemplo, se ha determinado que la densidad de los bordes de bosque controla la interface con las fuentes de contaminación de la frontera agrícola, promoviendo un efecto de sumidero en la contaminación producida por la misma (Clement *et al.*, 2017); sin embargo, las interacciones entre los usos de la tierra y la calidad de agua son difíciles de analizar, debido al gran número de parámetros que deben tenerse en cuenta y la complejidad de los procesos (Kändler *et al.*, 2017). Es así como los parámetros de calidad de agua dentro de una microcuenca se ven afectados por cambios meteorológicos y condiciones hidrológicas en el espacio y en el tiempo, particularmente la precipitación y la escorrentía (Kändler *et al.*, 2017) y el uso inapropiado de la tierra puede amplificar la transferencia de nutrientes a los cuerpos de agua. Tanto la agricultura como la rápida urbanización generan una inmensa presión sobre la calidad de agua (Shi *et al.*, 2017).

De ahí la importancia de iniciar estudios que permitan entender un poco más sobre la composición y configuración del paisaje cafetero e identificar sus efectos en la calidad de agua, con el fin de optimizar la planificación y gestión del territorio.

Efecto de la cobertura de bosque en los procesos hidrológicos

El efecto de las coberturas boscosas puede variar dependiendo no solo de las condiciones atmosféricas y climáticas presentes en una zona específica, sino de los objetivos que se tengan dentro de ese territorio. En la Tabla 2 se resumen los efectos tanto positivos como negativos de las coberturas boscosas y la escala a la cual se presentan estos efectos y otros factores que afectan los patrones y flujos del agua dentro de un territorio.

Tabla 2. Efectos positivos y negativos de la cobertura de bosque en los procesos hidrológicos.

Efectos positivos	Escala	Referencia
Los bosques en las cuencas de suministro de agua son la mejor solución para reducir los riesgos de contaminación. La cubierta forestal en la cuenca situada más arriba del río principal es la mejor opción para limitar la contaminación. En la mayor parte de los usos forestales no hay escurrimientos de fertilizantes, plaguicidas o combustibles fósiles, ni desagüe de aguas residuales o procesos industriales.	Local	FAO, 2009
La vegetación riparia ayuda a estabilizar los bancos y así restringir el movimiento del curso del río.	Local	Murray y Paola, 2003
Una alta proporción de bosque dentro de una cuenca proporciona un efecto estabilizador en la variación de los flujos del agua.	Local	de la Crétaz y Barten, 2007
El alto flujo de agua en tierras bajas se debe a las altas capacidades de infiltración en las coberturas boscosas. La alta infiltración, a su vez, reduce la energía y el volumen del flujo de la corriente. Cuando proporciones significativas de cuencas hidrográficas se destinan a usos agrícolas o urbanos, el volumen y la velocidad del flujo de agua aumentan y se producen cambios rápidos en los flujos del agua.	Local	Schoonover <i>et al.</i> , 2006; de la Crétaz y Barten 2007; Nagy <i>et al.</i> , 2011
La influencia de la conversión de coberturas de bosque a coberturas agrícolas y urbanas son persistentes y los lechos de los ríos están continuamente sujetos a velocidades y volúmenes de agua más elevados. Como resultado se produce la incisión del canal. Los canales más profundos son susceptibles a inundaciones excesivas y, en consecuencia, las zonas ribereñas se desconectan hidrológicamente de los flujos adyacentes.	Local	Schoonover <i>et al.</i> , 2006; de la Crétaz y Barten 2007; Hupp <i>et al.</i> , 2009; Groffman <i>et al.</i> , 2003
La desconexión entre las corrientes y las llanuras aluviales conduce a la degradación de la función de filtración de agua, ya que las oportunidades para las interacciones físicas y químicas entre las llanuras aluviales y el flujo laminar se vuelven más limitadas.	Local	Lockaby <i>et al.</i> , 2008, Hupp <i>et al.</i> , 2009
Con la alta evapotranspiración de la cobertura boscosa, el aire húmedo se extrae de la costa que se levanta y se condensa, forma nubes y cae como precipitación, lo que permite que los interiores continentales mantengan regímenes de alta precipitación.	Regional	Sheil y Murdiyarso, 2009
Existen indicios de que el manejo forestal tiene el potencial de exacerbar o amortiguar los efectos del cambio climático en el rendimiento del agua dependiendo de la naturaleza de la técnica de manejo.	Regional	Ford <i>et al.</i> , 2011
Las prácticas de reforestación pueden ser beneficiosas para mejorar la función del ecosistema, por ejemplo: los bosques aumentan la infiltración, disminuyen la erosión y reducen la contaminación del agua.	Regional	Pizarro <i>et al.</i> , 2006; Sun <i>et al.</i> , 2006
Los bosques ribereños abastecen a los ríos con material orgánico que es crítico en la red alimentaria acuática.	Regional	Naiman <i>et al.</i> , 2005, Sun <i>et al.</i> , 2006

Continúa...

...Continuación

Efectos negativos	Escala	Referencia
Con la reforestación se reducen el rendimiento y el escurrimiento de agua. Cuando se tala el bosque se disminuye la evapotranspiración y aumenta el contenido de agua en el suelo, incrementando así el flujo superficial del agua (la disminución del flujo de agua después de la reforestación puede no ser permanente, con rotaciones a largo plazo).	Regional	Douglass y Swank, 1972; Bosch y Hewlett, 1982; Zhang <i>et al.</i> , 1999; Andréassian, 2004; Bruijnzeel, 2004; Farley <i>et al.</i> , 2005; Jackson <i>et al.</i> , 2005; Sun <i>et al.</i> , 2006; de la Crétaz y Barten 2007; Trabucco <i>et al.</i> , 2008
El clima influye en la respuesta del rendimiento del agua a los cambios en la cubierta forestal. El régimen climático debe considerarse al implementar cambios en la cobertura forestal para anticipar los efectos en el ciclo hidrológico.	Regional	Nagy y Lockaby, 2011

Factores que influyen los patrones y flujos del agua

Tipo de suelo y clima

Pendiente o gradiente altitudinal

La capacidad de erosión del lecho del río depende de las propiedades de los sedimentos

El contexto topográfico de un sitio es clave en la restauración del bosque, ya que influye en el régimen hidrológico e integra los efectos acumulativos de las perturbaciones de las cuencas hidrográficas

El potencial de los esfuerzos de restauración en el sitio puede verse limitado si la ubicación está sujeta a importantes impactos fisicoquímicos e hidrológicos, provenientes de una variedad de actividades aguas arriba

Los efectos de los bosques en los procesos hidrológicos pueden ser variables y son altamente específicos del sitio

Las zonas de bosque ripario tienen múltiples beneficios a diferentes niveles: reducen la escorrentía superficial y la erosión del suelo al lado del río, hacen retención de sedimentos y captación de nutrientes, alterando las condiciones biológicas, generando sombra, moderando así la temperatura, aumentando la complejidad del hábitat, la disponibilidad de alimento y, a mayor escala, proveyendo de corredores para el movimiento de biota, aumentando la diversidad a escala de paisaje y contribuyendo al mantenimiento de la calidad del agua (Shi *et al.*, 2017).

Por todo lo anterior, y si el objetivo es mejorar la calidad del agua, en la planeación espacial del paisaje, es importante aumentar la complejidad de los bordes de relictos boscosos, aumentar la conectividad entre parches y reducir la fragmentación de los bosques riparios.

Zonas de protección forestal en Colombia

En Colombia para los bosques riparios se tiene el Decreto 1449 de 1977, en donde el Ministerio de Agricultura establece dentro del artículo 3 del documento, la protección y conservación de los bosques, obligando a los propietarios de predios a mantener en cobertura boscosa dentro del predio las Áreas Forestales Protectoras. Se entiende por Áreas Forestales Protectoras:

- a. Los nacimientos de fuentes de aguas en una extensión por lo menos de 100 metros a la redonda, medidos a partir de su periferia.
- b. Una faja no inferior a 30 metros de ancho, paralela a las líneas de mareas máximas, a cada lado de los cauces de los ríos, quebradas y arroyos, sean permanentes o no y alrededor de los lagos o depósitos de agua.
- c. Los terrenos con pendientes superiores al 100% (45°).

Acciones de reforestación en el marco del Proyecto GIA

Dentro del Proyecto GIA se definió un plan de trabajo de reforestación con fines de conservación y protección de las fuentes hídricas en la microcuenca La Frisolera, Salamina-Caldas. Las siembras, utilizando especies nativas, se iniciaron en el año 2015 bajo dos esquemas de implementación. Las primeras siembras se hicieron entregando incentivo económico y, posteriormente, después de un proceso de sensibilización y formación en todo lo relacionado con el uso y la importancia de los bosques, se realizaron siembras voluntarias a petición de los participantes de dicho plan de trabajo.

Para este estudio se tuvieron en cuenta las siembras realizadas dentro del plan de reforestación del Proyecto GIA a corte de junio de 2017. Cabe resaltar que, estas siembras aumentarán hasta la finalización del proyecto en junio de 2018 (implementaciones que no harán parte de este análisis).

Hasta junio de 2017, el Proyecto GIA sembró 15,5 ha de la microcuenca La Frisolera, con más de 10.341 árboles nativos. En las Tablas 3 y 4 se observan las herramientas de paisaje utilizadas y las especies de árboles nativos sembrados.

Tabla 3. Herramientas de manejo de paisaje usadas en la implementación del Proyecto GIA.

Modelos forestales
Conservación de bosques naturales – sin cerco
Conservación de bosques naturales – con cerco
Mini-corredores – con cerco
Cercas vivas – siembras lineales
Enriquecimiento de bosques

Tabla 4. Especies de árboles nativos sembrados durante la implementación de Proyecto GIA.

Nombre común	Nombre científico
Arboloco	<i>Montanoa quadrangularis</i>
Arrayán	<i>Myrcia popayanensis</i>
Balso blanco	<i>Heliocarpus americanus</i>
Barcino	<i>Calophyllum sm.</i>
Búcaro	<i>Erythrina fusca</i>
Cámbulo	<i>Erythrina poeppigiana</i>
Carbonero	<i>Albizia carbonaria</i>

Continúa...

...Continuación

Nombre común	Nombre científico
Cedro altura	<i>Cedrela montana</i>
Cedro de la India	<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>
Cedro negro	<i>Juglans neotropica</i>
Cedro rosado	<i>Cedrela odorata</i>
Chachafruto	<i>Erythrina edulis</i>
Chocho	<i>Erythrina rubrinervia</i>
Drago	<i>Dracaena draco</i>
Gualanday	<i>Jacaranda caucana</i>
Guamo churimo	<i>Inga spuria</i>
Guamo santafereño	<i>Inga sp.</i>
Guamo machete	<i>Inga densiflora</i>
Guayacán amarillo	<i>Tabebuia chrysantha</i>
Guayacán de Manizales	<i>Lafoensia puniceifolia</i>
Guayacán rosado	<i>Tabebuia rosea</i>
Guásimo	<i>Guazuma ulmifolia</i>
Laurel	<i>Ocotea lentii</i>
Leucaena	<i>Leucaena leucocephala</i>
Mantequilla	<i>Aegiphila mollis</i>
Matarratón	<i>Gliricidia sepium</i>
Membrillo	<i>Gustavia speciose</i>
Mestizo	<i>Cupania cinerea</i>
Molinillo	<i>Magnolia hernandezii</i>
Montefrío	<i>Alchornea latifolia</i>
Nogal	<i>Cordia alliodora</i>
Nacedero	<i>Trichanthera gigantea</i>
Niguito	<i>Miconia lehmannii</i>
Nispero	<i>Erybotrya japonica</i>
Tambor	<i>Schizolobium parahybum</i>
Vainillo	<i>Senna spectabilis</i>
Yarumo	<i>Cecropia sp.</i>







Análisis de paisaje

**METODOLOGÍA PARA EL
ANÁLISIS DE PAISAJE**

2

Metodología para el análisis de paisaje

El análisis del paisaje es un proceso complejo, debido a que implica tener en cuenta diversas variables a diferentes escalas. En este sentido, las metodologías dependen de los objetivos buscados y de las preguntas que se quieren responder. Una forma de estudiarlo es mediante las métricas del paisaje.

Métricas del paisaje

Las métricas del paisaje son algoritmos que cuantifican las características espaciales de parches, clases de parches o mosaicos enteros de paisaje (McGarigal y Marks, 1995). Los estudios en ecología del paisaje se ocupan de determinar las causas, consecuencias e importancia funcional de la heterogeneidad espacial. Para lograr esto se requiere de métodos sólidos que cuantifiquen los patrones espaciales, en los cuales se usan numerosas métricas disponibles en programas de computador fáciles de usar; sin embargo, el objetivo de la ecología del paisaje no es simplemente medir los patrones de paisaje, el análisis de patrones espaciales es una herramienta para interpretar fenómenos y relaciones que forman los paisajes.

Las métricas del paisaje tienen diferentes efectos a diferentes escalas, sugiriendo que la planeación del manejo del recurso hídrico necesita adoptar una perspectiva multi-escala (Shi *et al.*, 2017). En este sentido, diferentes anchos de borde de bosque ripario tienen diferentes efectos en la depuración de agua del río. Un estudio realizado en Canadá comparando las zonas riparias de tres microcuencas llegó a la conclusión que el ancho de un bufer¹ efectivo puede variar entre 8 y 175 m (Sliva y Williams, 2001). Otros investigadores han encontrado que una alta conectividad de parches a nivel de paisaje reduce las cargas contaminantes (Ou *et al.*, 2016).

Con respecto a los patrones espaciales, el tamaño, la densidad, la agregación y la diversidad de las unidades del paisaje son características significativas del uso de la tierra que impactan la calidad de agua de los ríos (Shi *et al.*, 2017). A mayor complejidad del paisaje mayor retención de nutrientes. En particular, los cultivos y las áreas residenciales tienen bordes derechos (lineales) y bien definidos, mientras que coberturas más naturales como los pastos y los bosques se caracterizan por formas y bordes irregulares (Shi *et al.*, 2017). La contaminación del agua se relaciona positivamente con la densidad de relictos boscosos. Un alto grado de densidad de relictos boscosos refleja pequeños parches de cobertura dentro de una cuenca, lo que puede ocasionar erosión del suelo y escorrentía superficial (Shi *et al.*, 2017). En general, se asocia una mejor calidad de agua con la dominancia de coberturas de bosque, y la calidad del agua contaminada usualmente ocurre en paisajes fragmentados (Shi *et al.*, 2017).

En la Tabla 5 se presentan algunas métricas del paisaje y su relación con la calidad de agua del río. Para efecto de este estudio únicamente se tendrán en cuenta las densidades de borde y de parches y el índice de agregación.

¹Zona de proximidad existente a un determinado objeto geográfico

Tabla 5. Métricas del paisaje relacionadas con la calidad del agua (Shi et al., 2017).

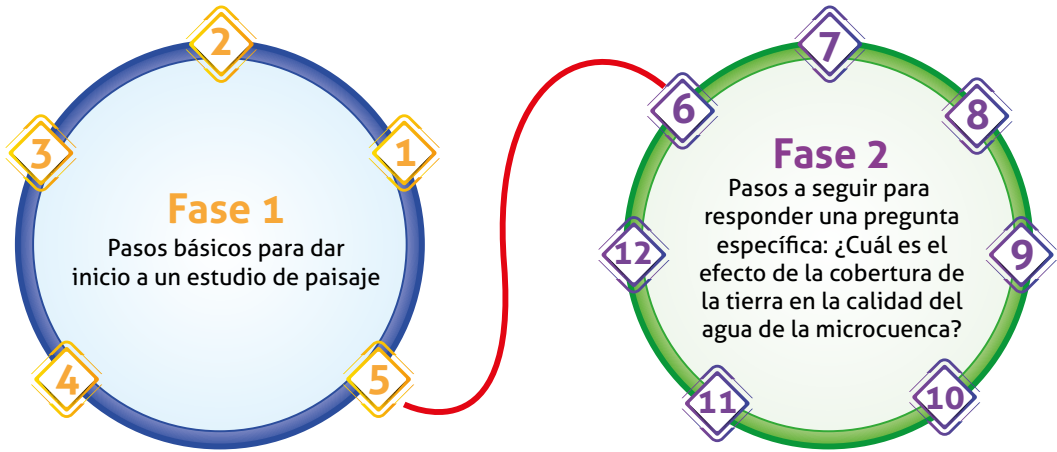
Métrica	Nombre	Descripción	Relación con la calidad del agua
Densidad de borde	ED	Longitud total de todos los segmentos de borde por hectárea para el paisaje bajo consideración (m/ha). ED=0 cuando no hay borde en el paisaje y ED aumenta cuando el paisaje es más complejo, es decir, contiene más borde.	A mayor densidad de borde menor contaminación
Densidad de parches	PD	Número de parches por unidad de área. PD=0 cuando no hay parches en el paisaje, PD aumenta cuando el paisaje es más complejo, es decir, contiene más parches.	A mayor densidad de parches mayor contaminación
Índice de agregación de parches	CONTAG	Indica la agregación de parches. CONTAG=0 cuando los tipos de parche están completamente desagregados. CONTAG=100 cuando los tipos de parche están completamente agregados.	A mayor CONTAG menor contaminación
Índice de cohesión de parches	COHE	La conexión física del tipo de parche correspondiente, es un área perimetral media ponderada de la relación de área, es decir, relación de área perimetral normalizada.	A mayor COHE menos contaminación
Índice de diversidad de Shannon	SHDI	Relación de área perimetral normalizada	A mayor diversidad mayor contaminación
Cobertura de café	CAFÉ	Áreas destinadas al cultivo de café con sombrío, sin sombrío y renovación de cafetales.	Punto de inicio del flujo de fertilizante hacia el cuerpo de agua principal

Propuesta metodológica para realizar un análisis de paisaje

A continuación se describirán los pasos para realizar un análisis de paisaje, cuyo objetivo es mejorar el entendimiento del efecto de los usos de la tierra en la depuración de la contaminación difusa producto de la fertilización del café, con el fin de diseñar estrategias específicas de reforestación, que sean efectivas a la hora de mejorar la calidad de agua de las microcuencas cafeteras.

Los pasos 1 al 5 describen los requerimientos generales que deben tenerse en cuenta en cualquier análisis de paisaje. Del 6 al 12, se describen los pasos realizados para responder la pregunta específica objeto de este estudio.

Paso a paso del análisis de paisaje



Fase 1

Paso 1. Elección y delimitación del área de estudio. El límite del área de estudio viene determinado por el espacio que abarca la cuenca visual, resultante de los principales puntos de observación de la misma. Usualmente, esta cuenca visual comprende un territorio drenado por un único sistema de drenaje natural, es decir, que sus aguas confluyen a un único río. El resultado cartográfico de la obtención de dicha cuenca visual, sirve como criterio para precisar la escala de trabajo. Se trata de un umbral a partir del cual se condicionará el resto del desarrollo del estudio.

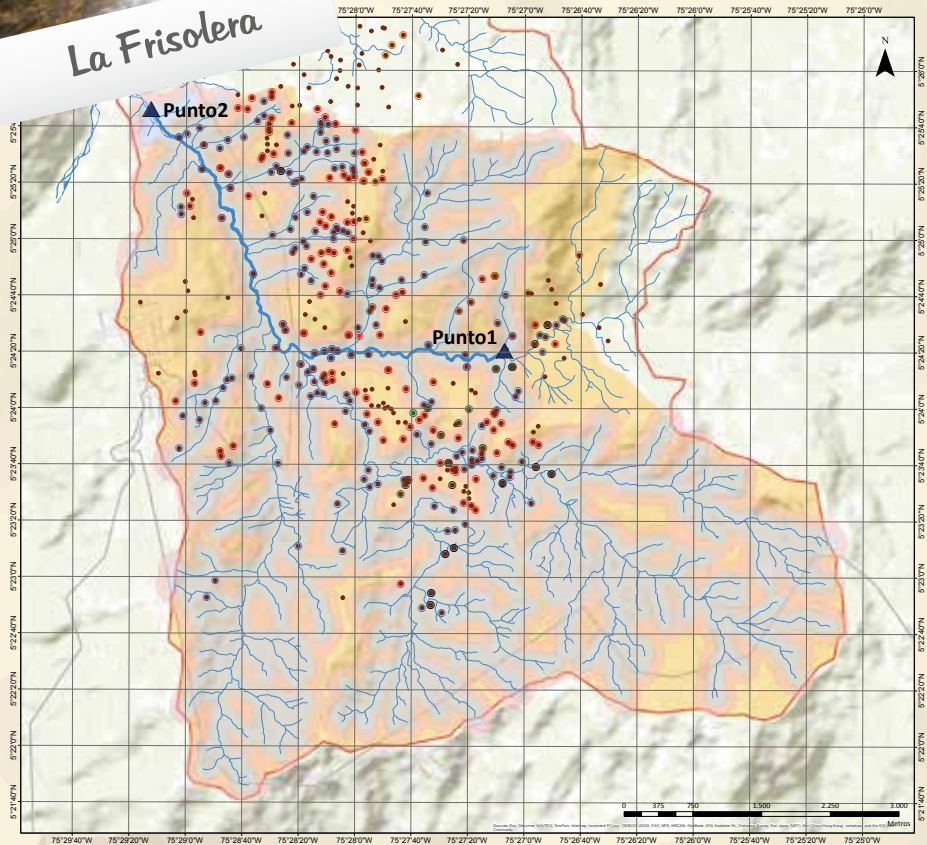
Una vez se delimita la cuenca, se traza un polígono envolvente a la cuenca visual a modo de límite del área de estudio o para cortar las capas que sean necesarias a la hora de llevar a cabo el cálculo de las componentes paisajísticas.



MUNICIPIO de SALAMINA Microcuenca La Frisolera



La Frisolera



- Sel. Plan Forestal con Incentivo
- Sel. Plan Gestión Empresarial
- Sel. Plan Beneficio Ecológico STAR
- Productores GIA
- Productores_Buffer100
- Productores_Buffer200
- Muestreo Calidad de Agua
- ▲ Río Referencia MultipleRing
- 100m
- 200m
- Áreas de Intervención GIA
- Áreas de Influencia GIA



Selección de Fincas por Plan
Cuerpo de agua quebrada La Frisolera. Salamina, Caldas
Escala 1:15.000

Fuente: Cartografía Básica IGAC. Escala 1:100.000

Elaborado por: Contribución FNC al Programa Gestión Inteligente del Agua GIA / FCM

© Copyright FNC 2015

Paso 2. Definición de la pregunta que se quiere contestar con el estudio de paisaje: El conocimiento del carácter del paisaje es la base sobre la que se asienta el estudio de paisaje. Para ello, se debe dar respuesta a preguntas que se plantean en un territorio. Por ejemplo; ¿Qué coberturas de la tierra se pueden identificar en el territorio objeto de estudio? ¿Qué recursos paisajísticos existen? ¿Qué problemas y amenazas existen? ¿Cuáles son las tendencias de cambio para el futuro?

En este caso en particular, la pregunta que se quiere contestar es ¿Cuál es efecto de las coberturas de la tierra sobre la depuración de la contaminación difusa producida en la fertilización del café?

Paso 3. Recopilación de información cartográfica y documental referida tanto a los elementos como los factores del paisaje. Debe recopilarse la mayor cantidad de información posible relacionada con el área de estudio y la pregunta que se quiere responder. Lo ideal es poder contar con trabajos sectoriales que proporcionen información elaborada y cartografía adecuada, para revisar, comprobar, completar y reorganizar dicha información y así abordar directamente el objetivo del trabajo. Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones esto no ocurre y es preciso invertir tiempo y esfuerzo en conseguir la descripción, tipología y cartografía adecuadas de los distintos elementos del paisaje.

Las coberturas de la tierra son fundamentales para realizar un análisis de paisaje. La cobertura de la tierra, es la cobertura bio-física que se observa sobre la superficie de la tierra (Di Gregorio y Jausen, 2005), en un término amplio, no solamente describe la vegetación y los elementos antrópicos existentes sobre la tierra sino que también describe otras superficies terrestres como afloramientos rocosos y cuerpos de agua.

En términos puntuales, para la delimitación de las coberturas de la tierra, el IDEAM (2004) describe la cobertura como la unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales, determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, diferenciables con respecto a la unidad próxima.

Paso 4. Determinación de supuestos para el análisis de paisaje. Una vez definida la pregunta que se quiere contestar y después de haber realizado la revisión completa tanto de la información disponible como aquella que puede complementarse, debe establecerse el alcance del estudio, debido a que puede ocurrir que no haya información disponible sobre algún tema y es necesario empezar hacer supuestos que se acerquen a la realidad e ir actualizando la información para mejorar el análisis y su función.

Paso 5. Caracterización de la composición del paisaje. Este diagnóstico busca diferenciar las unidades homogéneas que luego se denominan coberturas de la tierra. Éstas son áreas del territorio que presentan un carácter paisajístico diferenciado; cada unidad tiene una extensión, delimitación y nomenclatura, formando áreas compactas y únicas.

Las coberturas de la tierra permiten sintetizar la caracterización del paisaje y conocer la diversidad paisajística de un territorio, así como interpretar el funcionamiento interno de cada porción del ámbito de estudio.

Fase 2

Paso 6. Estimación del efecto de la fertilización del café en la contaminación difusa del área de estudio. Para este paso se busca la información disponible, más ajustada hasta el momento, para el análisis sobre las cantidades de fertilizante aplicados al cultivo de café, específicamente para este estudio. Se estiman las concentraciones de fósforo y nitrógeno, producto de dicha fertilización, y el porcentaje de estos elementos que se presume son transportados por la lluvia hacia el cuerpo de agua. Este análisis puede mejorar en la medida en que la información disponible sea más precisa y cercana a la realidad.

Paso 7. Estimación del flujo y acumulación de fósforo y nitrógeno producto de la fertilización de lotes cafeteros. Una vez establecida la concentración de los contaminantes y la porción de éstos que es transportada desde los lotes cafeteros hacia el cuerpo de agua principal, se define la dirección del flujo del contaminante hasta llegar al cuerpo de agua. De igual manera, se establecen las coberturas por las cuales cruzará el fertilizante, antes de llegar al cuerpo del agua principal.

Paso 8. Cálculo de precipitación y evapotranspiración potencial por unidad de análisis (celda). Para establecer la cantidad de lluvia y la evapotranspiración ocurrida en cada unidad de análisis (celda), se utiliza la información disponible del valor máximo por evento de precipitación registrado para la zona. Igualmente, se utiliza la evapotranspiración potencial para la zona con el fin de estimar la evapotranspiración ocurrida en cada unidad de análisis. Estos análisis permiten ajustar el cálculo de la escorrentía a la realidad.

Paso 9. Cálculo de la curva número para estimar la escorrentía de la microcuenca. Para calcular la escorrentía dentro de la microcuenca se utiliza una metodología desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (NRCS) (Mishra, 2003), teniendo en cuenta las coberturas y la capacidad de infiltración de los suelos.

Esta metodología se utiliza para calcular la cantidad de escorrentía producto de la precipitación que ocurre en los lotes cafeteros de la microcuenca y que arrastran los contaminantes (nitrógeno y fósforo) a los drenajes permanentes. La curva número (CN) se calcula a partir de los grupos hídricos de suelo (GHS), el tipo de cobertura del suelo y las condiciones hídricas.

Paso 10. Cálculo de la escorrentía de la microcuenca a partir de la curva número. La escorrentía (Q) se calcula a partir de la lluvia que cae en un evento de precipitación (P), el potencial de infiltración (S) y el cálculo de la curva número, según las Ecuaciones 1 y 2.

$$Q = \left[\frac{(P - 0,2S)}{P + 0,8S} \right]^2 \quad 1$$
$$S = \frac{1.000}{(CN - 10)} \quad 2$$

La escorrentía (Q) se acumula con el fin de obtener los valores de agua (m^3) que potencialmente transportan los contaminantes desde los lotes cafeteros hasta los drenajes permanentes. Debido a que la metodología de la curva número no tiene en cuenta la evapotranspiración, es necesario hacer un ajuste para incluirla dentro del modelo.

Paso 11. Medición del efecto de las coberturas del suelo en la acumulación de fósforo y nitrógeno producto de la fertilización de lotes cafeteros. Para calcular el efecto depurador de las coberturas de la tierra, se determina que al infiltrarse el agua lluvia producto de un evento de precipitación, ésta arrastra los contaminantes disueltos en ella. Teniendo en cuenta esta afirmación, la curva número (CN) cumple una segunda función en el cálculo de la cantidad del contaminante que se infiltra o escurre desde los lotes cafeteros de la microcuenca hasta los drenajes permanentes. Tomando la CN como un factor que limita la cantidad de escorrentía y recordando que cada cobertura tiene su CN particular, puede definirse el efecto depurador que tiene cada cobertura sobre los contaminantes que por ella atraviesan.

Este efecto depurador se estima a partir de la dirección del flujo del contaminante (Paso 7) que pasa por cada una de las coberturas, teniendo la CN de cada una de ellas.

En este paso se presentan dos escenarios. El primero, el efecto de las coberturas del suelo en la acumulación de fósforo y nitrógeno, producto de la fertilización de lotes cafeteros antes de las intervenciones del Proyecto GIA, y el segundo, el mismo efecto pero después de las acciones de reforestación del mismo Proyecto.

Para visualizar la diferencia de la acumulación y concentración de contaminantes en los dos escenarios, se contruyen dos mapas que permiten visualizar los cambios obtenidos en las concentraciones de nitrógeno y fósforo producto de las acciones de reforestación GIA. Se observa la diferencia de concentración entre el tiempo actual y el tiempo inicial. Posteriormente, se utiliza una técnica de interpolación de puntos para visualizar claramente estos cambios.

Paso 12. Propuesta de manejo de paisaje con base al análisis de paisaje realizado. Con base en el análisis realizado, se contruye una propuesta de reforestación, que busca generar el mayor efecto depurador de las coberturas boscosas para mejorar la calidad de agua de la microcuenca.

Se establecen los criterios de selección de áreas a reforestar y se divide la microcuenca en subzonas, con el fin de establecer el lugar más efectivo para llevar a cabo las acciones dentro del territorio. Para priorizar las subzonas se utilizan métricas de paisaje que se asocian con la calidad del agua de la cuenca, como: concentración de la actividad cafetera, densidad del borde de bosque y conectividad entre parches de bosque.

Una vez establecidas las subzonas priorizadas para realizar acciones de reforestación, se establece el efecto del Proyecto GIA en la capacidad de depuración de la microcuenca.







Análisis de paisaje

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA
PARA ANÁLISIS DE PAISAJE EN LA
MICROCUENCA LA FRISOLERA**

3

Aplicación de la metodología para análisis de paisaje en la microcuenca La Frisolera, Salamina – Caldas

Aplicación de la metodología propuesta: paso a paso

Paso 1. Delimitación del área de estudio

La microcuenca La Frisolera está ubicada en el municipio de Salamina, el cual se encuentra ubicado en el Centro-Norte del departamento de Caldas. Limita al Norte con los municipios de Pácora y Aguadas, al Sur con Aranzazu, Neira y Marulanda, al Oriente con Pensilvania y Marulanda, y al Occidente con La Merced.

El área total de la microcuenca La Frisolera es de 5.147,95 ha, con un promedio de altitud de 1.825 m, temperatura entre 18 y 20°C, y una conformación topográfica de pendientes abruptas. La microcuenca tiene 508 fincas cafeteras y 16.968 habitantes, de los cuales 6.828 son rurales¹ (Figura 3).



Figura 3. Panorámica de la microcuenca La Frisolera.

¹Asociación Público Privada Gestión Inteligente del Agua. 2014. Plan de Manejo de la Microcuenca. Documento Interno.

El área específica definida para el desarrollo de este análisis de paisaje fue la zona de intervención del Proyecto Manos al Agua – GIA. Este territorio está definido por la divisoria de aguas, la concentración de la actividad cafetera y los puntos de monitoreo de calidad del agua establecidos por el mismo proyecto. El área total para este estudio fue de 3.740 ha (Figura 4).

**Ubicación
microcuenca
La Frisolera,
municipio de
Salamina,
departamento de
Caldas, Colombia**

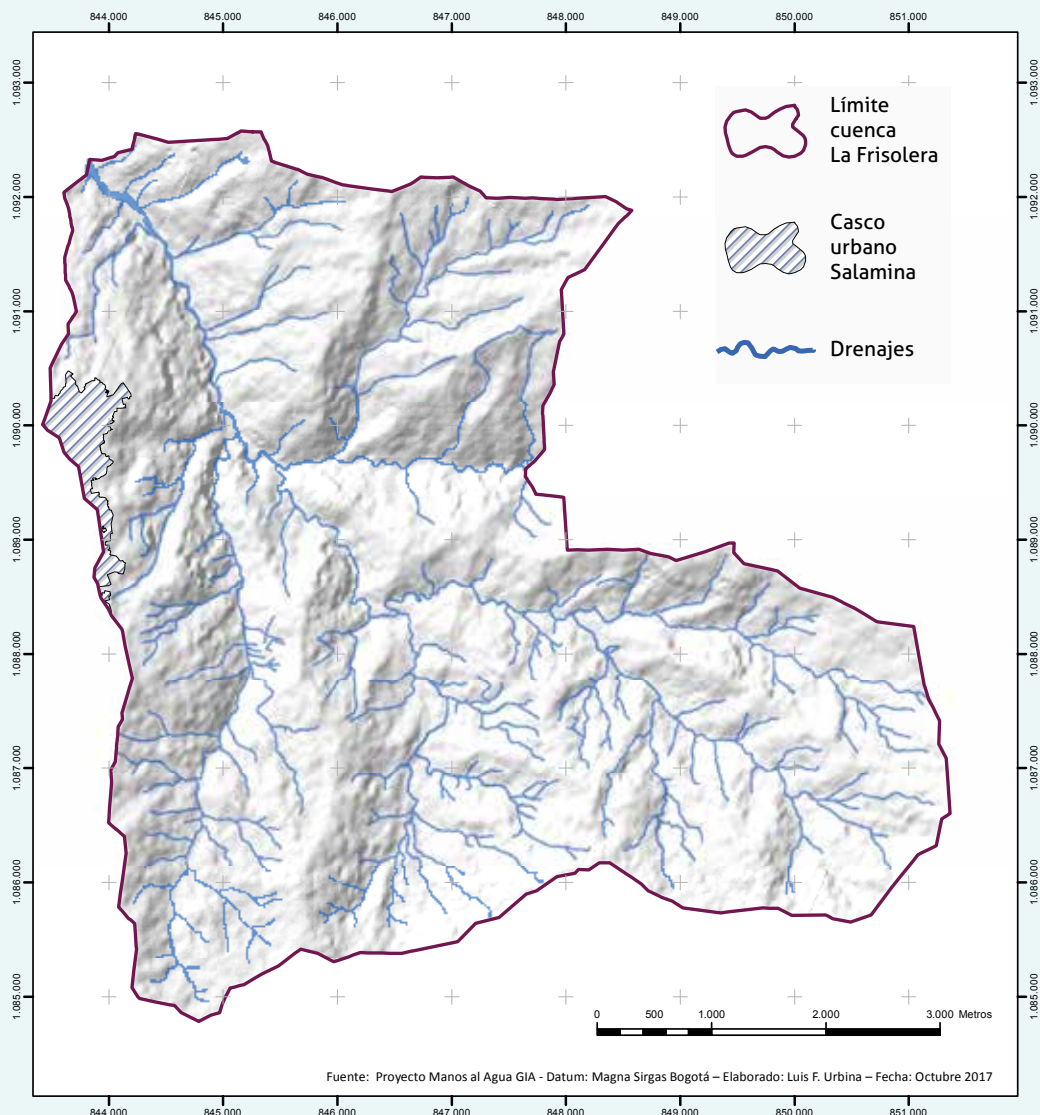
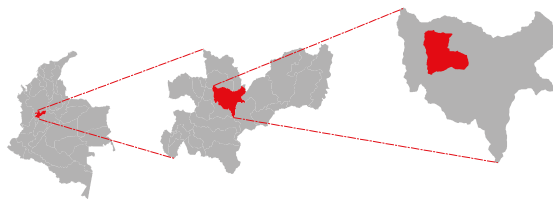


Figura 4. Mapa del área de estudio en la microcuenca La Frisolera, Salamina-Caldas.

Paso 2. Definición de la pregunta que se quiere contestar con el estudio de paisaje

Con el fin de aportar soluciones al problema de contaminación en el proceso de producción del café es necesario que el productor implemente prácticas para reducir y mitigar la carga contaminante que se produce en su finca y llega a las fuentes de agua, cuyas aguas no solo son un elemento vital para el funcionamiento del ecosistema, sino que también son materia prima indispensable para el procesamiento del café.

Con este estudio de paisaje se determinó de forma preliminar, **el efecto de las coberturas de la tierra en la concentración de fósforo y nitrógeno, responsables de la contaminación difusa producida por la fertilización del café**. A través de un modelo de precipitación-escurrimiento se determinó el escurrimiento de fertilizantes y la capacidad de mitigación por parte de las coberturas vegetales.

La importancia de comprender este efecto permite planificar el territorio y priorizar las prácticas de conservación de forma dirigida, permitiendo un uso eficiente de los recursos disponibles, para el manejo integrado de microcuencas en zona cafetera.

Paso 3. Recopilación de información geográfica y documental referida tanto a los elementos como los factores del paisaje

Para este estudio, la información geográfica utilizada fue:

- Fotografía aérea de tres bandas, con resolución espacial de 0,15 m, ortorectificada, tomada con sensor Trimble AC P65 + en el año 2015 (antes de dar inicio a las actividades del Proyecto GIA).
- Modelo digital de elevación (DEM) de resolución espacial 12,5 m.
- La información de precipitación y evapotranspiración potencial se tomó de los promedios climáticos entre los años 1981 y 2010, publicados por el IDEAM, para la zona de estudio.
- La información de las características del suelo de la zona de estudio se tomó del mapa de suelos para el departamento de Caldas, producido por el IGAC en el año 2005, a escala 1:2.100.000.
- Se utilizó el Sistema de Información Cafetero SICA
- Se determinaron las labores de implementación realizadas por el Proyecto GIA en el territorio.

Paso 4. Determinación de supuestos para el análisis de paisaje

Con respecto a la contaminación difusa producida por la fertilización del café y por la limitación de información, se tomó la recomendación dada por Manual del Cafetero Colombiano (Cenicafé, 2013) sobre las tasas de aplicación de fertilizantes dependiendo de la densidad de árboles por hectárea y el porcentaje de sombrero en los cafetales. El modelo desarrollado determina la contaminación difusa potencial, en el caso de la aplicación de las tasas recomendadas.

La mayoría de los caficultores en Colombia usan cantidades de fertilizante menores a las recomendadas para una producción óptima de café. De acuerdo con los expertos en el sector cafetero, los niveles de fertilización son menores debido principalmente a la disponibilidad de recursos en efectivo del productor, que le permitan obtener insumos externos, y en segundo lugar los altos costos de los insumos, teniendo en cuenta que el tipo de productor predominante en la región es pequeño, campesino y con alta dependencia de mano de obra familiar.

Los supuestos del análisis fueron los siguientes:

- Para modelar la concentración de fósforo y nitrógeno producto de la fertilización en los lotes cafeteros se presumió que del total de fertilizante aplicado el 10% es transportado por la escorrentía producida por los eventos de precipitación (Hoekstra, 2011).

Para este modelo se presumió que el nitrógeno y el fósforo tienen el mismo comportamiento al ser depositados sobre el suelo. Es ampliamente estudiado el comportamiento de estos fertilizantes y las múltiples reacciones que ocurren al entrar en contacto con el sustrato. Para este modelo se determinó que todo el nitrógeno y fósforo que queda en el suelo es lixiviado por el agua lluvia. Así mismo, no se tuvieron en cuenta otras interacciones que generarán pérdidas en la cantidad de nitrógeno y fósforo.

- Se utilizó el valor máximo por evento de precipitación registrado para la zona (10,47 mm), información obtenida de la Red Agroclimática Cafetera de Cenicafé. El evento de precipitación máximo es el punto de partida para la determinación de la máxima lixiviación de los contaminantes hasta los puntos de acumulación principales (drenajes permanentes). No puede afirmarse con certeza qué día del mes, ni la duración de este evento máximo, pero sí puede presumirse que la máxima lixiviación teórica ocurre bajo la influencia de este evento, y que a partir de ésta, cualquier evento de precipitación que ocurra en la microcuenca será de menor magnitud, generando una lixiviación menor a la generada para este modelo. Este análisis se usó para la aplicación del fertilizante, evento que genera la contaminación por N y P.

La aplicación del fertilizante se hace en dos momentos diferentes en el año y depende de factores fisiológicos, agronómicos y de la disponibilidad de recursos económicos de cada caficultor. Debido a estos factores, el momento de la fertilización es particular para cada predio, por lo cual no puede afirmarse con certeza el momento de la fertilización.

- Con respecto a la cantidad de fertilizante usada por aplicación, se empleó la recomendación dada por Cenicafé en el Manual del Cafetero Colombiano (2013). Para la construcción del presente análisis se utilizó la recomendación anual y se dividió en dos aplicaciones.
- A partir del evento máximo de precipitación y la cantidad de fertilizante aplicado (recomendado por Cenicafé), se construyó el máximo teórico de lixiviación de los contaminantes para la microcuenca La Frisolera.
- La unidad de análisis de este estudio fue de un tamaño de celda de 5,0 x 5,0 m, para un área de 25,0 m².
- Para efecto de este estudio se presumió que el agua que se escurre lleva consigo la carga contaminante. La carga contaminante diluida en el agua infiltrada tiene un efecto contaminante reducido sobre el cuerpo de agua superficial receptor, debido a los efectos depuradores del suelo y la vegetación.
- Se tuvo en cuenta la capacidad de retención o punto de saturación del suelo. Si el evento de precipitación ocurre en un período largo de tiempo, el suelo va tener una mayor capacidad de absorber el agua, y habrá un menor escurrimiento, pero si el evento es torrencial (mucho agua en poco tiempo) el suelo se saturará más rápido y habrá un mayor escurrimiento.
- Se determinó la velocidad del escurrimiento.

Paso 5. Caracterización de la composición del paisaje: mapa de coberturas del suelo

A partir de la fotografía aérea se realizó la interpretación visual de las coberturas (Figura 5). Como apoyo se utilizó información georreferenciada de:

- (i) Lotes cafeteros
- (ii) Ubicación de fincas
- (iii) Juicio de expertos
- (iv) La interpretación se realizó a la máxima resolución espacial permitida por el insumo (0,15 m).

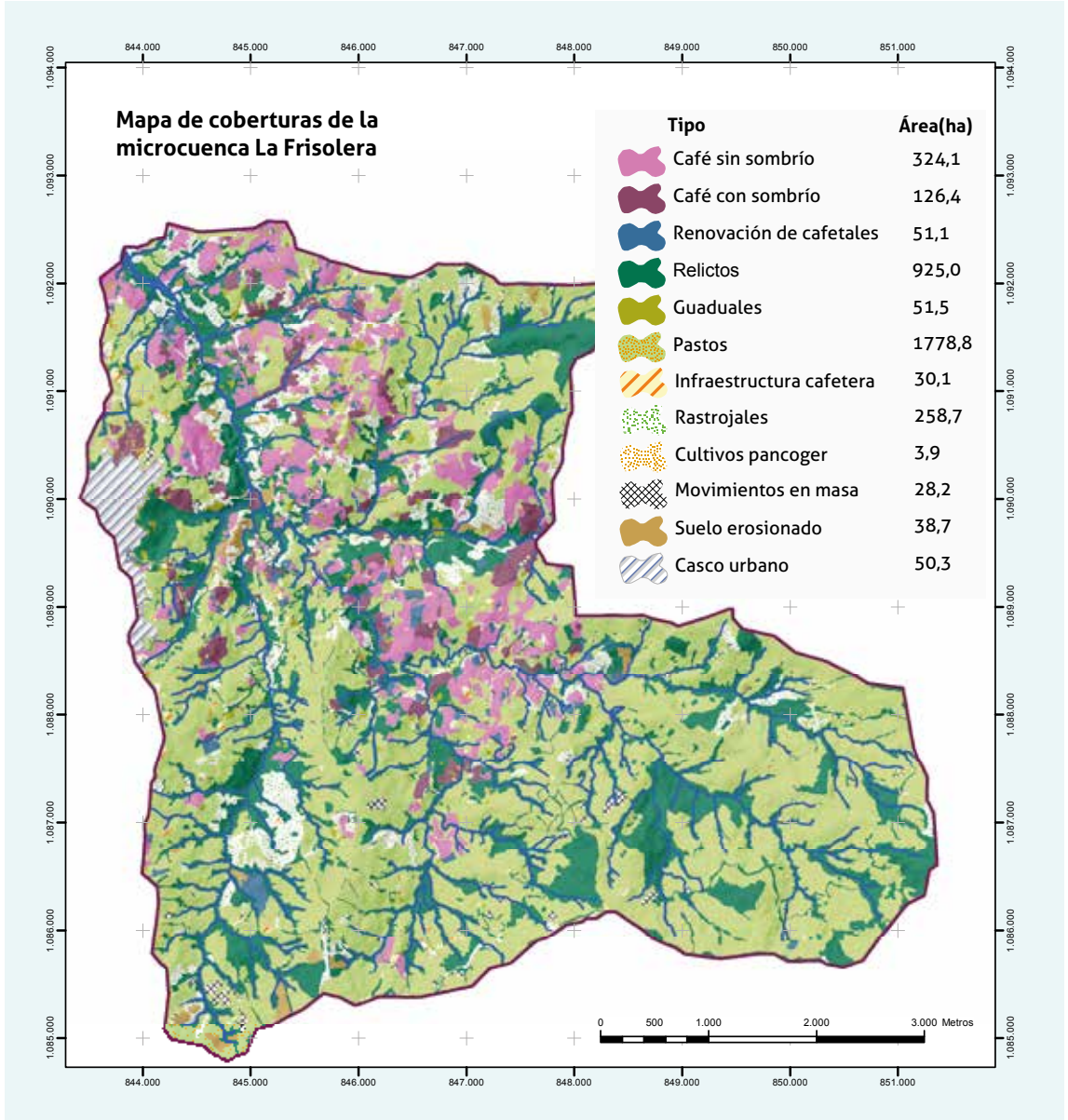


Figura 5. Mapa de coberturas de la tierra de microcuenca La Frisolera en Salamina, Caldas.

Paso 6. Estimación del efecto de la fertilización del café en la contaminación difusa del área de estudio

A partir de la información publicada en el Manual del Cafetero Colombiano (Cenicafé, 2013), se tomaron las dosis recomendadas en ausencia de análisis de suelos y determinadas según la densidad de siembra y el porcentaje de sombrero presente en los lotes de café. Para modelar la concentración de fósforo y nitrógeno producto de la fertilización en los lotes cafeteros, se presumió que del total del fertilizante aplicado, el 10% fue transportado por la escorrentía producida por los eventos de precipitación (Tabla 6).

Tabla 6. Dosis de fertilizante recomendada para el café y porcentaje del mismo que se presume como pérdida.

Cobertura	Densidad de siembra (árboles/ha) (SICA)	Aplicación de fertilizante recomendada (Cenicafé, 2013) *		Porción de fertilizante que se transporta y genera contaminación difusa (10%) (Hoekstra, 2011)		Porción de fertilizante que se transporta por celda de 5 x 5 m	
		Nitrógeno (kg/ha)	Fósforo (kg/ha)	Nitrógeno (kg/ha)	Fósforo (kg/ha)	Nitrógeno (kg)	Fósforo (kg)
Café sin sombra	5.340	142,5	24	14,25	2,4	0,036	0,006
Café con sombra	4.987	127,5	21,5	12,75	2,15	0,032	0,005
Café en crecimiento vegetativo	5.340	56,5	0	5,65	0	0,014	0

*Se presume que para este caso se fertiliza el café dos veces al año
 *Dosis recomendada por Cenicafé en ausencia de análisis de suelos

Paso 7. Estimación del flujo y acumulación de fósforo y nitrógeno producto de la fertilización de lotes cafeteros

Se generó un mapa de dirección de los flujos que indica hacia dónde va a ocurrir el escurrimiento del fertilizante cuando ocurre un evento de precipitación. Para esto se utilizó el modelo de elevación digital (DEM), al cual se le transformó el tamaño de celda de 12,5 a 5,0 m. Posteriormente, se calculó la acumulación de los fertilizantes que, al mezclarse con el agua del evento de precipitación, se transportarán al drenaje más cercano. En las Figuras 6 y 7 se muestra la dirección y el flujo de fertilizante desde los lotes cafeteros hasta el río principal.

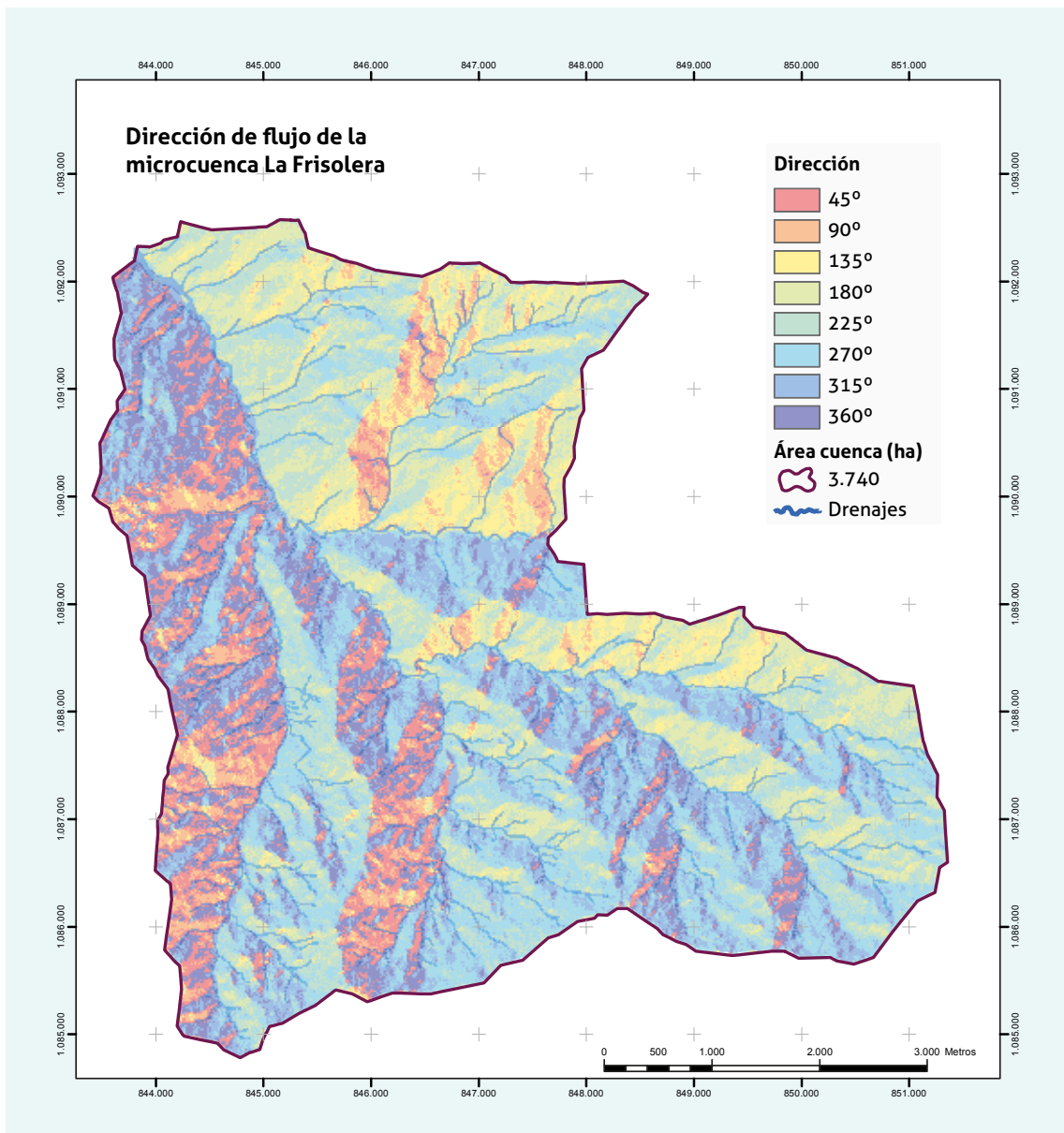


Figura 6. Mapa de dirección de flujo del fertilizante en la microcuenca La Frisolera

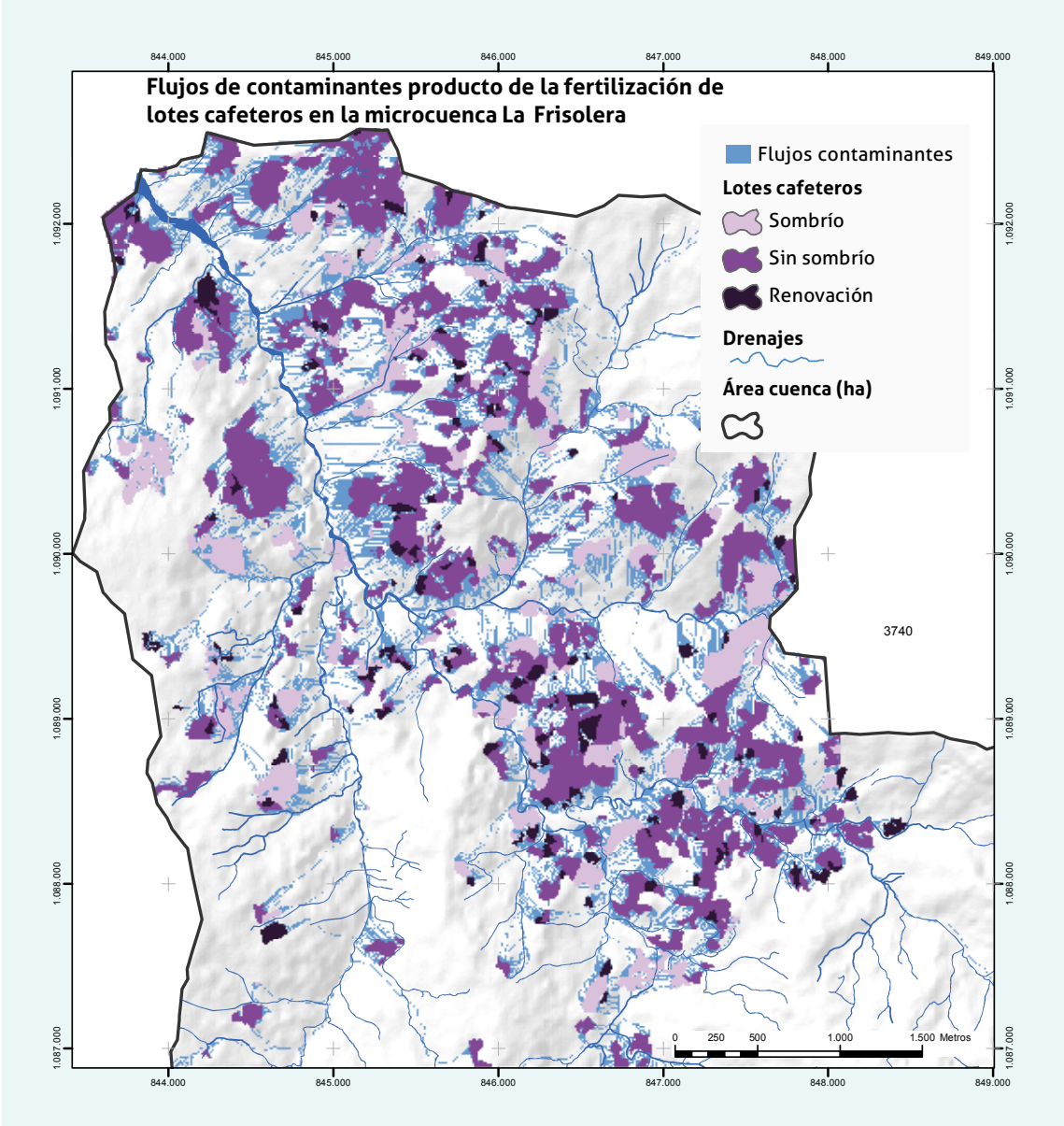


Figura 7. Mapa de flujo de contaminantes producto de la fertilización del café.

Paso 8. Cálculo de precipitación y evapotranspiración potencial por unidad de análisis (celda)

Se calculó la cantidad de lluvia recibida por celda, a partir del supuesto del valor máximo por evento de precipitación registrado para la zona (10,47 mm), con un valor de 0,262 m³ por unidad de análisis. Este mismo procedimiento se realizó para la medición de la evapotranspiración por cada celda, dando un volumen de 0,164 m³ (siendo éste el 62,47% de la precipitación).

Paso 9. Cálculo de la curva número para posteriormente calcular la escorrentía de la microcuenca

En el marco de este estudio se calculó la cantidad de escorrentía producto de la precipitación que ocurre en los lotes cafeteros de la microcuenca y que arrastran los contaminantes (nitrógeno y fósforo) a los drenajes permanentes. El Curva Número (CN) se calculó a partir de los grupos hídricos de suelo (GHS), el tipo de cobertura del suelo y las condiciones hídricas (Figura 8).

- Los grupos hídricos clasificaron los suelos en cuatro categorías, con comportamientos similares frente a la generación de escorrentía e infiltración (Figura 8).
- El tipo de cobertura de suelo hace referencia al tipo de elementos que se encuentran sobre la superficie del suelo, sean naturales o artificiales.
- Por último, las condiciones hídricas se refieren a las prácticas agrícolas y de manejo que se les dan a las coberturas y que tienen un efecto modificador en ellas (buenas, moderadas y malas).



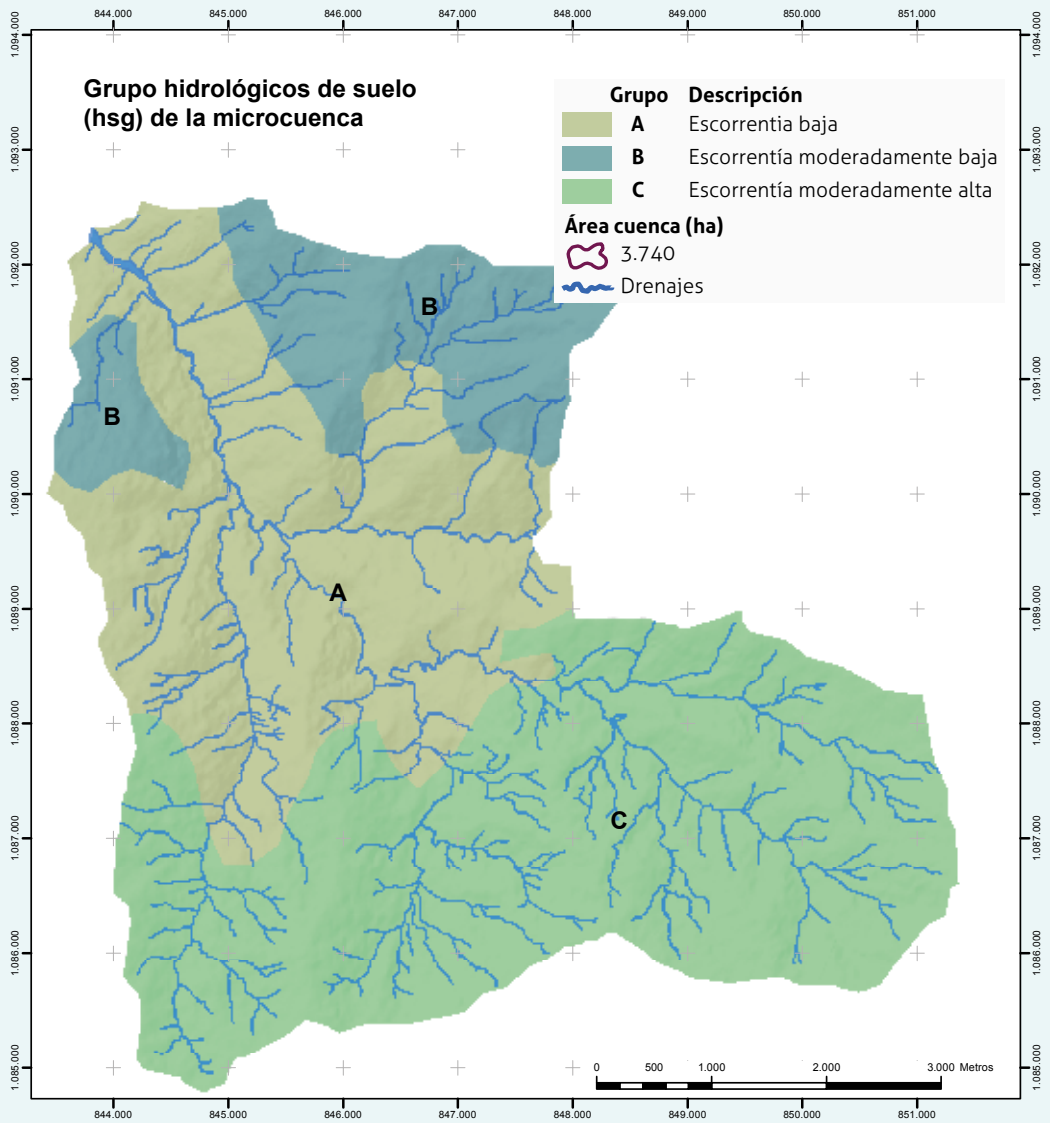


Figura 8. Mapa de grupos hidrológicos de suelo de la microcuenca La Frisolera.

La curva número (CN) está definida entre 0 y 100, siendo 100 la máxima escorrentía y 0 la mínima escorrentía. Los valores de CN de la microcuenca La Frisolera oscilan entre 22 y 91 (Figura 9), siendo el café con sombrío en grupo hidrológico de suelo A (CN 22), la cobertura con mayor capacidad de infiltración. En contraste, el suelo erosionado en grupo hidrológico de suelo C (CN 91), presentó la menor capacidad de infiltración. Cabe destacar, que la CN con mayor extensión en la microcuenca corresponde a la cobertura de pastos en el grupo C (CN 86), con una extensión de 1.157 ha, con un alto valor de escorrentía. Adicionalmente, la cobertura de bosques en grupo hidrológico de suelo A (CN 30), después del café con sombrío, demostró tener una muy buena capacidad de infiltración.

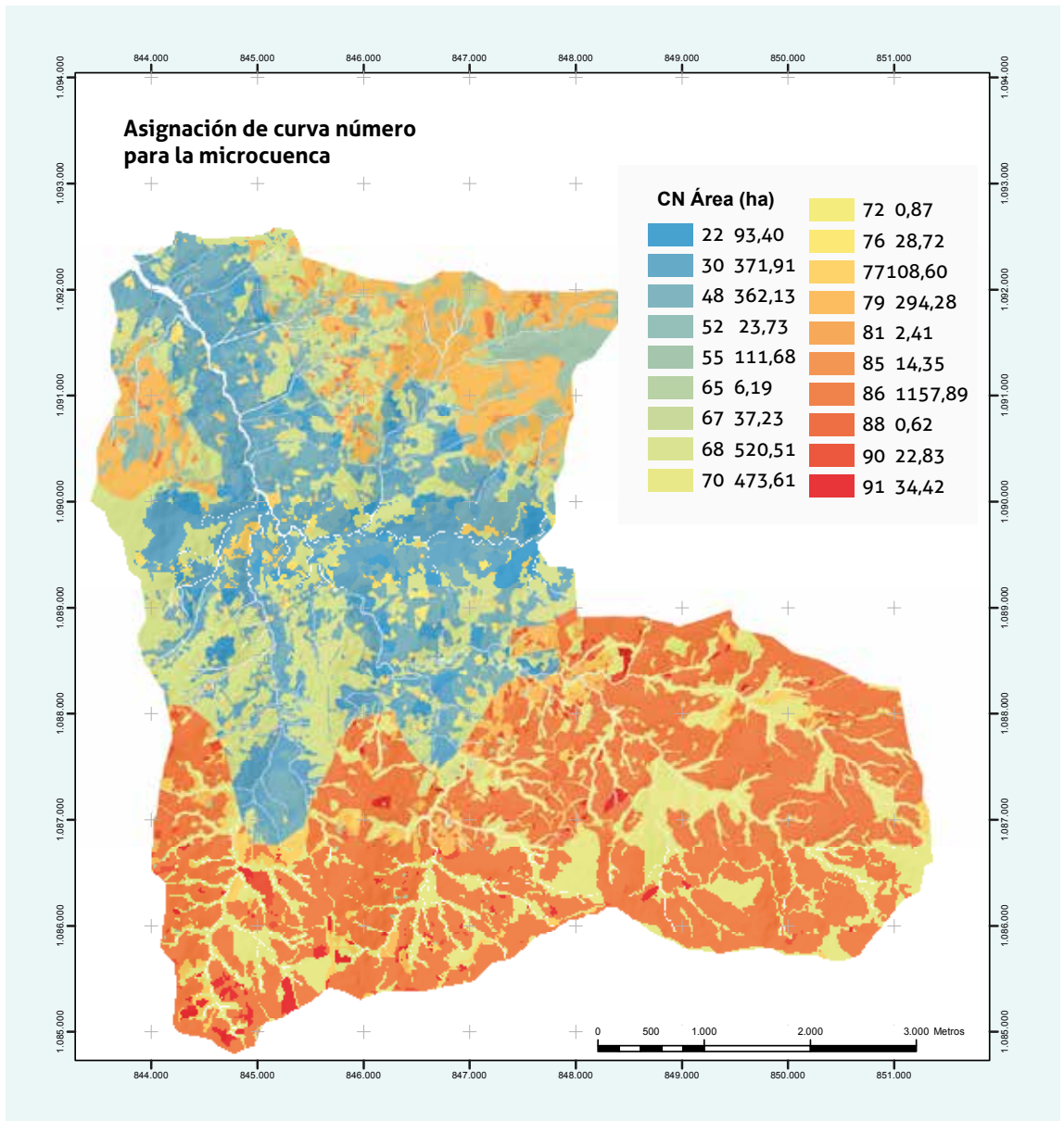


Figura 9. Mapa de curva número de la microcuenca La Frisolera.

Paso 10. Cálculo de la escorrentía de la microcuenca a partir de la Curva Número

La escorrentía se acumuló con el fin de obtener los valores de agua que potencialmente transportan los contaminantes desde los lotes cafeteros hasta los drenajes permanentes. Debido a que la metodología de la curva número no tiene en cuenta la evapotranspiración fue necesario hacer un ajuste para incluirla dentro del modelo (Figura 10).

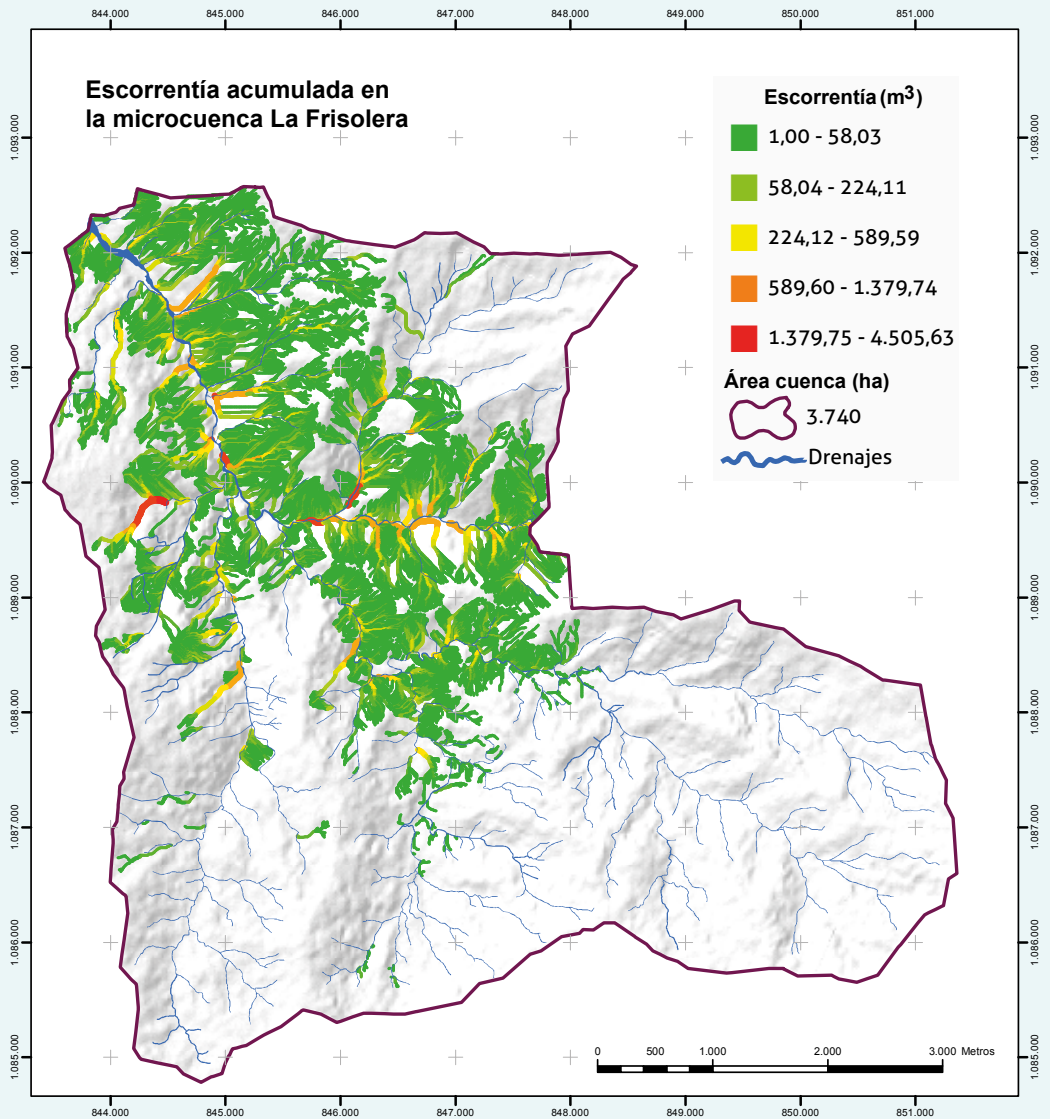


Figura 10. Mapa de escorrentía ajustada de la microcuenca La Frisolera.

Paso 11. Medición del efecto de las coberturas del suelo en la acumulación de fósforo y nitrógeno producto de la fertilización de lotes cafeteros

Este efecto depurador se estimó a partir de la dirección de flujo del contaminante (Paso 7) que pasa por cada una de las coberturas teniendo la CN de cada una de ellas (Figura 11). Se observa cómo el efecto de las coberturas reduce la cantidad de contaminante y la escorrentía superficial, a tal punto que este flujo no alcanza a llegar al drenaje.

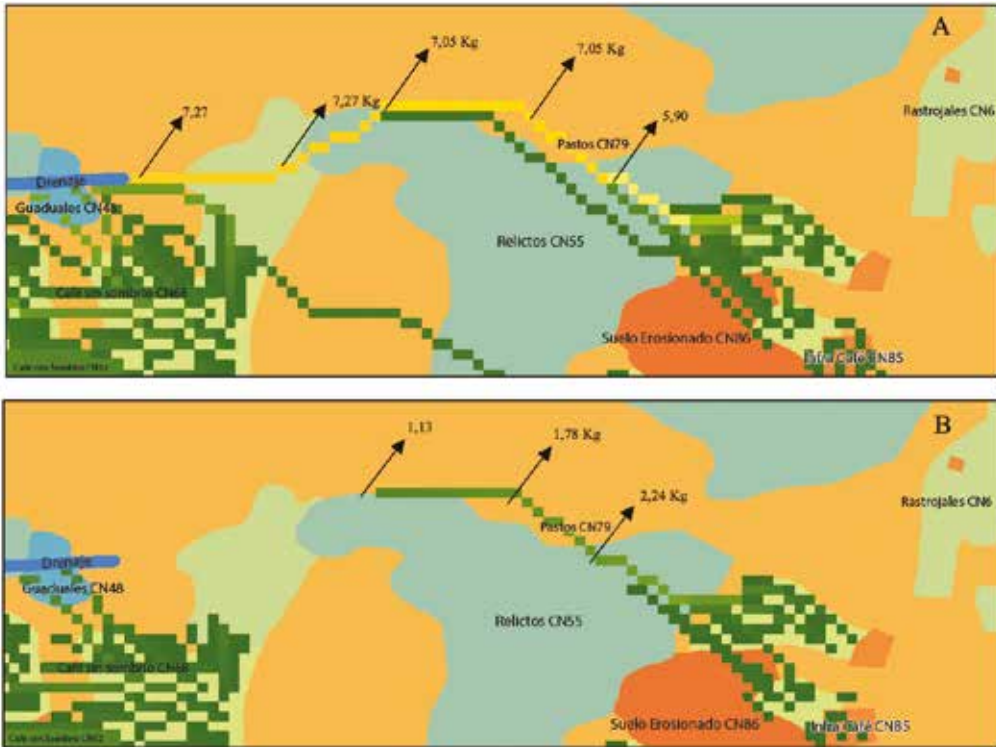


Figura 11. A. Transporte y cantidad de contaminante sin efecto de las coberturas del suelo por celda; B. Transporte y cantidad de contaminante con efecto de las coberturas del suelo por celda.

En las Figuras 12 y 13 se muestra como la concentración de nitrógeno y fósforo en los lotes cafeteros es alta y a medida que éstos se movilizan por las diferentes coberturas, la concentración se va reduciendo.

El valor de la concentración se obtuvo dividiendo la acumulación de los contaminantes, en miligramos, sobre la escorrentía ajustada en litros, para así obtener la concentración de los contaminantes.

Escenario 1. Coberturas del bosque antes de las Implementaciones del Proyecto GIA

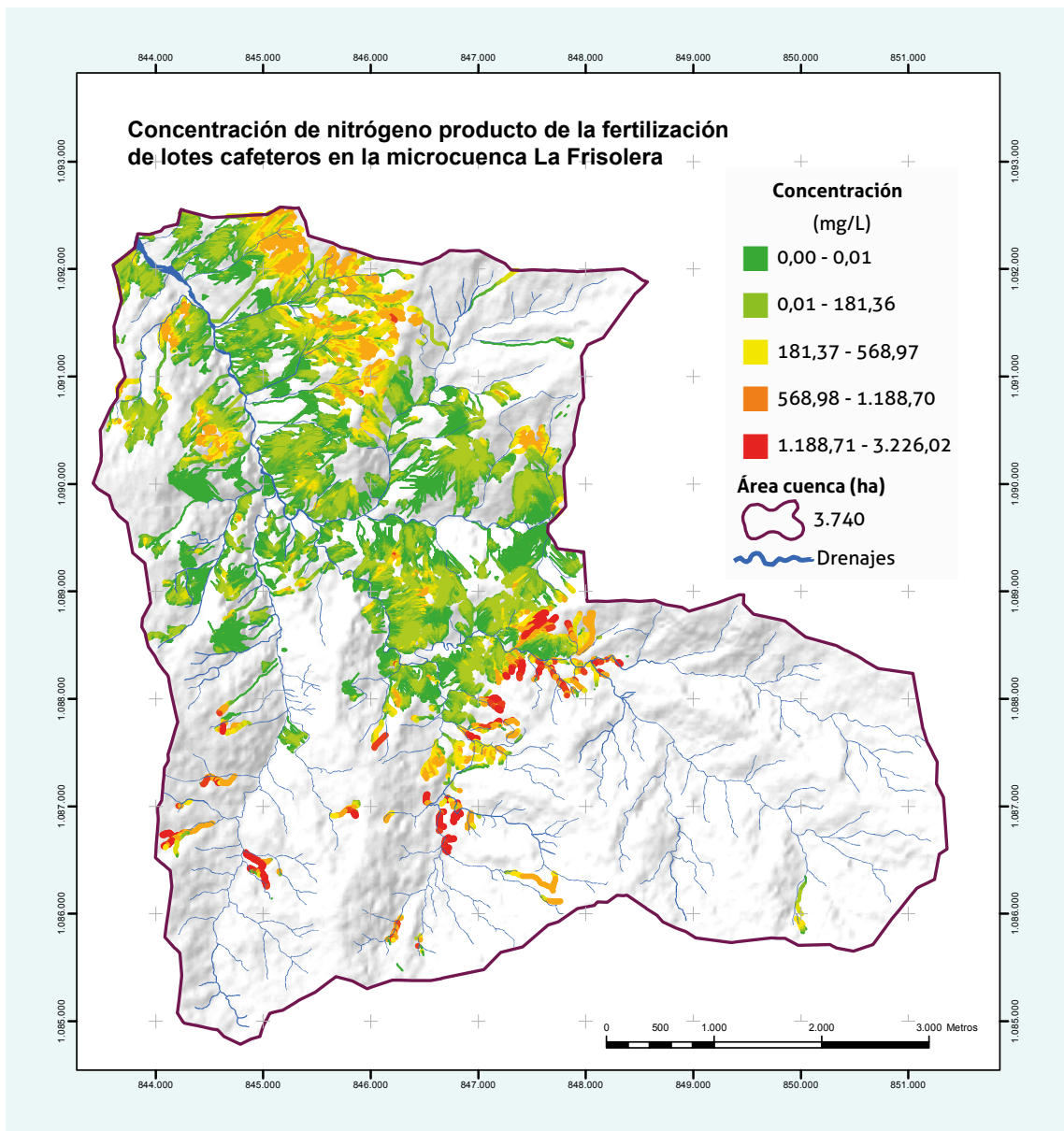


Figura 12. Concentración de nitrógeno (mg/L) en la microcuenca La Frisolera, Salamina-Caldas, antes de las implementaciones del Proyecto GIA.

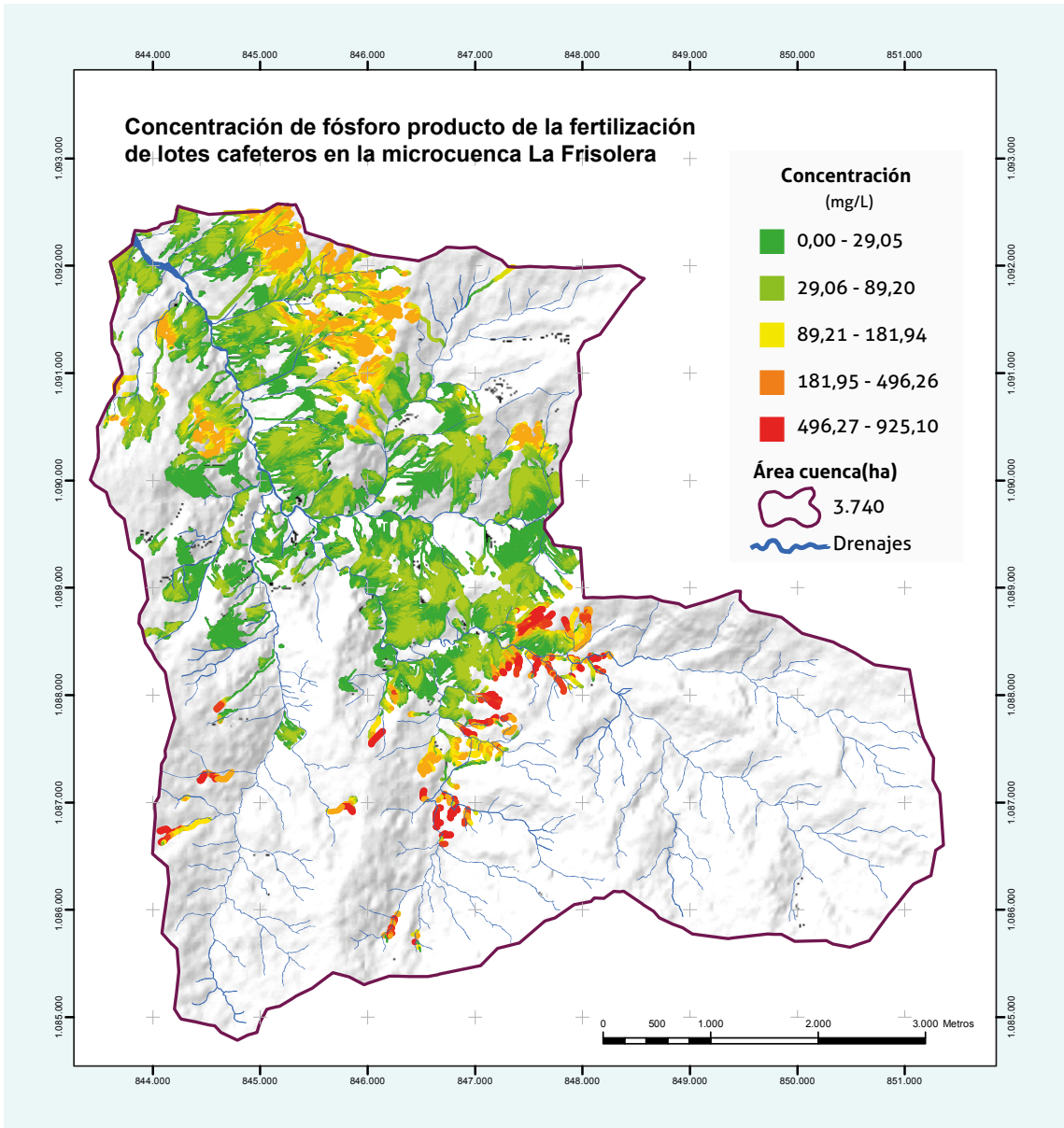


Figura 13. Concentración de fósforo (mg/L) en la microcuenca La Frisolera antes de las implementaciones del Proyecto GIA.

Escenario 2. Coberturas de bosque después de las implementaciones del Proyecto GIA)

Para construir este escenario, dentro de las coberturas de la tierra se incluyó el trabajo de reforestación realizado durante la implementación del Proyecto GIA. Se tuvo en cuenta el trabajo realizado bajo el esquema de incentivo y siembras voluntarias (Figura 14).

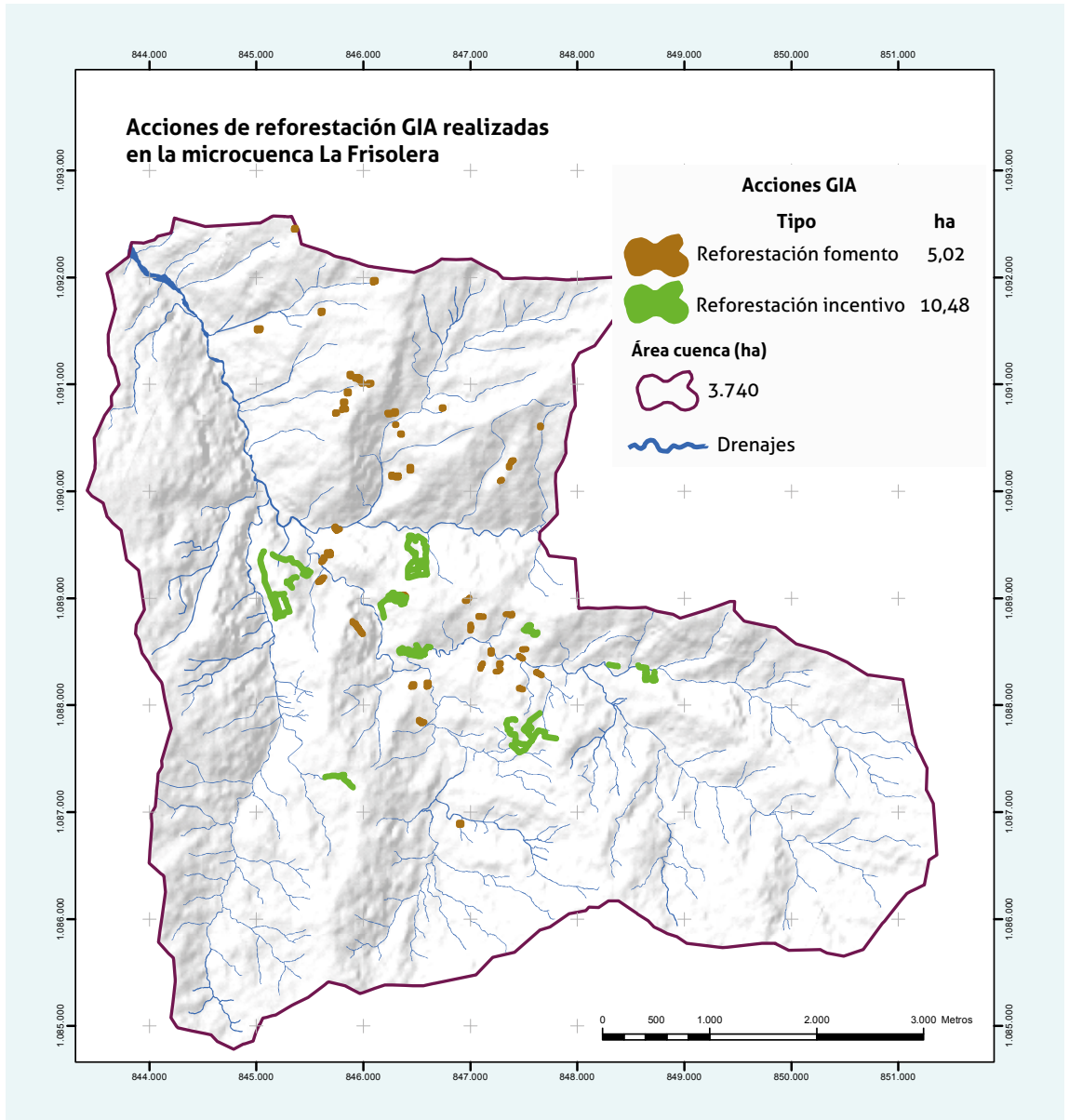


Figura 14. Áreas reforestadas durante la implementación del Proyecto GIA.

En la Figura 15 se muestra a nivel local, cómo el efecto de la reforestación realizada en GIA reduce la cantidad de contaminante y la escorrentía superficial antes de llegar al río. En la Tabla 7 se aprecia el cambio de concentración de nitrógeno entre el Escenario 1 y el Escenario 2, que puede ser hasta de un 80%. Igualmente, se observa que en el escenario 1 el flujo llega mucho más lejos que en el Escenario 2. En la Tabla 7 se presenta un ejemplo puntual del cambio de concentración de nitrógeno antes y después de las acciones del Proyecto GIA, por unidad de análisis.

Tabla 7. Porcentaje de reducción de nitrógeno por celda después de las acciones de reforestación del Proyecto GIA.

Áreas de análisis donde se observa cambio en la concentración del contaminante	Escenario 1: Concentración de nitrógeno por celda antes de las acciones del Proyecto GIA (mg/L)	Escenario 2: Concentración de nitrógeno por celda después de las acciones del Proyecto GIA (mg/L)	Porcentaje de reducción de nitrógeno por celda después de las acciones del Proyecto GIA (%)
Área de análisis 1	25,09	20,97	17%
Área de análisis 2	4,51	1,21	73%
Área de análisis 3	3,78	0,54	86%

*El área de análisis corresponde a un pixel de 5,0 x 5,0 m.



Figura 15. A. Escenario 2. Transporte y cantidad de contaminante sin efecto de las coberturas del suelo por celda; B. Escenario 2. Transporte y cantidad de contaminante con efecto de las coberturas del suelo por celda, después de las acciones implementadas por el Proyecto GIA. Nota: Las flechas negras muestran la concentración de nitrógeno en cada celda.

Diferencia en la concentración de nitrógeno y fósforo el escenario GIA y el escenario inicial

Debido a que la acumulación y la concentración muestran valores máximos y mínimos, los mapas no permiten visualizar los cambios obtenidos en las concentraciones de nitrógeno y fósforo producto de las acciones de reforestación GIA. En las Figuras 16 y 17 se muestra la diferencia de concentración de fertilizantes antes y después de las acciones del Proyecto GIA. Se utilizó una técnica de interpolación de puntos para visualizar claramente estos cambios.

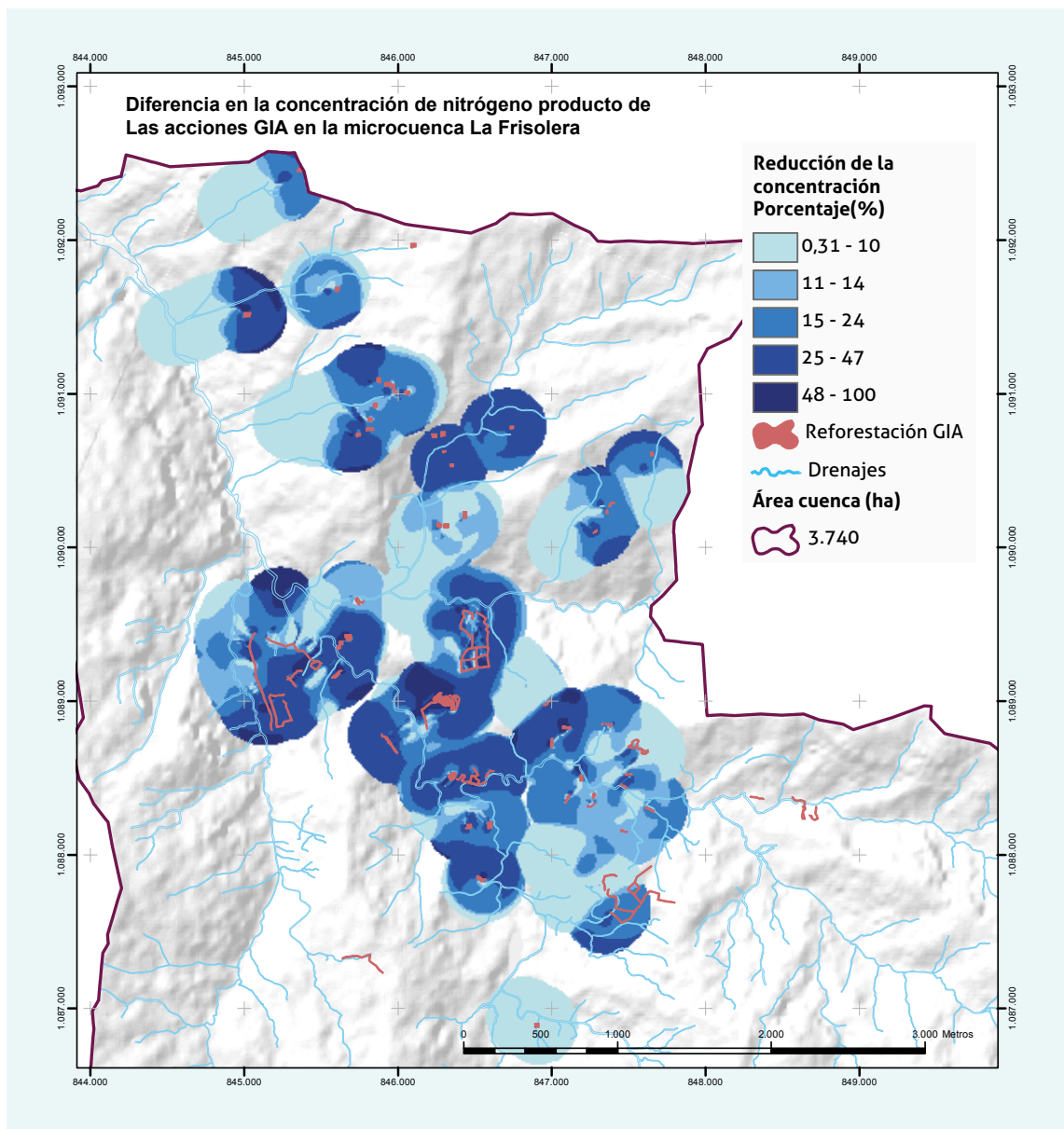


Figura 16. Diferencia de concentración de nitrógeno entre el escenario actual y el escenario inicial.

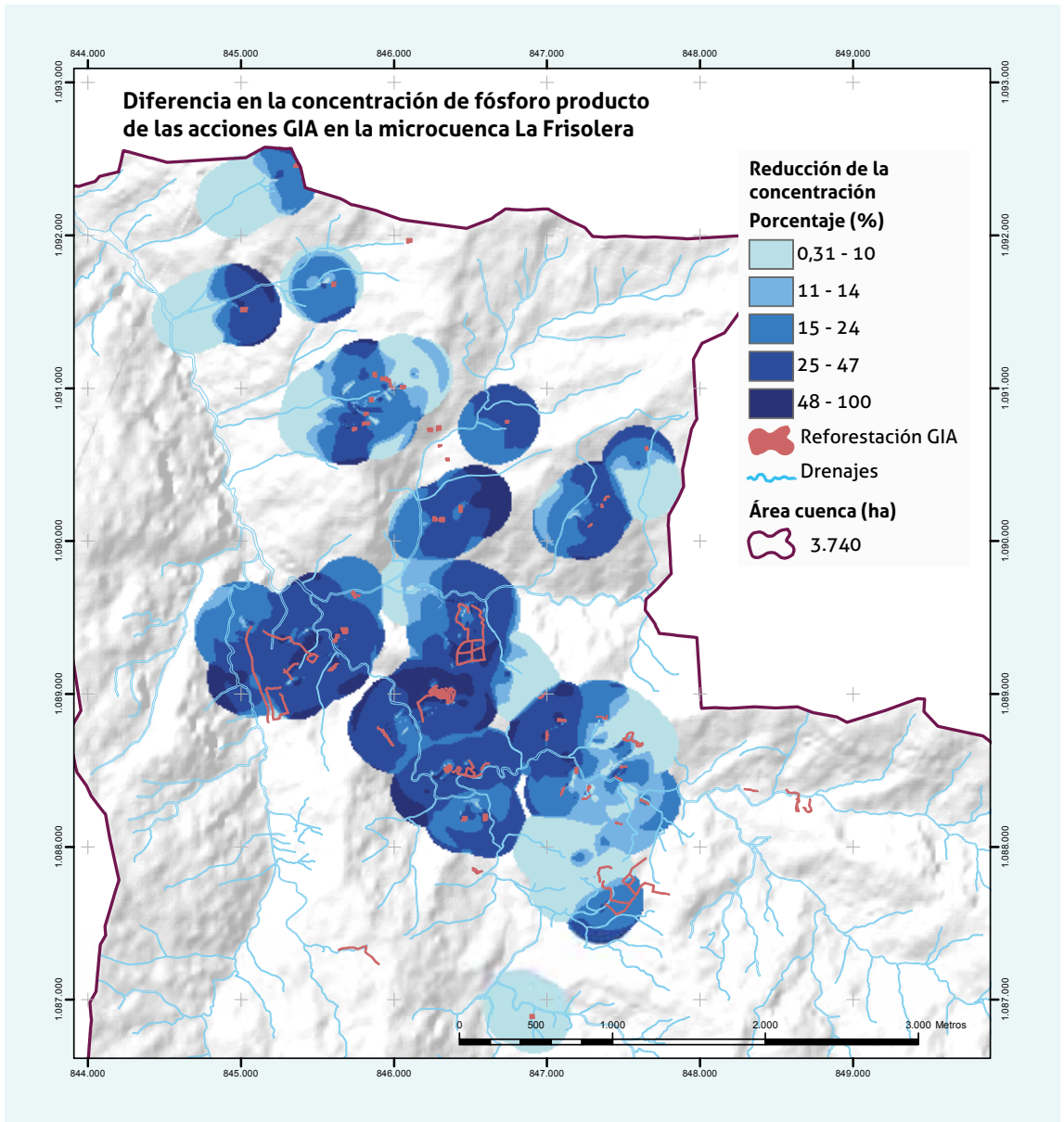


Figura 18. Diferencia de concentración de fósforo entre el escenario actual y el escenario inicial.

Con base en el análisis de paisaje anterior, se desarrolló una propuesta de manejo que permita procesos de reforestación dirigidos a reducir la contaminación producida por los fertilizantes aplicados durante la producción del café. Para este tercer escenario, se llevó a cabo el paso 12.

Paso 12. Propuesta de manejo de paisaje con base al análisis realizado

Las acciones forestales y agroforestales del Proyecto Gestión Inteligente del Agua tuvieron un efecto local positivo en la depuración de fósforo y nitrógeno difusa producida en el proceso de fertilización de los cafetales. Cabe resaltar que las acciones adicionales del proyecto como los son el plan de bioingeniería, las soluciones de agua en las fincas, la renovación de cafetales con fertilización basada en análisis de suelos y las múltiples acciones de formación y participación comunitaria, generan un impacto positivo integral en la calidad y disponibilidad de agua de la microcuenca.

Adicional a esto, el Proyecto GIA ha generado espacios para discutir y analizar los impactos de las acciones realizadas y, a su vez, proponer herramientas y nuevas formas de trabajo que permitan aumentar los efectos positivos dentro de las cuencas cafeteras con relación al manejo del recurso hídrico.

Con base en el análisis integral realizado, este último paso busca optimizar los recursos destinados a proteger los recursos hídricos de las cuencas cafeteras, mostrando de forma muy específica dónde deben realizarse las siembras para generar el mayor efecto depurador de las coberturas boscosas.

Esta propuesta prioriza las zonas de reforestación, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- a.** Las zonas disponibles de mayor concentración de contaminación difusa
- b.** Los nacimientos de fuentes de aguas en una extensión por lo menos de 100 m a la redonda, medidos a partir de su periferia
- c.** Las áreas disponibles alrededor de una faja no inferior a 30 m de ancho, paralela a las líneas de mareas máximas, a cada lado de los cauces de los ríos, quebradas y arroyos, sean permanentes o no, y alrededor de los lagos o depósitos de agua
- d.** Los terrenos disponibles con pendientes superiores al 100% (45°)
- e.** Las zonas disponibles con menor densidad de borde de bosque
- f.** Las áreas disponibles que aumenten la conectividad del bosque ripario

La Figura 18 muestra las áreas disponibles para la reforestación cuando el objetivo es mejorar la infiltración del agua contaminada por fertilizantes (sin tener en cuenta los criterios e y f. Con esta estrategia se busca aumentar las áreas de bosque, su conectividad y su densidad de borde, en zonas que no afecten la productividad del café. En general, estos criterios de siembra propuestos permiten reformar los relictos de bosque de tal forma que tengan más continuidad y se reduzca la fragmentación, enfocado específicamente en la protección las zonas riparias.

Para aumentar el efecto depurador de las coberturas boscosas deben sembrarse con especies de árboles nativos en la vecindad de los mismos bosques, para aumentar su contigüidad del bosque.

Escenario 3. Coberturas del bosque después de aplicar la propuesta de manejo con base en el análisis de paisaje

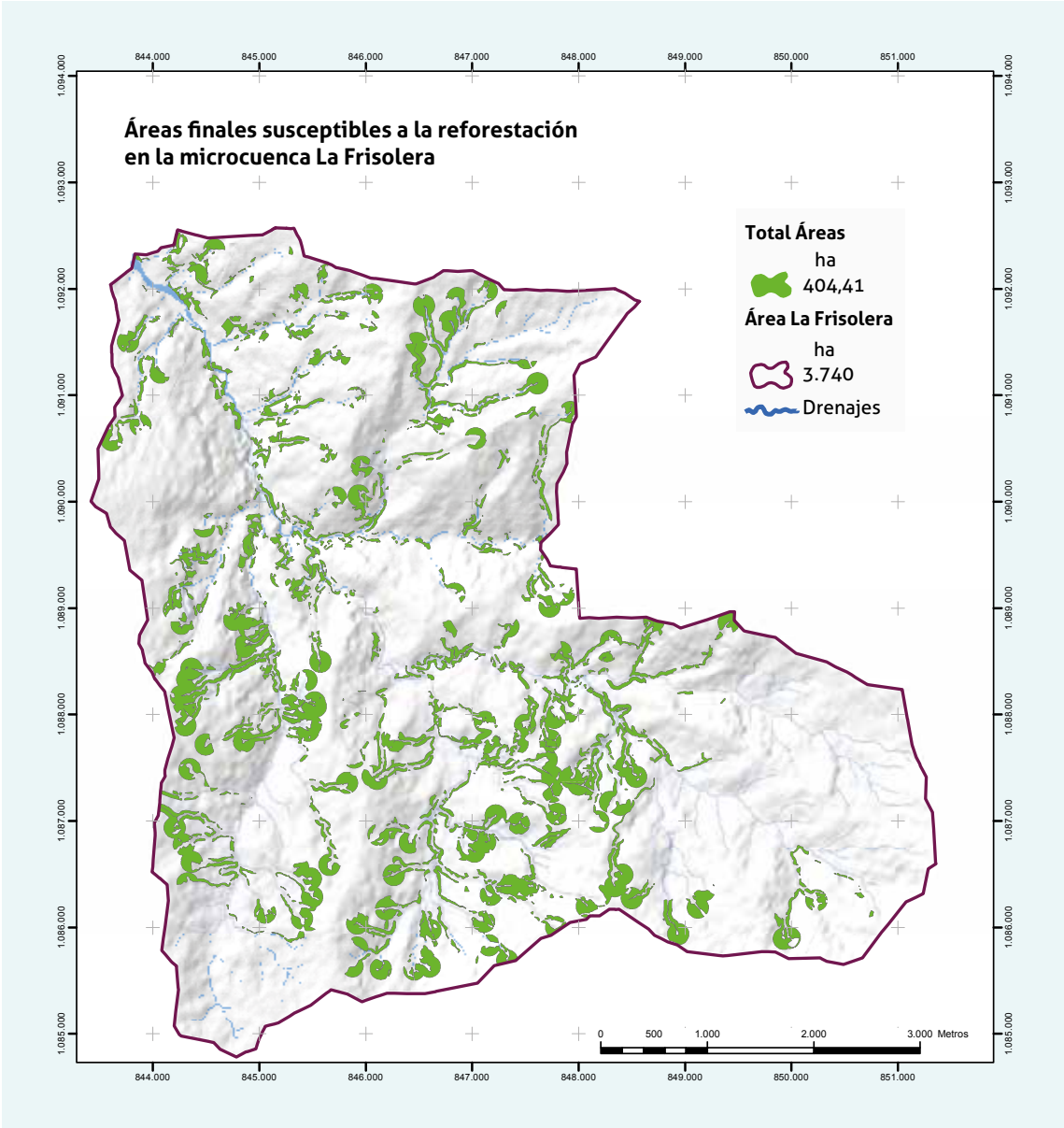


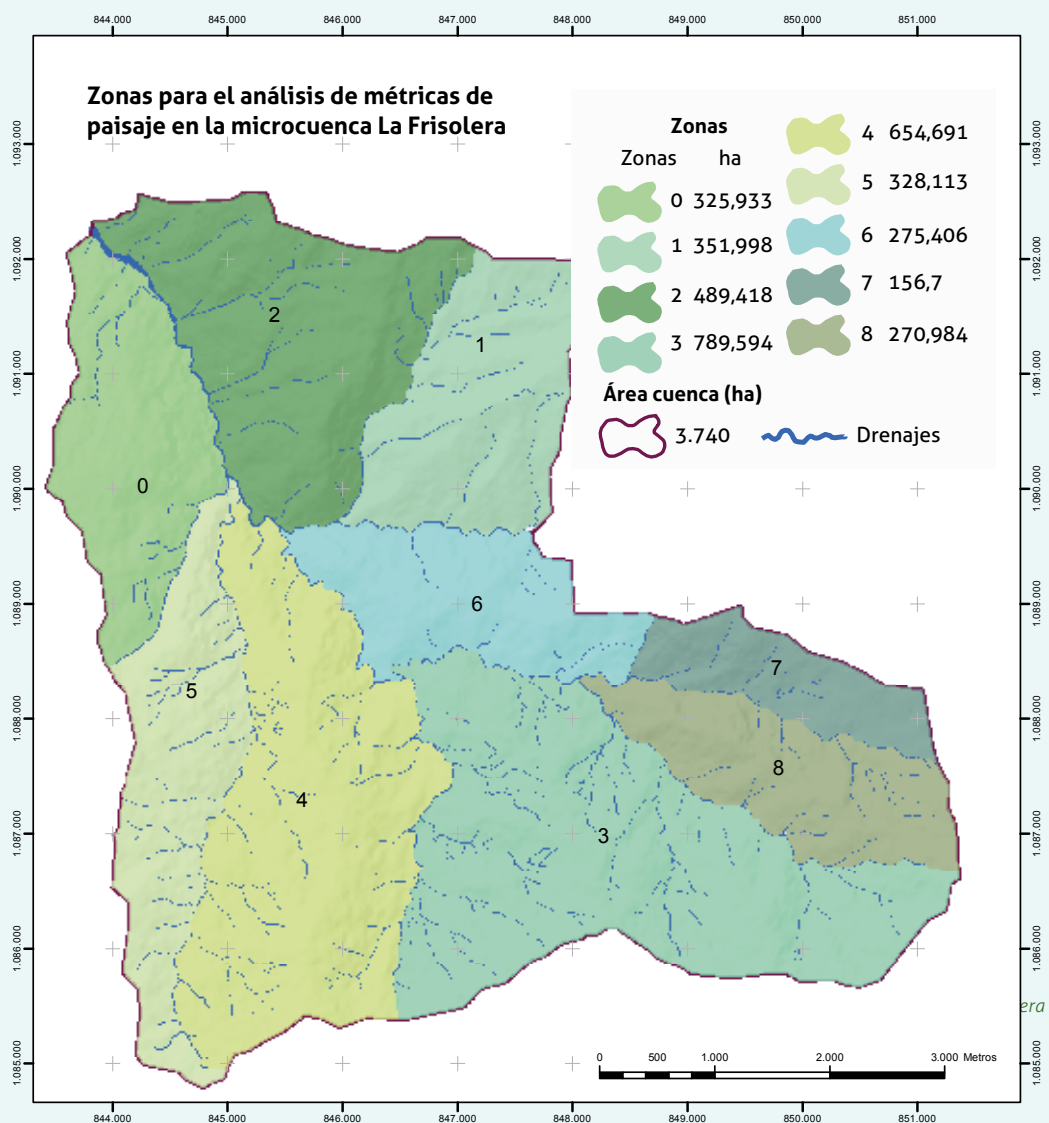
Figura 18. Áreas susceptibles a reforestar con base en los criterios de selección propuestos.

Métricas del paisaje

Para incluir las métricas de paisaje que indican conectividad entre parches y densidad de borde en las coberturas boscosas, dentro de los criterios de selección de áreas a reforestar se subdividió la cuenca en sub-zonas, de acuerdo a la configuración de drenajes (Figura 19). Posteriormente, se determinaron los dos índices para cada una

de estas sub-zonas, con el fin de establecer cuáles de ellas tienen los mayores valores de fragmentación y los menores índices de densidad de borde, indicando una baja capacidad de depuración. El mapa final indica cuáles son las zonas prioritarias a reforestar, basados en los criterios de selección de áreas propuesta y en las sub-zonas con métricas que reflejen un menor desempeño con relación a la capacidad de depuración de la contaminación difusa producida en la fertilización del café.

Para focalizar aún más las acciones de reforestación propuestas, se incluyeron dos métricas del paisaje, descritas en los criterios e y f (densidad de borde y conectividad). Estas métricas se correlacionan significativamente con la calidad de agua, es decir, a mayor densidad de borde mayor capacidad de depuración de las coberturas boscosas. Para esto se utilizó una caja de herramientas de Python para los análisis zonales estructurales de paisaje (Adamczyk y Tiede, 2017).



La Figura 20 (a y d) muestra cómo la densidad de café se concentra en las sub-zonas 0, 1, 2 y 6, siendo esta última la que presenta la mayor densidad de café (37,3%). Este mapa ayuda a enfocarse en la zona de la microcuenca donde hay una mayor concentración de actividad cafetera, por ende, donde hay una mayor contaminación difusa proveniente de las actividades de fertilización. Con respecto a la densidad de borde de bosque (b y e de la Figura 20), ésta es la longitud total de todos los segmentos de borde de bosque por hectárea para el paisaje bajo consideración (m/ha). El borde es 0 cuando no hay área de bosque en el paisaje y aumenta cuando el paisaje es más complejo, es decir, contiene más borde de bosque. La zona con menor densidad de borde es la sub-zona 1. En todas las sub-zonas, excepto en las sub-zonas 0, 5 y 7, las actividades de reforestación del Proyecto GIA aumentaron la densidad de borde de los bosques. En el cálculo de la conectividad de parche (c y f de la Figura 20) se encontró que los resultados no eran concluyentes debido a las variaciones presentadas en zonas donde no se realizó algún tipo de intervención del Proyecto GIA (zonas 7 y 8).

Luego del análisis de métricas del paisaje, se definió que las sub-zonas prioritarias a reforestar son la sub-zona 0, con 30 ha disponibles a reforestar, y la sub-zona 1, con 26 ha disponibles para reforestar (Figura 21). Siendo la sub-zona 1 la más prioritaria entre las dos elegidas. Al hacer los mismos cálculos para el escenario inicial y el actual, dentro de estas dos zonas se encontraron reducciones en la concentración de fósforo y nitrógeno significativas para la sub-zona 1 (Tabla 8).



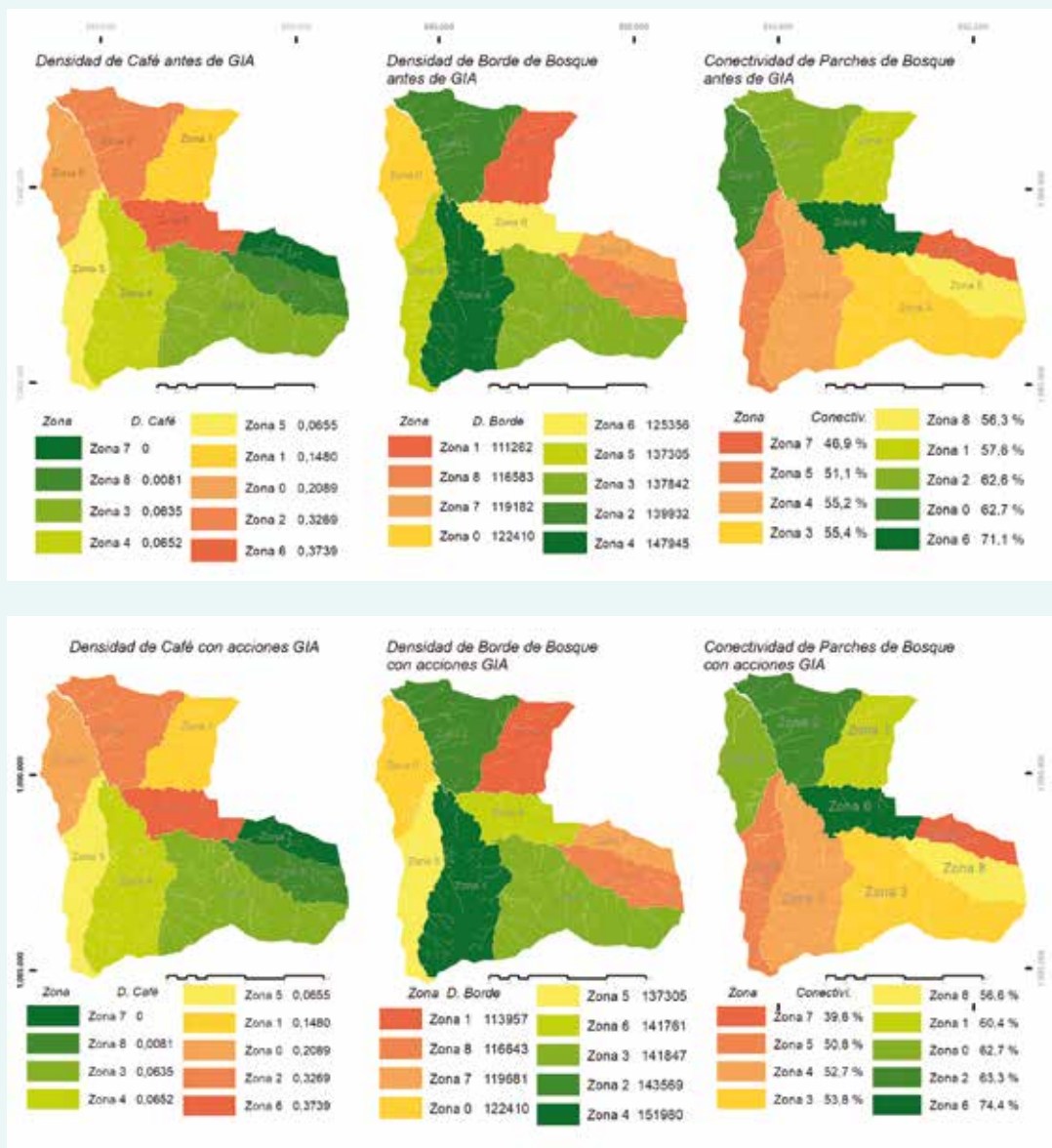


Figura 20. Métricas de paisaje para los Escenarios 1 y 2. Densidad de café (a y d), densidad de borde de bosque (c y d) y conectividad de parches de bosque, (c y f).

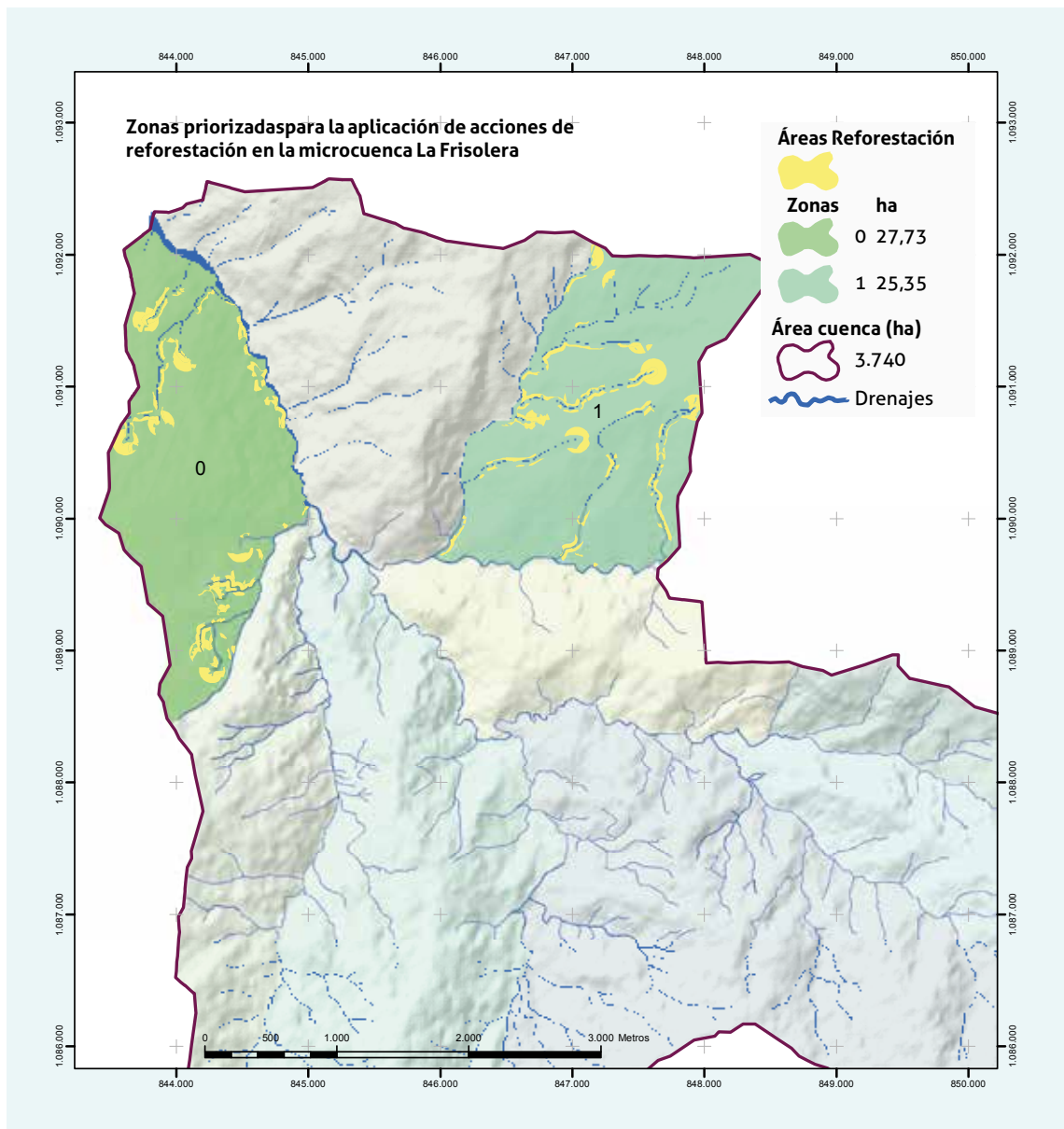


Figura 21. Zonas priorizadas con sus respectivas áreas susceptibles a reforestar

Tabla 7. Promedio de las concentraciones locales en las zonas priorizadas para las acciones de reforestación dentro del Proyecto GIA.

Escenario	Zona 0		Zona 1	
	Fósforo (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	Fósforo (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)
Escenario 1: Antes de las acciones del Proyecto GIA	22,63	156,48	17,69	117,70
Escenario 2: Después de las acciones del Proyecto GIA	22,77	156,48	17,06	117,60
Escenario 3: Acciones propuestas (potencial)	21,48	147,77	13,62	88,30
Porcentaje Reducción (%)	5,08	5,57	23,01	24,98

* El porcentaje de reducción se refiere a la diferencia entre acciones GIA y propuesto

Discusión

El modelo logra estimar de manera local y zonal el efecto de las coberturas sobre las concentraciones de N y P producto de la fertilización de lotes cafeteros. Es importante destacar la sensibilidad en la unidad de análisis, ya que permite estimar si un parche de una cobertura en particular tiene o no efecto sobre las concentraciones de los contaminantes, a partir de su ubicación geográfica. Si la línea de flujo pasa por una cobertura específica con una curva número (CN) particular, ésta tendrá un efecto sobre la concentración muy diferente a la de otra cobertura con una CN diferente.

La mejor CN para las áreas naturales es 30, asignada a los bosques, y la mejor CN para las áreas semi-naturales es 22, asignada a los lotes de café con sombrío. Es por esta razón que, al determinar los cálculos en los escenarios actual y propuesto, las concentraciones disminuyen, debido a que las coberturas reemplazadas siempre tendrán valores de CN mayores.

Con respecto al valor de CN para el café con sombrío, los sistemas agroforestales conservan muchos de los servicios ecosistémicos que prestaban las áreas naturales presentes anteriormente, sin sacrificar la productividad agrícola, en este caso, la productividad cafetera.

El modelo desarrollado es una primera aproximación, cuyo objetivo no se centra exclusivamente en la cuantificación de la concentración de N y P en el agua de escorrentía producto de la fertilización de lotes cafeteros, sino que pretende demostrar el potencial efecto depurador de las distintas coberturas del paisaje y la importancia de su manejo a futuro. Es por ello que, para el desarrollo del mismo, se han tomado ciertas condiciones, las cuáles pueden afectar de forma considerable la incertidumbre de los resultados.

Una de las condiciones más importantes tiene que ver con asumir que los nutrientes disueltos en el agua infiltrada dejan de ser un contaminante potencial en la microcuenca. Aunque es cierto que la infiltración de agua en las distintas coberturas puede tener un efecto importante sobre la mitigación de los contaminantes disueltos, una parte de los mismos podrá llegar a otros compartimentos ambientales, como por ejemplo las aguas subterráneas, con su consecuente efecto negativo. Dichos contaminantes, y debido a las relaciones río-acuífero, podrán llegar de nuevo a los cuerpos de agua superficial, aumentando el riesgo de eutrofización.

En el caso del P, este supuesto es mucho más factible, pues el P (P_2O_5) en contacto con el suelo en su proceso de infiltración es fácilmente adsorbido, sobre todo en la presencia de arcillas.

Sin embargo, el comportamiento del N es mucho más complejo. Por un lado, cuando N se encuentra en su forma oxidada (NO_3), muy común al entrar en contacto con el suelo, es considerado un elemento móvil. Aunque una parte del NO_3 queda retenido en el agua del suelo y puede ser asimilado por la vegetación, otra parte importante se lixivia a zonas profundas, donde podrá volver a los cuerpos de agua superficial en zonas de descarga. De igual forma, dicho elemento, una vez en el acuífero, puede aumentar los niveles de NO_3 en aguas subterráneas, llegando incluso a niveles peligrosos para el consumo humano. Por otro lado, la materia orgánica del suelo, sobre todo en zonas boscosas (gran presencia de hojarasca en descomposición), favorece los procesos de denitrificación o amonificación, con la pérdida de N en forma de N_2 (gas). Las coberturas boscosas, que limitan la velocidad del agua, aumentan la capacidad de retención de agua en el suelo, aportan elevada materia orgánica y pueden ayudar en los procesos de denitrificación.

Por todo ello, sería necesario realizar una revisión del modelo, para que no sólo tenga en cuenta los factores relacionados con la infiltración debido a la cobertura del suelo, sino el potencial efecto de mitigación/lixiviación del suelo.

Otras asunciones relevantes son las relacionadas con los eventos de precipitación. Para el presente modelo, se ha asumido un evento de precipitación tipo, calculado a partir del valor máximo por evento de precipitación registrado para la zona, así como un porcentaje de pérdida del fertilizante aplicado. Como es de suponer, la lixiviación o pérdida por escorrentía de dicho fertilizante dependerá, no sólo de la intensidad del evento de precipitación, sino de otros factores relevantes, como el momento de aplicación, la carga aplicada, el tipo de compuesto utilizado o el manejo realizado.







Análisis de paisaje

**CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES**

4

Conclusiones

- El estudio muestra que algunas coberturas de la tierra, como el café con sombrío y el bosque, tienen la capacidad de mitigar los efectos potenciales de la contaminación difusa proveniente de los fertilizantes aplicados al café. La razón de tal efecto es el mayor tiempo de retención de los flujos de contaminantes.
- El modelo muestra que para mantener las funciones del ecosistema en las áreas de café, la presencia e interconexión de la vegetación nativa es crítica.
- El análisis también evidenció que la reforestación no solo tiene un beneficio adicional en términos de biodiversidad y protección de los suelos, sino que tiene efectos en las funciones ecosistémicas, como la reducción de la contaminación en las aguas de la microcuenca.
- La plantación de árboles debe hacerse en áreas donde los flujos de contaminantes se están escapando, de modo que puedan ser interceptados. El modelo indica las áreas donde es muy útil orientar las inversiones en los cambios de cobertura de la tierra y optimizar el uso de los recursos.
- El modelo indica que las áreas de reforestación implementadas por el Proyecto GIA (Escenario 2) tuvieron un gran efecto potencial en la reducción de la contaminación a escala local. Los resultados del modelo muestran una posible reducción en la contaminación de nitrógeno del 20% al 80% (dependiendo de la ubicación).
- Este tipo de intervención para reducir la contaminación difusa mediante cambios en la cobertura de la tierra, es complementaria a las principales implementaciones de Proyecto GIA para reducir la contaminación puntual. Las intervenciones de cobertura terrestre afectan la contaminación difusa, mientras que el beneficio ecológico del café y los tratamientos de aguas residuales están dirigidos a la contaminación de fuentes puntuales.
- La preparación de un mapa de cobertura terrestre a partir de sensores remotos (fotos aéreas) fue esencial para la toma de decisiones en este tipo de proyectos.

- El estado actual del estudio representa el comienzo de un análisis y un modelo que arrojará resultados más precisos, incluyendo parámetros como la evapotranspiración real, el tiempo de retención, la absorción de la planta, las dosis reales de fertilización y la calidad del agua subterránea, así como, los resultados del modelo calibrados con mediciones de campo.
- Los resultados de esfuerzos de reforestación enfocados en la protección del recurso hídrico serán mejores si las intervenciones se realizan en áreas con alta concentración de producción de café, cruzando los flujos de contaminantes.
- Esta herramienta puede ayudar a tomadores de decisiones a enfocarse en inversiones que busquen planificar la reforestación en cuencas fluviales a escala de microcuenca.
- Mediante la incorporación de otros parámetros, puede mejorarse la aplicabilidad de la herramienta.



LITERATURA CITADA

ADAMCZYK, J.; TIEDE, D. Zonal metrics: A Python toolbox for zonal landscape structure analysis. *Computers and geosciences* 99:91-99. 2017.

ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. *Journal of hydrology* 291(1/2):1-27. 2004.

BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of hydrology* 55(1/4):3-23. 1982.

BRUIJNZEEL, L.A. Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees. *Agriculture, ecosystems and environment* 104(1):185-228. 2004.

DE LA CRÉTAZ, A.L.; BARTEN, P.K. Land use effects on stream flow and water quality in the northeastern United States. Boca Raton : CRC, 2007.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ, CENICAFÉ. Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura. Chinchiná : FNC : CENICAFÉ, 2013. 3 vols.

CLÉMENT, F.; RUIZ, J.; RODRÍGUEZ, M.A.; BLAIS, D.; CAMPEAUA, S. Landscape diversity and forest edge density regulate stream water quality in agricultural catchments. *Ecological indicators* 72:627-639. 2017.

DI GREGORIO, A.; JANSEN, L.J.M. Land cover classification system LCCS: Classification concepts and user manual. Roma : FAO, 2005.

DOUGLASS, J.E.; SWANK, W.T. Stream flow modification through management of eastern forests. Asheville : USDA, 1972.

FARLEY, K.A.; JOBBÁGY, E.G.; JACKSON, R.B. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global change biology* 11(10):1565-1576. 2005.

FAO. Los bosques y el agua. Roma : FAO, 2009.

GASCUEL O., C.; MASSA, F.; DURAND, P.; MEROT, P.; TROCCAZ, O.; BAUDRY, J.; THENAIL, C. Framework and tools for agricultural landscape assessment relating to water quality protection. *Environmental management* 43(5):921-935. 2009.

GONZÁLEZ, J.; CUBILLOS, A.; CHADID, M.; CUBILLOS, A.; ARIAS, M.; ZÚÑIGA, E.; JOUBERT, F.; PÉREZ, I.; BERRÍO, V. 2018. Caracterización de las principales causas y agentes de la deforestación a nivel nacional período 2005-2015. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM-Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Programa ONU-REDD Colombia. En Internet: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023780/Caracterizacion.pdf>. Consultado en junio de 2018

GROFFMAN, P.M.; BLAIN, D.J.; BAND, L.E. Down by the riverside: Urban riparian ecology. *Frontiers in ecology and the environment* 1(6):315-321. 2003.

FALKENMARK, M.; MIKULSKI, M. Conceptualization to address growing human landscape press. *GeoJournal* 33(4):355-363. 1994.

FORD, C.R.; LASETER, S.H.; SWANK, W.T. Can forest management be used to sustain water-based ecosystem services in the face of climate change? *Ecological applications* 21(6):2049-2067. 2011.

- HOEKSTRA, A.Y.; CHAPAGAIN, A.K.; ALDAYA, M.M.; MEKONNEN, M.M.** The water footprint assessment manual: Setting the global standard. London : Earthscan, 2011.
- HUPP, C.R.; PIERCE, A.R.; NOE, G.B.** Floodplain geomorphic processes and environmental impacts of human alteration along coastal plain river. *Wetlands* 29(2):413-429. 2009.
- IDEAM.** Metodología para el cálculo del índice de escasez de agua superficial. Lima : INEI, 2004. 27 p.
- JACKSON, R.B.; JOBBÁGY, E.G.; AVISSAR, R.** Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* 310(5756):1944-1947. 2005.
- JARAMILLO R., A.; RAMÍREZ B., V.H.; ARCILA P., J.** Distribución de la lluvia: Clave para planificas las labores en el cultivo de café en Colombia. Chinchiná : Cenicafé, 2011. 8 p. (Avances Técnicos. No. 411).
- KÄNDLER, J.; BLECHINGER, K.; SEIDLER, C.; PAVLŮ, V.; ŠANDA, M.; DOSTÁL, T.; KRÁSA, J.; VITVAR, T.; ŠTICH, M.** Impact of land use on water quality in the upper Nisa catchment in the Czech republic and in Germany. *Science of the total environment* 586:1316-1325. 2017.
- KLAUS-JURGEN, E.** Encyclopedic Dictionary of Landscape and Urban Planning: Multilingual Reference Book in English, Spanish, French and German. Springer Science & Business Media. 2010. Consultado el 15 de febrero de 2018.
- LOCKABY, B.G.; CONNER, W.H.; MITCHELL, J.** Floodplains. In: JØRGENSEN, S.E.; FAITH, B.D. *Ecosystems: Encyclopedia of ecology.* Oxford : Elsevier, 2008.
- MATTHIAS K., A.; KATJA B., A.; CHRISTINA S., A.; VILÉM P., B.; MARTIN Š., C.; TOMÁŠ D., C.; JOSEF K., C.; TOMÁŠ V., C.; MARTIN Š., C.; MALAVOLTA, E.** Manual de nutrición mineral de plantas. Sao Pablo : Agronómica ceres, 2006. 631 p.
- MCGARIGAL, K.; MARKS, B.J.** Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Portland : Department of agriculture. Forest service, 1995. 122 p.
- MURRAY, A.B.; PAOLA, C.** Modelling the effect of vegetation on channel pattern in Bedload rivers. *Earth surf process landf* 28(2):131-143. 2003.
- NAGY, R.C.; LOCKABY, B.G.; HELMS, B.** Water resources and land use and cover in a humid region: The southeastern United States. *Journal of environmental quality* 40(3):867-878. 2011.
- NAIMAN, R.J.; DÉCAMPS, H.; MCCLAIN, M.E.** Riparia: Ecology, conservation and management of streamside communities. Burlington : Elsevier academic, 2005.
- OU, Y.; WANG, X.; WANG, L.; ROUSSEAU, L.N.** Landscape influences on water quality in riparian buffer zone of drinking water source area, northern China. *Environmental earth sciences* 75(2):114. 2006.
- PIZARRO, R.; ARAYA, S.; JORDÁN, C.** The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. *Journal of hydrology* 327(1/2):249-257. 2006.
- SAYER, J., SUNDERLAND, T., GHAZOUL, J., PFUND, J.-L., SHEIL, D., MEIJAARD, E., ... BUCK, L. E. 2013.** Ten principles for a landscape approach to reconciling agriculture, conservation, and other competing land uses. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(21), 8349–8356.

SAYER, J.; SUNDERLAND, T.; GHAZOUL, J.; PFUND, J.L.; SHEIL, D.; MEIJAARD, E.; VENTERA, M.; BOEDHIHARTONOA, A.K.; DAY, M.; GARCIA, C.; OSTEN, V.C.; BUCK, L.E.; SHEIL, D.; MURDIYARSO, D. How forests attract rain: An examination of a new hypothesis. *BioScience* 59(4):341-347. 2009.

SCHOONOVER, J.E.; LOCKABY, B.G.; HELMS, B. Impacts of land cover on stream hydrology in the west Georgia piedmont, USA. *Journal of environmental quality* 35(6):2123-2131. 2006.

SHEIL, D.; MURDIYARSO, D. How Forests Attract Rain: An Examination of a New Hypothesis, *BioScience*, Volume 59, Issue 4, 1 April 2009, pp 341–347.

SHI, P.; ZHANG, Y.; LI, Z.; LI, P.; XUA, P. Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales. *Catena* 151:182-190. 2017.

SLIVA, L.; WILLIAMS, D.D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality. *Water research* 35(14):3462-3472. 2001.

SUN, G.; ZHOU, G.; ZHANG, Z. Potential water yield reduction due to forestation across China. *Journal of hydrology* 328:548-558. 2006.

Ten principles for a landscape approach to reconciling agriculture, conservation, and other competing land uses. *PNAS* 110(21):8349-8356. 2013.

TRABUCCO, A.; ZOMER, R.J.; BOSSIO, D.A. Climate change mitigation through afforestation/reforestation: A global analysis of hydrologic impacts with four case studies. *Agriculture, ecosystems and environment* 126(1/2):81-97. 2008.

ZHANG, L.; DAWES, W.R.; WALKER, G.R. Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance. Canberra : Research center for catchment hydrology : CSIRO, 1999.