

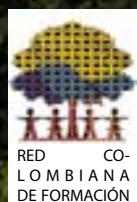
Álvaro del Campo Parra Lara

Incendios

de la **cobertura vegetal**
en **Colombia**

Tomo I

Dolors Armenteras Pascual • Francia Helena Bernal Toro
Federico González Alonso • Mónica Morales Rivas
José Daniel Pabón Caicedo • Gabriel Eduardo Páramo Rocha





INCENDIOS
DE LA COBERTURA VEGETAL EN COLOMBIA
TOMO I

Álvaro del Campo Parra Lara

Incendios

de la **cobertura vegetal**
en **Colombia**
Tomo I

Dolors Armenteras Pascual • Francia Helena Bernal Toro
Federico González Alonso • Mónica Morales Rivas
José Daniel Pabón Caicedo • Gabriel Eduardo Páramo Rocha



Incendios de la cobertura vegetal en Colombia / Álvaro del Campo Parra Lara. -- Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2011. 232 p.; 28 cm. Incluye bibliografía e índice ISBN 978-958-8713-02-1 (obra completa) ISBN 978-958-8713-03-8 (v.1) 1. Incendios forestales – Colombia. 2. Impacto ambiental. 3. Conservación de los recursos naturales. 4. Cuencas hidrográficas – Cali (Colombia). 5. Cali (Río, Colombia) - Aspectos ambientales. I. Parra Lara, Álvaro del Campo. 632.18 cd 21 ed. A1288165

Incendios de la cobertura vegetal en Colombia
ISBN de la obra completa: 978-958-8713-02-1

Tomo I
ISBN: 978-958-8713-03-8

© **Universidad Autónoma de Occidente**
Km. 2, via Cali – Jamundí – Conmutador : 3188000 A.A. 2790
Valle del Cauca – Colombia
www.uao.edu.co

Primera edición, marzo 2011.

Editor
Álvaro del Campo Parra Lara

Autores
Dolors Armenteras Pascual
Francia Helena Bernal Toro
Federico González Alonso
Mónica Morales Rivas
José Daniel Pabón Caicedo
Gabriel Eduardo Páramo Rocha
Álvaro del Campo Parra Lara

Lector científico
Jorge Enrique Orejuela Garthner

Gestión editorial
Programa Editorial
Dirección de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico

Jefe Programa Editorial
Guido Germán Hurtado Vera
programaeditorial@uao.edu.co

Coordinación Programa Editorial
Paula Andrea Abadía Ruiz
Claudia Lorena González González

Diseño de carátula
Luisa Fernanda Panteves Ospina
FERIVA

Fotografía carátula
Francia Helena Bernal Toro

Diseño y diagramación
Departamento de Arte Feriva

Impresión
Talleres gràficos de Impresora Feriva
Calle 18, No. 3-33
PBX 5249009
www.feriva.com
Cali - Colombia

El contenido de esta publicación no compromete el pensamiento de las instituciones a las cuales se encuentran adscritos sus autores (Universidad Nacional de Colombia y Universidad Autónoma de Occidente), ni a las que financiaron las investigaciones (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Universidad Autónoma de Occidente), como tampoco a las que participan en calidad de co-editores (Universidad Autóno- ma de Occidente, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente –PNUMA- y Red Colombiana de Formación Ambiental). La responsabilidad absoluta de la obra, en todas sus partes, es de los autores.

Este libro no podrá ser reproducido ni modificado, en todo o en parte por ningún medio impreso o de reproducción, sin permiso escrito del titular del Copyright de la presente edición.

Contenido

Abreviaturas y acrónimos.....	9
Nota de Editor	11
Prólogo	13

Parte I

Contexto general

Introducción a la ecología del fuego	17
Resumen	17
Abstract	18
Introducción	18
El fuego en los ecosistemas.....	21
Impactos y efectos ambientales y ecológicos sobre el medio físico natural	24
Impactos sobre la química y la física de la atmósfera.....	24
Impactos sobre la física, la química y la biología del suelo	25
Impactos sobre la química, la física y la ecología del agua.....	28
Impactos y efectos del fuego en la vegetación.....	30
Mortalidad de árboles	31
Interrupción de los procesos reproductivos	31
Disminución de la capacidad de regeneración vegetativa	33
Desplazamiento de especies locales.....	34
Incremento de la susceptibilidad a plagas y enfermedades.....	34
Efectos sobre algunos taxones y grupos sensibles	34
Impactos y efectos del fuego en la fauna.....	36
Tendencias en los impactos y efectos ocasionados	37
Efectos sobre especies y comunidades faunísticas particulares.....	40
Artrópodos	40
Anfibios.....	41
Reptiles.....	43

Aves	45
Mamíferos.....	47
Perspectivas frente al cambio climático.....	50
Consideraciones finales.....	51
Bibliografía	52
Susceptibilidad de las coberturas vegetales de Colombia al fuego	73
Resumen	73
Abstract	73
Introducción	74
Metodología para la clasificación de la susceptibilidad a la ocurrencia de incendios de las coberturas vegetales en Colombia	75
Fundamentos conceptuales.....	75
Características y alcances	76
Métodos y procedimientos.....	77
Generalidades.....	77
Procedimientos específicos para el desarrollo de la caracterización y espacialización de la condición pirogénica de las coberturas vegetales	80
Obtención de las imágenes de sensores remotos Modis.....	82
Realización del mapa de humedad de la vegetación	87
Realización del mapa de carga de combustibles.....	90
Disposición espacial de los combustibles (altura de la vegetación y cobertura o cubrimiento de la vegetación sobre el espacio) y duración de los combustibles en procesos de ignición	91
Elaboración del mapa síntesis de carga total de combustibles.....	94
Elaboración del modelo de combustibles (definición de la condición pirogénica de la vegetación)	97
Elaboración del mapa de susceptibilidad de la vegetación a incendios forestales y de la cobertura vegetal en Colombia	100
Caracterización de la condición pirogénica o inflamabilidad por tipo de coberturas vegetales de cada uno de los ecosistemas del país	100
Introducción	100
Modelo de combustibles	101
Estructura del modelo de combustibles	102
Influencia del fuego sobre los ecosistemas	103
Ecosistemas no influidos por el fuego o no combustibles.....	103
Ecosistemas independientes del fuego	103
Ecosistemas sensibles al fuego	107
Ecosistemas influidos por el fuego	107
Ecosistemas dependientes del fuego	107
Tipo de combustible predominante	107
Duración de los tipos de combustible dominantes	113

Carga total de combustibles.....	114
Altura de la vegetación.....	114
Cobertura de la vegetación	116
Biomasa aérea total (carga)	116
Humedad de la vegetación	119
Carga total	119
Condición pirogénica de la vegetación	121
Susceptibilidad de las coberturas vegetales de Colombia a la ocurrencia de incendios.....	123
Generalidades.....	123
Susceptibilidad de los ecosistemas según la influencia que el fuego juega sobre ellos.....	124
Grado de susceptibilidad de los biomas colombianos a los incendios de la cobertura vegetal	130
Susceptibilidad muy alta	130
Susceptibilidad alta	132
Susceptibilidad moderada.....	133
Susceptibilidades baja y muy baja	136
Conclusiones y recomendaciones.....	138
Sobre la metodología empleada	138
Sobre los resultados obtenidos	140
Bibliografía	142
Los incendios de la cobertura vegetal en Colombia y su relación con la variabilidad climática y con el cambio climático	145
Resumen	145
Abstract	145
Introducción	146
Datos y métodos de análisis.....	147
La distribución espacial de la precipitación, de la vegetación y de los incendios de la cobertura vegetal en Colombia.....	149
El ciclo anual de la precipitación y de los incendios de la cobertura vegetal en Colombia.....	153
Las fases extremas de la variabilidad climática y los incendios forestales en Colombia	154
Cambio climático y los incendios forestales en Colombia	159
Conclusiones y recomendaciones.....	163
Agradecimientos	163
Bibliografía	163
Incidencia de los incendios forestales sobre la cubierta del suelo en Colombia a partir de información derivada de imágenes Modis del período 2000-2009.....	167
Resumen	167
Abstract	168
Introducción	168
Material y métodos.....	170

Área de estudio y fuentes de información	170
Análisis de datos	172
Resultados	172
Discusión	179
Agradecimientos	179
Bibliografía	181

Parte II

Los incendios de la cobertura vegetal en la cuenca media – alta del río Cali,
municipio de Santiago de Cali, Colombia

Principales rasgos biofísicos y socio-económicos de la cuenca del río Cali asociados a los incendios de la cobertura vegetal	185
Resumen	185
Abstract	186
Características biofísicas generales	186
Factores climáticos presentes en la cuenca.....	190
Características socioeconómicas básicas de la cuenca.....	190
Población	190
Género	193
Escolaridad	193
Patrón de poblamiento y arraigo a la cuenca	193
Tenencia de la tierra.....	194
Economía local	195
Gestión ambiental de la cuenca	196
Bibliografía	197
Análisis del fenómeno de los incendios de la cobertura vegetal en la cuenca media del río Cali	199
Resumen	199
Abstract	200
Introducción	200
La dinámica espacio-temporal de los incendios de la cobertura vegetal en la zona de estudio.....	200
Las coberturas vegetales afectadas por el fuego	207
El fuego como fenómeno peri-urbano de la cuenca	211
La percepción comunitaria sobre el fuego de las coberturas vegetales	215
Conclusiones generales y recomendaciones	219
Bibliografía	220
Anexo 1. Índices de gravedad propuestos	231
Agradecimientos	232

Abreviaturas y acrónimos

Ciat	Centro Internacional de Agricultura Tropical
Cifor	Centro Internacional de Investigaciones Forestales
CICV	Conatos de Incendios de la Cobertura Vegetal
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
DAP	Departamento Administrativo de Planeación
Dagma	Departamento Administrativo de Gestión Ambiental
DGPAD	Departamento de Gestión para Atención de Desastres
FAO	Food and Agricultural Organization
FIRMS	Fire Information for resource Management Systems
Fonade	Fondo Financiero de Proyectos de Desarrollo
GIS	Geographic Information Systems
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
IAvH	Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt
ICV	Incendios de la cobertura vegetal
Ideam	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
Igac	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IIAP	Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico
INIA	Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria
Invemar	Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés.
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Modis	The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDII	Normalized Difference Infrared Index
NDVI	Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada
OIMT	Organización Internacional de Maderas Tropicales
Osso	Observatorio Sismológico del Sur Occidente
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
POMCH	Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas
SCBD	Secretariat of the Convention on Biology Diversity
Sinchi	Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas
Sisben	Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios de Programas Sociales
TNC	The Nature Conservancy
UAESPNN	Unidad Administrativa Especial de Parques Nacionales Naturales
UICN	The International Union for Conservation of Nature
Unesco	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
WWF	World Wide Foundation

Nota del editor

Los incendios y conatos de incendios de la cobertura vegetal constituyen en la actualidad uno de los temas de mayor registro en los medios de comunicación a nivel mundial, tanto por su incremento en frecuencia y área afectada, como por sus impactos. En los países del trópico americano como Colombia, el fenómeno muestra una tendencia a la alteración de sus ciclos naturales, afectando especialmente el potencial de producción de bienes y servicios ecosistémicos.

A pesar del panorama nacional de esta problemática, es muy poca la investigación científica publicada en el país orientada a comprender los diferentes aspectos involucrados en los contextos particulares de ocurrencia. La conveniencia de estimular el desarrollo de estudios sobre el tema por la vía de la publicación de sus resultados y, sobre todo, de suministrar insumos de información de base científica a las entidades encargadas de la gestión del riesgo involucrado, han

motivado al Grupo de Estudios Ambientales para el Desarrollo Sostenible de la Universidad Autónoma de Occidente a iniciar una serie de publicaciones que recojan y socialicen los estudios que se realicen.

Cada volumen estará organizado en dos partes. La primera incluirá trabajos de carácter nacional y, la segunda, los regionales o locales. Al presente volumen se han vinculado investigadores de distintas instituciones a los cuales se les agradece sus contribuciones, lo mismo que al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente -PNUMA- a la Universidad Autónoma de Occidente, al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y a la Red Colombiana de Formación Ambiental, por su apoyo para la financiación de la obra.

ÁLVARO DEL CAMPO PARRA LARA
Editor

Prólogo

El conocimiento tradicional sobre el manejo del fuego en sistemas agrícolas o agroforestales en las culturas americanas prehispánicas es rico y ancestral, y aunque los primeros trabajos técnicos sobre los incendios forestales datan de hace un siglo en algunos países de América Latina, apenas hace un par de décadas comenzó a gestarse su estudio sistemático. Existen avances relevantes, pero aún es largo el trecho por recorrer. El escenario de ambientes alpinos, templados, semiáridos y tropicales húmedos conjugado con la multiplicidad cultural de dicha región del mundo da como producto un complejo mosaico de regímenes de fuego, políticas oficiales de manejo de incendios forestales y tradiciones en su manejo comunitario, así como un crisol de problemáticas relacionadas con estos fenómenos y sus efectos ambientales.

Igualmente copiosas son las aproximaciones que el estudio del fuego puede abordar: análisis espacio-temporales y peligro

de ocurrencia, ecología, cuestiones sociales, seguridad, aspectos financieros, manejo integral, efectos ambientales regionales o globales, por citar algunos ejemplos. En este último caso el calentamiento global no tiene parangón, y aunque incendios forestales y quemas agropecuarias a lo largo y ancho del planeta no son la principal causa del problema, representan un componente relevante del mismo.

Ante la inevitabilidad natural y social del fuego y su causalidad relacionada con problemas de subsistencia se hacen necesarios esquemas de manejo integral que, además de la prevención y combate de incendios forestales, permitan al fuego cumplir su papel ecológico en los tipos de vegetación en los cuales éste es parte de la dinámica ecológica. Debe considerarse además un uso regulado del fuego por las comunidades rurales, todo lo anterior en un marco de minimización de

impactos adversos de los incendios y potenciación de los efectos positivos.

Alcanzar este tipo de metas ideales en nuestros países implica poner en práctica nuevas ideas sustentadas por la investigación científica, pero también prudencia, así como respeto por prácticas rurales de manejo de recursos naturales que han demostrado su valía, mejora de aquellas perfectibles, atención a problemas de subsistencia, suma de voluntades de diversos sectores de Gobierno en diferentes niveles, autoridades de las comunidades rurales, organizaciones no gubernamentales, funcionarios de la conservación, así como marcos de normatividad y legislación, además de educación del público en general y la indispensable investigación científica y tecnológica, entre otros aspectos. La meta ideal: menos fuego malo y más fuego bueno, sin detrimento de los pobres en el campo, de la sociedad en general, ni del ambiente.

Independientemente del derrotero que cualquier nación asume en el manejo del fuego, el sustento de la investigación en sus diversas facetas, es fundamental. Colombia la megabiodiversa, la de los taironas y los muiscas, la de García Márquez, la del café, la de las flores y esmeraldas, la del vallenato, es ahora también la de la investigación científica en incendios forestales.

El libro que hoy tengo el alto honor de presentar, intitulado *Incendios de la cobertura*

ra vegetal en Colombia (tomo I), involucra a destacados investigadores de las principales universidades privadas y públicas del país: la Universidad Autónoma de Occidente y la Universidad Nacional de Colombia, así como del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Esta publicación es la primera de una serie que sin duda contribuirá a reducir las incógnitas que prevalecen en el país y la región sobre los incendios forestales. Las contribuciones abordan asuntos relevantes y de actualidad, como la ecología y efectos del fuego en ambientes tropicales, su relación con el clima y el cambio climático global, el estudio de su incidencia nacional a partir de imágenes de satélite, la susceptibilidad de las distintas coberturas vegetales al fuego en el territorio colombiano y la dinámica espacio-temporal de los incendios en una cuenca particular.

Con sumo agrado damos la bienvenida a esta nueva y valiosa publicación que divulga parte del cúmulo creciente de información sobre el tema en Colombia, y esperamos que en el futuro también sea alimentada por contribuciones de otros países.

Dante Arturo Rodríguez Trejo. Ph.D
Profesor-Investigador
División de Ciencias Forestales
Universidad Autónoma Chapingo
México



Parte I

Contexto general

Introducción a la ecología del fuego

ÁLVARO DEL CAMPO PARRA-LARA^{1,2}
FRANCIA HELENA BERNAL-TORO^{1,3}

Resumen

Los estudios sobre incendios de la cobertura vegetal y biodiversidad son de gran importancia en la comprensión de las tensiones y conflictos que el desarrollo establece en las relaciones sociedad-naturaleza, razón por la cual en el presente capítulo se revisan algunos de los principales impactos potenciales del fenómeno para la biodiversidad vegetal. El fuego ha sido históricamente una fuerza evolutiva de la naturaleza, tanto en las especies biológicas, como en los ecosistemas y el

paisaje. Sin embargo, los cambios de uso del suelo ocurridos durante los tres últimos siglos en los distintos continentes, conjugados con los cambios climáticos de carácter global y regional, han conllevado a la alteración de los patrones naturales de ocurrencia de este fenómeno en la mayor parte de los ecosistemas con coberturas vegetales, transformándolos, disminuyendo su biodiversidad y comprometiendo su capacidad productiva. Los principales impactos y efectos ecológicos sobre las especies biológicas se derivan de la alteración de las condiciones microclimáticas

1 Grupo de Estudios Ambientales para el Desarrollo Sostenible, Grupo A de Colciencias. Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia
2 Magíster en Ciencias; Programa de doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo, Programa Interinstitucional Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Chapingo (México) e Instituto Tecnológico de Costa Rica. alcampo@uao.edu.co
3 Administrador del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales y estudiante de la Especialización en Gestión Ambiental de la Universidad Autónoma de Occidente. fhbernal@uao.edu.co

necesarias para su reproducción y desarrollo, de la reducción del tamaño de las poblaciones locales por muerte directa o diferida de sus individuos, de la modificación de sus estructuras poblacionales, de la disminución de su diversidad genética, de la generación de condiciones para el ingreso de nuevas especies competidoras y de la alteración de las interacciones biológicas y ecológicas con otras especies.

Palabras clave: incendios de la cobertura vegetal, biodiversidad, impactos y efectos del fuego, trópico.

Abstract

Studies about fires on vegetable covers and on biodiversity are very important at the moment of understanding the tensions and conflicts that the development sets out in society-nature relations; with that in mind, this article reviews some of the major potential impacts of this phenomenon on the vegetable biodiversity. Fire has historically been an evolutionary force of nature both in biological species and ecosystems, as well as in landscapes. However, changes in the usage of land throughout the last three centuries in all the continents, combined with the global and local weather changes have led to an alteration on the natural patterns of occurrence of this phenomenon in most ecosystems which count on vegetable cover. Hence, the latter have been transfor-

med and have decreased their biodiversity compromising their productive capability. The main impacts and ecological effects on biological species are derived from the disturbance of the micro-climatic conditions -which are necessary for their reproduction and development, the downsizing of local populations due to direct or differed death of individuals, the population structure modification, the genetic diversity decrease, the generation of conditions for the presence of new competing species, and the disturbance of biological and ecological interactions amongst species.

Key Words: vegetable cover fires, biodiversity, impacts and effects of fire.

Introducción

Los Incendios de la Cobertura Vegetal* (ICV) pueden ser considerados como perturbaciones ecológicas de efectos discretos o difusos, graves o destructivos, producidos por fuego de origen natural o antrópico, cuya dinámica responde fundamentalmente a la concurrencia simultánea de tres o más condiciones en un mismo sitio (tipo de vegetación, cantidad de combustible, oxígeno, condiciones meteorológicas, topografía, actividades humanas, entre otras) los cuales se desarrollan sin control ni límites preestablecidos sobre terrenos con alguna clase de cobertura vegetal (nativa, cultivada o inducida), utilizando como fuente de combustible

la vegetación viva o muerta y, por el riesgo que representa para los sistemas naturales o sociales, deben prevenirse y extinguirse.

Los ICV no son un fenómeno nuevo en la historia de la Tierra* ni sus impactos siempre son negativos**. El problema surge cuando su recurrencia supera la capacidad de resiliencia de los ecosistemas y altera de manera irreversible procesos naturales que sirven de base para la producción de bienes y servicios ambientales. Podría afirmarse que hoy el fenómeno es la expresión de la degradación de los regímenes naturales del fuego en la mayor parte de los ecosistemas terrestres. Infortunadamente, durante décadas prevaleció en el imaginario de los estados, los gobiernos y del público en general de los distintos países una visión basada en supuestos equivocados como los siguientes: a) considerar los incendios de la cobertura vegetal como un fenómeno de origen fundamentalmente natural y de impactos locales restringidos a la vegetación, b) sobredimensionar la capacidad de la naturaleza para restaurar los ecosistemas afectados hasta

llevarlos de nuevo a sus puntos de partida, y c) considerar que la conservación de las coberturas vegetales constituía una pérdida de oportunidades para el desarrollo frente a otras opciones como la ganadería y la agricultura. Sin embargo, el incremento de la problemática en frecuencia, magnitud e impacto a partir de los años setenta y particularmente los episodios presentados durante los años 1997-1998, llamaron la atención de la comunidad internacional para abordar más integralmente el fenómeno.

Precisamente es a partir del reconocimiento de esta tendencia que empieza a cimentarse -en la década de los noventa- una sensibilidad y preocupación nacional e internacional por esta problemática, dada su tendencia a crecer en frecuencia, magnitud y relación con otros fenómenos como el cambio climático global y la desertificación. Hoy, los ICV son el objeto de trabajo de nuevas especialidades disciplinares y de campos interdisciplinarios y transdisciplinarios como la ecología del fuego,*** que ha focalizado su esfuerzo investigativo en los siguientes temas:

* Los incendios forestales fueron relativamente bajos hasta 1750 debido posiblemente a los efectos de la "Pequeña Edad de Hielo"; que se presentó a partir de 1645. Durante el periodo comprendido entre 1750 y 1870 tuvieron un incremento casi exponencial debido al empleo del fuego para la adecuación del suelo forestal a usos agrícolas y ganaderos, pero entre 1870 y 1970 tendieron nuevamente a disminuir a pesar del incremento significativo de la población mundial. A partir de 1970 se evidencia una nueva tendencia al incremento del fenómeno debido a la combinación de causas, en su mayoría antrópicas (Bowman *et al.*, 2009).

** Una premisa básica de la ecología del fuego forestal es que éste no es bueno ni malo, sino que sus efectos dependen del contexto ecológico y social en el cual se presente. De igual manera, se debe señalar que el fuego constituyó una de las estrategias más efectivas que utilizó el hombre en el proceso de apropiación de la naturaleza.

*** Tiene como objeto de trabajo el conocimiento de los efectos principales y secundarios de carácter ecológico de los incendios (Landsberg, 1997). Los principios generales de este nuevo campo de trabajo se encuentran en las obras de Whelan (1995) y Bond & Van Wilgen (1996). En la actualidad hay una sólida comunidad académica internacional que aborda diferentes aspectos particulares de esta problemática, la cual cuenta con medios especializados de difusión de resultados como Wildlife Forest, International Journal of Wildland Fire, Canadian Journal of Forest Research, aunque también es frecuente encontrar artículos en Acta Amazónica, Australian Journal of Soil and Water Conservation, Acta Oecologia Plant, Biodiversity and Conservation, Biotropica, BioScience, Catena, Diversity and Distributions, Environmental Management, Forest Ecology and Management, Floresta e Ambiente, Hydrological Processes, Journal of Sedimentary Research, Journal of Soil and Water Conservation, Journal of Hydrology, Journal of Tropical Ecology, Journal of Ecology, Journal of Applied Ecology, Journal of Biogeography, Oecologia, Oikos, Nature, Plant Ecology, Revista Ciência Florestal, Revista Brasileira de Biología, Revista Brasileira de Botânica, Science, Soil Technology, Soil Science Society of America Journal, Water Resources Research. Adicionalmente, cada cuatro años se realiza la Conferencia Internacional sobre Incendios Forestales (EE.UU, 1989; Canadá, 1997; Australia, 2003; España, 2007 y Sudáfrica, 2011).

* Los autores comparten la perspectiva de comprender los incendios de la cobertura vegetal como una categoría amplia, que incluye los incendios forestales, dada la naturaleza heterogénea de coberturas vegetales sobre las cuales se desarrolla el fuego en Colombia y en las diferentes partes del mundo (Anzola y González, 2004), y porque además permite diferenciarlos de los eventos que se presentan en las coberturas propiamente boscosas de las zonas templadas, asunto sobre el cual también llama la atención la Secretariat of the Convention on Biology Diversity (SCBD), (2001)

- a) Física del fuego forestal.
- b) Inflamabilidad de biotas.
- c) Regímenes naturales de incendios.
- d) Evolución de especies biológicas y dinámicas ecológicas asociadas al fuego.
- e) Impactos ecológicos, ambientales, sociales, económicos y culturales.
- f) Valoración económica de impactos y de las acciones de prevención, combate y restauración.
- g) Causalidad.
- h) Evaluación del riesgo.
- i) Uso tradicional del fuego.
- j) Incendios de cobertura vegetal y cambio climático global.
- k) Modelos y estrategias de manejo de combustibles.
- l) Procesos de regeneración y restauración.
- m) Desarrollo de tecnologías de percepción remota.

En cuanto a las regiones que han recibido mayor atención científica, se resalta que no necesariamente han sido aquellas con mayor dinámica de fuego, como África subsahariana (Botswana, Etiopía, Kenya, Namibia, Senegal, Sudáfrica, Tanzania), Asia Central (Afganistán, Armenia, Azerbaijón, Bielorrusia, territorios del norte de China, Georgia, Irán, Irak, Kazajistán, Kirguistán, Mongolia, Pakistán, Federación

Rusa, Tajikistán, Turkmenistán, Ucrania, Uzbekistán); el Sudeste Asiático (Borneo, Cambodia, Indonesia, Laos, Malasia, Myanmar, Filipinas, Singapur, Tailandia y Vietnam), Mesoamérica (México, Guatemala, Nicaragua y Costa Rica); el Caribe (República Dominicana, Cuba) y Sudamérica (Brasil, Argentina, Bolivia, Venezuela, Chile). En la actualidad hay un grado de conocimiento científico más elevado y más detallado sobre diferentes aspectos de los incendios que ocurren en Norteamérica (Estados Unidos y Canadá), el Mediterráneo europeo (España, Portugal, Francia y Grecia), Australia, Euroasia boreal y, más recientemente, el archipiélago indonesio.

Los ecosistemas más estudiados desde el punto de vista del fuego son los bosques boreales de Estados Unidos, Canadá y Euroasia; los bosques de coníferas y de *Quercus* de Norteamérica; los bosques australianos de eucaliptos; los bosques pirófilos y matorrales mediterráneos; las sabanas secas y húmedas tropicales de Australia; los humedales asiáticos (Malasia e Indonesia); y los bosques latifoliados del trópico húmedo. En Latinoamérica han merecido atención científica en las dos últimas décadas* los bosques de pinos tropicales (Mesoamérica y el Caribe), la pluviselva amazónica (Brasil y Bolivia, especialmente), El Cerrado** sudamericano, las sabanas venezolanas, los bosques caribeños de montaña (República Dominicana), el bos-

que seco boliviano y los bosques patagónicos de Chile y Argentina.

Los Incendios de la Cobertura Vegetal (ICV) afectan casi todas las ecorregiones de la Tierra, y en los trópicos y subtrópicos se presentan con mayor frecuencia (OIMT, 1997; Cochrane, 2003) debido principalmente al descontrol del fuego usado con propósitos agrícolas y pecuarios por los productores y comunidades rurales en ambientes con condiciones meteorológicas favorables para su propagación. Aunque estos incendios presentan variaciones importantes en magnitud e impacto en contextos biofísicos y socioeconómicos distintos, tienen características comunes: la amenaza que representan para los ecosistemas, la biodiversidad, el clima, la vida y la salud humana, y para las economías locales y nacionales (Barlow y Pérez, 2004; Myers, 2005). Afortunadamente en la actualidad hay una mayor comprensión de los ICV como un problema multicausal y de impactos multidimensionales y sobre sus estrechas relaciones con los procesos de cambio climático global y desertificación.

El fuego en los ecosistemas

El fuego ha sido una de las principales fuerzas evolutivas que han moldeado la estructura, la composición y la distribución geográfica de los ecosistemas con coberturas vegetales del mundo, al impactar sobre sus componentes estructurales, sus dinámicas, sus interrelaciones y sus procesos (Bond y Keeley, 2005). En consecuencia, los ecosistemas han desarrollado un complejo sistema de interrelaciones entre el clima, el suelo y la vegetación el cual hace posible la presencia

o ausencia natural del fuego. Cuando este fenómeno forma parte de la historia natural de un ecosistema determinado, lo hace dentro de un espectro que permite predecir –con cierto nivel de incertidumbre– los atributos de los eventos por ocurrir (frecuencia, patrón espacial, estacionalidad, intensidad, severidad, fuente principal de ignición) en un área determinada (Van Wilgen y Scholes, 1997, citado por Getzin, 2002; Gill y Allan, 2008).

Según el tipo de relación que tengan con el fenómeno mencionado, los ecosistemas se pueden clasificar como *dependientes del fuego*, *influidos por el fuego*, *sensibles al fuego* o *independientes del fuego* (Hardesty *et al.*, 2005). En los primeros, el fuego es esencial para las dinámicas poblacionales de la mayoría de sus especies biológicas, lo mismo que para el mantenimiento de sus procesos ecológicos. En estos ecosistemas un alto porcentaje de las especies de plantas y animales han desarrollado diversas estrategias adaptativas a los incendios, lo cual le permite al ecosistema la conservación, más o menos constante en el tiempo, de sus principales atributos tanto estructurales como funcionales. Aunque en términos generales los ecosistemas tropicales no están adaptados a los Incendios de la Cobertura Vegetal (ICV), se pueden señalar los siguientes casos para el trópico americano: bosques mesoamericanos, caribeños –continentales e insulares– de *Pinus caribea*; los bosques de *Pinus oocarpa* de Honduras, Guatemala, Belice, México y Nicaragua; los bosques de *Pinus occidentalis* de República Dominicana; los bosques de *Pinus tropicalis* de Cuba; los palmares de *Copernicia alba* en el Pantanal paraguayo y de *Mauritia flexuosa* (moriche) en

* Este interés se manifestó de manera más evidente a partir del evento El Niño de 1997-1998, el cual fue particularmente grave. Por ejemplo, en América Central más de 2,5 millones de hectáreas de bosque y de un millón de hectáreas de tierras agrícolas sufrieron incendios (Cochrane, 2002). Para otros países latinoamericanos este evento también fue dramático, como en el caso de Brasil, en donde un millón de kilómetros cuadrados fue afectado en la sola región amazónica (Nepstad *et al.*, 2001).

** Ecosistema considerado como una de las sabanas tropicales más grandes (aproximadamente dos millones de kilómetros cuadrados), ricas (es un biodiversity host post de nivel mundial) y amenazadas (conserva en la actualidad solo el 34% de la superficie de la cobertura vegetal original). Aunque la mayor parte de su área se encuentra en territorio brasileño, parte importante de él lo comparte con Bolivia y Paraguay (Silva y Bates, 2002; Durigan *et al.*, 2007).

Venezuela y Colombia; las sabanas húmedas y secas sudamericanas,* los pajonales de la Puna boliviana; los encinares (*Quercus* spp), tulares (*Typha* spp., asociada principalmente con *Scirpus* spp., *Pharagmites* spp. y *Cyperus* spp) y popales (*Thalia geniculata*, en asocio con *Calathea* spp, *Heliconia* spp, *Panicum* spp, *Paspalum* spp y *Cyperus* spp, entre otros) de México (Myers, S.f.; Espinoza-Martínez *et al.*, 2008; Medina y Silva, 1990; Silva *et al.*, 1990; Abrams, 1992; Solbrig, 1996).

Los ecosistemas *independientes del fuego* tienen como atributo una muy baja probabilidad de presencia natural de incendios, debido a la ausencia de vegetación y a la existencia de condiciones climáticas extremas. Para las especies de estos ecosistemas el fuego tiene un efecto catastrófico y, por lo tanto, puede significar su desaparición local. Ejemplos típicos de estos ecosistemas en Colombia son la vegetación de las zonas más áridas del zonobioma seco tropical caribe y los bosques tropicales lluviosos no estacionales, como los de niebla. Sin embargo, la visión que tradicionalmente se tenía acerca de una supuesta inmunidad de algunos bosques húmedos tropicales a la presencia de incendios viene siendo revaluada a la luz de los eventos presentados en dichos ecosistemas durante las últimas décadas y a resultados de estudios que evidencian ciclos de incendios de largo plazo relacionados con el fenómeno de El Niño, situación que podría insinuar más bien un estatus de *sensibilidad al fuego*.

En cuanto a los ecosistemas *sensibles al fuego*, se destaca que la mayor parte de sus especies biológicas carecen de estrategias adaptativas a este fenómeno e incluso presentan condiciones microclimáticas limitantes para la ignición y propagación natural del fuego (Uhl y Kauffman, 1990), debido a la existencia de doseles cerrados que impiden la penetración de la radiación solar directa, la escasa velocidad del viento en el interior de las masas vegetales y la existencia de altos niveles de humedad generados por las elevadas precipitaciones y la alta evapotranspiración de la densa vegetación que se halla en todos sus estratos. Lo anterior no obsta para que este tipo de formaciones vegetales sean vulnerables a los Incendios de la Cobertura Vegetal (ICV) en los períodos de sequía extrema, como la que se experimentó durante los años en que se produjo el fenómeno de El Niño.

Algunos ecosistemas sensibles al fuego corresponden a bosques latifoliados tropicales y subtropicales que se encuentran en diferentes gradientes tanto altitudinales como de humedad. En el caso colombiano se podría decir que este régimen es propio de los ecosistemas que se ubican en las zonas de alta precipitación y un nivel de humedad atmosférica relativa superior al 75% sostenido durante todos los meses del año, que según Guhl (1975) corresponde a la Amazonia, las márgenes selváticas de los ríos Orinoco, Magdalena y Atrato, al piedemonte de la Orinoquia, a la llanura del Pacífico y al cinturón de bosques de mangle de la costa pacífica.

Los ecosistemas *influidos por el fuego* pueden considerarse como una modalidad o variante de los *ecosistemas sensibles al fuego*, ya que los ICV desempeñan un papel ecológico muy sutil en el mantenimiento de la biodiversidad típica de los ecosistemas de transición y en el predominio relativo de algunas especies de plantas con capacidad de tolerar incendios poco frecuentes y de baja intensidad y severidad. Característicamente corresponden a transiciones entre ecosistemas con distintos regímenes de fuego, algunos de ellos con patrones muy difusos. Por lo general, el fuego se inicia en la fase de vegetación más vulnerable y se propaga hacia otras según las características de sus combustibles (cantidad, humedad y continuidad espacial, principalmente).

Algunos ejemplos de ecosistemas influidos por el fuego son los *bosques de galería* aledaños a los cauces y cañadas de los cursos de agua en las sabanas (Venezuela, Colombia, Brasil) y las islas de vegetación leñosa existentes en matrices de sabanas húmedas, como las presentes en la zona del *Gran Pantanal* (Brasil) y en la cuenca baja del río Magdalena, en Colombia.

En cuanto a la distribución mundial de los regímenes de fuego, su evaluación preliminar adelantada por TNC/WWF/UICN (2004) sobre doscientas ecorregiones priorizadas a nivel mundial por la biodiversidad indican que:

- a) El 18% del área evaluada corresponde a ecosistemas con régimen independiente del fuego, concentrada principalmente en la zona boreal del planeta.

- b) Aproximadamente el 46% de las ecorregiones evaluadas tienen ecosistemas dependientes del fuego, distribuidos en todos los continentes. En Suramérica corresponde a las amplias áreas de sabana húmeda y seca (Llanos Orientales en Colombia, especialmente).
- c) El 36% de las ecorregiones presenta ecosistemas sensibles al fuego, se destaca que su mayor porcentaje se encuentra en mesosuramérica, y es el régimen predominante para Colombia.

Los factores que configuran directa o indirectamente las condiciones para el desarrollo de Incendios de la Cobertura Vegetal (ICV) en un ecosistema determinado son:

- a) Condiciones meteorológicas locales de la época (humedad ambiental, temperatura, vientos, etc).
- b) Características de los combustibles involucrados (humedad, cantidad, compactación, distribución horizontal y vertical, inflamabilidad, relación de combustibles vivos/muertos).
- c) Características físicas del sitio⁴ (pendiente, orientación dominante, ubicación en el paisaje,* tipo de suelo).
- d) Características del ecosistema afectado (fase sucesional; estructura y composición; grado de fragmentación; tamaño, forma y conectividad de los fragmentos; características y demandas ecológicas de las especies vegetales presentes en el área afectada; adaptación de las especies al fuego).

⁴ Chuvieco *et al.*, 1998.

* Algunos estudios sobre comunidades de insectos sugieren que las cimas de las montañas, los cerros o las lomas son los sitios preferidos por algunas especies para aparearse, fenómeno denominado *hilltopping* (Peres *et al.*, 2004; Alcock, 1987; Shields, 1967, citados por Prieto y Dahners, 2006).

- e) Antecedentes de eventos meteorológicos* o ecológicos locales graves o catastróficos (huracanes y tormentas, deslizamientos de tierra, vulcanismo, plagas).
- f) Régimen histórico de perturbaciones (dinámica espacio-temporal y sus tendencias, recurrencia espacial, alteración antrópica del régimen natural de fuego).
- g) Prácticas culturales asociadas a procesos productivos (uso no racional del fuego, manejo descuidado de desechos forestales).
- h) Proximidad a centros poblados, a sitios de interés arqueológico y a infraestructura de servicios o de producción.

Es importante mencionar que es posible mantener los regímenes de fuego anteriormente descritos en contextos de relativa estabilidad climática y ecosistémica de largo plazo y sin perturbación humana importante. Lo anterior significa que cualquier tipo de incendio que se presente por fuera de los límites históricos de intensidad, espacio-temporalidad, severidad y cobertura puede inducir la transformación del ecosistema involucrado en otro totalmente distinto o, en menor grado, la pérdida de su biodiversidad

y casi siempre el incremento de la probabilidad de recurrencia de incendios por el ingreso de nuevas especies “amigables” del fuego.

Impactos y efectos ambientales y ecológicos sobre el medio físico natural

Los impactos y efectos ambientales y ecológicos sobre el medio físico natural son aquellos que modifican las variables físicas y químicas del ambiente (temperatura, humedad, estructura física, composición química, entre otras) y los ciclos naturales en los que intervienen (biogeoquímicos, hidrológico, climático, etc.).

A continuación se hace un recuento de los impactos ambientales causados por los incendios de la cobertura vegetal.

Impactos sobre la química y la física de la atmósfera

El efecto inmediato de los incendios de la cobertura vegetal es la producción de gases** y partículas que resultan de la combustión de biomasa*** y su liberación a la atmósfera. Los gases comúnmente emitidos y que contribuyen al calentamiento global⁵ son óxidos de carbono (CO₂ y CO),^{6****} metano (CH₄); óxido nitroso (N₂O) y otros óxidos de nitró-

geno (NO_x); hidrocarburos alifáticos (HCa) y aromáticos, como el benceno y otros de naturaleza polinucleada (Haltenhoff, 1998; Manso-Jiménez, 2000; Castillo *et al.*, 2003; PNUMA, 2007; Di Bella, 2008). Así mismo, según el tipo de cobertura vegetal y el ecosistema afectado se pueden emitir trazas de otros gases, como en el caso de bosques contaminados por radioactividad, que liberan a la atmósfera radionúclidos de larga vida.* Además de gases, los incendios de la cobertura vegetal liberan a la atmósfera material particulado de diferentes diámetros** y los PM_{2.5} son los más dañinos. La mezcla de este material particulado y gases puede difundirse por la atmósfera y absorber y reflejar la radiación solar media, lo cual dificulta la condensación del agua atmosférica y la formación de ciertos tipos de nubes, e influye de manera determinante en el cambio de los patrones de precipitación local y de los procesos hidrológicos regionales (Ackerman *et al.*, 2000). Adicionalmente, esta mezcla de gases y material microparticulado incide negativamente en la actividad fotosintética de las plantas y disminuye su productividad (Davies y UNAM, 1999), situación que puede incrementarse en incendios de gran magnitud al aumentar la permanencia media del humo en la atmósfera baja debido al cambio del régimen de los vientos locales (Cochrane, 2003).

Otro efecto del fuego al consumir el follaje y en general la vegetación de un sitio, es que disminuye dramáticamente la evapotranspiración de agua de las plantas, lo cual, además de contribuir a la modificación del microclima local, también estimula la persistencia de los incendios al reducir la humedad ambiental. De igual manera, cuando el evento no es muy severo, el calor induce la caída del follaje de las plantas y su resecación por baja humedad, y por consiguiente incrementa la disponibilidad de combustible para la reaparición del fuego.

Impactos sobre la física, la química y la biología del suelo

Los Incendios de la Cobertura Vegetal (ICV) pueden tener grandes efectos sobre el suelo, (Ver Figura 1) componente estructural y funcional fundamental para todo ecosistema que tenga la vegetación como matriz. La severidad del impacto depende principalmente del tipo de suelo,⁷ de su contenido de humedad, de la intensidad, frecuencia y duración del fuego, y secundariamente de la estructura, la textura y la composición del suelo.⁸ En términos generales, los ICV pueden comprometer la conservación de las propiedades o atributos de calidad de un suelo (capacidad para retener agua, para almacenar y

* Este tipo de eventos puede conllevar la caída masiva de árboles y otros tipos de vegetación y originar la acumulación del combustible necesario para el desarrollo de eventos de fuego (Pacheco, 2009).

** Se ha establecido que la composición y cantidad de gases emitidos por los ICV varían notablemente de acuerdo con el tipo de cobertura vegetal, el ecosistema afectado, la concentración o contenido de elementos (carbono, nitrógeno, etc.) en la biomasa afectada y con el porcentaje de eficiencia de la combustión presentada. Al respecto, se recomienda revisar a Barbosa & Fearnside (1999).

*** Las quemaduras de vegetación no son procesos químicamente eficientes debido fundamentalmente al contenido de humedad de los combustibles, los cuales tienden a absorber diferentes cantidades de energía desde el fuego.

⁵ Levine (1991, 1996a, 1996b) hace una excelente compilación de aproximadamente 200 trabajos de investigación sobre distintos tópicos relacionados con la combustión de biomasa y sus diversas implicaciones, entre ellas con el cambio global.

⁶ Los bosques templados y tropicales almacenan, en conjunto, aproximadamente el 38% de los depósitos terrestres de carbono (Muller-Landau *et al.*, 2010).

**** Se estima que los ICV aportan aproximadamente el 20% del total de CO₂ emitido a la atmósfera (FAO, 2007), aunque este porcentaje puede ser mayor para los países en desarrollo (Ceccon y Miramontes, 1999; Cochrane, 2003). Sin embargo, parte del carbono emitido puede ser reasimilado, en el mediano-largo plazo, por parte de la vegetación que se establezca a través de los patrones espacio-temporales de uso del suelo que se le dé al sitio (plantaciones forestales, restauración dirigida, facilitación de los procesos de sucesión vegetal) y de las dinámicas resultantes (Van Breugel, M., 2010).

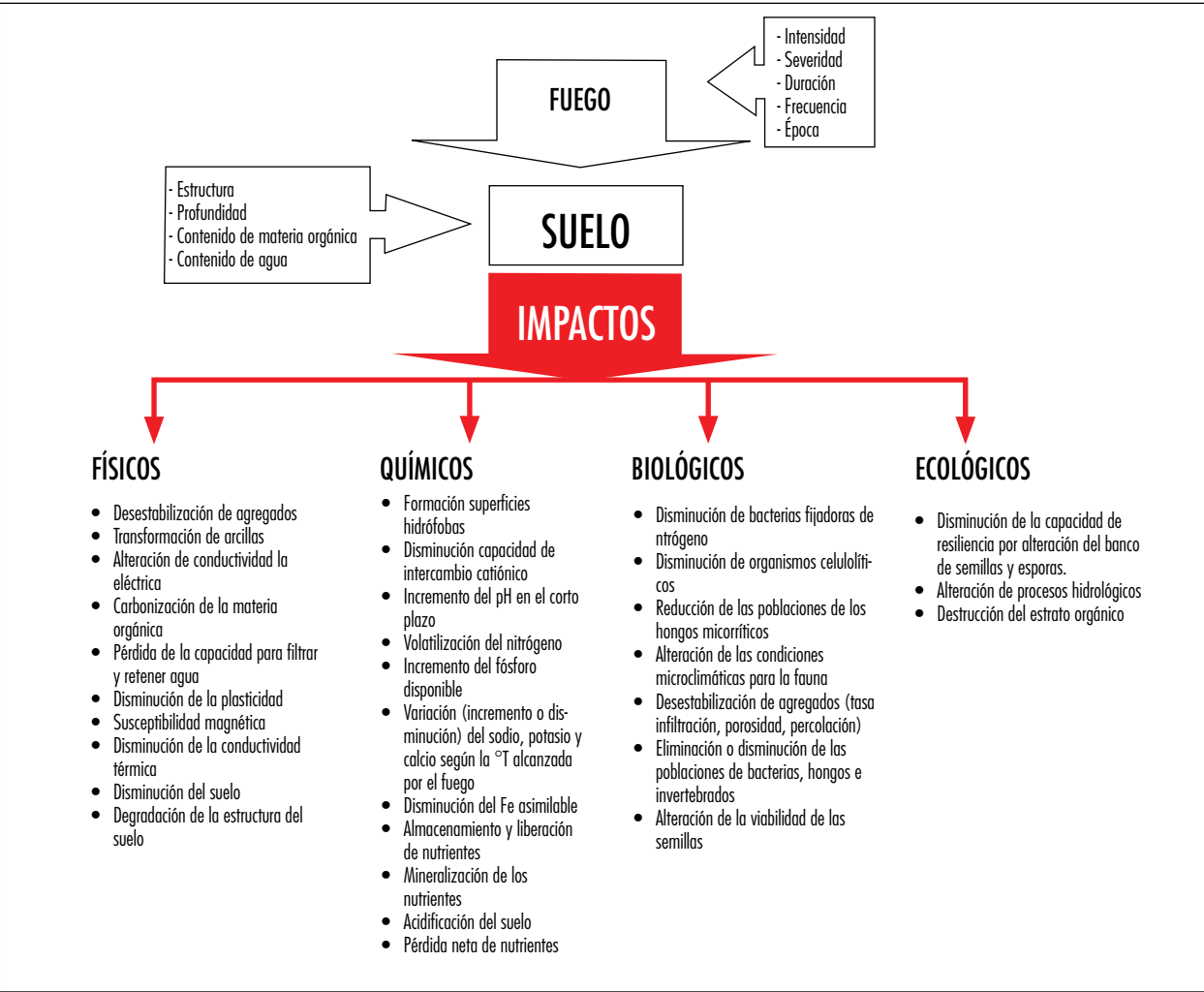
* Los incendios forestales ocurridos en 1992 en los bosques de la región de Gomel (Bielorrusia), aledaños a la zona de desastre de la antigua planta núcleo-eléctrica de Chernobyl, elevaron de manera significativa la concentración atmosférica ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr y ²³⁹Pu, provenientes de la vegetación y de la capa superficial del suelo contaminada radiactivamente (Dusha-Gudym, 1996).

** La cantidad de material particulado producido durante un ICV es función tanto de la intensidad del fuego como del tipo de combustible quemado. En términos generales las partículas finas (con menos de 2,5 micrómetros de diámetro aerodinámico) representan más del 90% del material particulado emitido por los incendios forestales (Schwela *et al.*, 1999).

⁷ En general, los suelos más afectados son los orgánicos o los que están sobre zonas kársticas (Casillas, P. s. f.).

⁸ En términos generales, los primeros 50 cm de profundidad tienen aproximadamente la misma temperatura del aire, pero los suelos arenosos pueden retener grandes cantidades de calor, especialmente cuando están secos (Sánchez, 1981). Algunos valores de temperaturas reseñados para diferentes profundidades del suelo durante incendios en proceso para sabanas sudamericanas varían en un rango de 74°C a 100°C (Vareschi, 1962; Coutinho, 1982; Silva *et al.*, 1990, citados por García-Núñez y Azócar, 2004), aunque es común que alcancen temperaturas superiores.

Figura 1. Impactos del fuego en el sistema suelo



Fuente: elaboración propia.

liberar nutrientes, y para generar y mantener condiciones microclimáticas favorables para la microbiota). En este contexto, se pueden mencionar los siguientes impactos físicos, químicos, biológicos y ecológicos específicos (Andreu *et al.*, 1996; Beschta, 1990; Boerner, 1982; Castillo *et al.*, 2003; Certini, 2005; Ferreira *et al.*, 2005; García-Corona *et al.*, 2004; González-Pérez *et al.*, 2004; Mataix, 1999; Mataix *et al.*, 2002; Pacheco, 2009; SCBD, 2001; Shakesby *et al.*, 1996; Cairney *et al.*, 2007):

a) Desestabilización de agregados por alteración de las formas, tamaños, arreglos y

cementación de las partículas compuestas a las que ha evolucionado el suelo local en función de su composición química y del clima y la consecuente alteración de su estructura y propiedades (porosidad, tasa de infiltración y percolación, entre otras).

b) Incremento de susceptibilidad magnética como resultado de fuegos recurrentes por migración del hierro.

c) Descenso de la conductividad térmica del suelo como consecuencia de la alteración del contenido de humedad.

d) Descenso de la conductividad eléctrica del suelo derivada de la pérdida de humedad, fenómeno que repercute en su capacidad de intercambio catiónico.

e) Incremento del rango de variación térmica del suelo (mínima-máxima) debido al oscurecimiento de su superficie por carbonización de material orgánico e inorgánico y la exposición a la radiación solar directa cuando desaparece la cobertura vegetal.

f) Mineralización de los tejidos vegetales⁹ por la acción del calor, que al exponerlos a la acción del viento, la lluvia o la severidad eleva su probabilidad de pérdida.

g) Incremento del pH^{*} debido al aporte de cationes (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^{+} , Si^{+3} , especialmente),¹⁰ la formación de óxidos básicos, la agregación de carbonatos y la eliminación de ácidos húmicos. Sin embargo, la recurrencia del fuego en un mismo sitio tiende a acidificar el suelo en el corto plazo debido a la mineralización de la materia orgánica.

h) Pérdida neta de nutrientes por la alteración en la capacidad de intercambio catiónico del suelo por volatilización¹¹ o transformación a formas más complejas no asimilables por las plantas o por exportación de ellos, aunque de manera inmediata se presenta un aumento de la disponibilidad de formas aprovechables

de nitrógeno, fósforo inorgánico, manganeso en forma reducible, potasio y calcio, los cuales generalmente provienen de la materia orgánica quemada.

i) Eliminación o alteración, en el corto plazo, de las poblaciones de bacterias, hongos e invertebrados, los cuales intervienen en procesos ecológicos de competición, parasitismo, mutualismo, etc., asociados a las plantas y al suelo, aunque se ha observado que las bacterias son mucho más tolerantes al calor que los hongos, razón por la cual pueden resultar beneficiadas en el corto tiempo por cambios en el pH o por la disponibilidad de algunos nutrientes como el nitrógeno.

j) Interrupción o alteración de los ciclos de nutrientes y de los procesos de descomposición de la materia orgánica.

Mención aparte merecen las consecuencias de la desaparición de la materia orgánica del suelo por acción del fuego (Castillo *et al.*, 2003; Beshta, 1990; Buschbacher, 1986; Soto *et al.*, 1990; Nordoto y Bustamante, 2003; Boerner, 1982; Kauffman *et al.*, 1993). Entre estas se pueden citar:

a) Reducción de la capacidad del suelo de almacenar agua y nutrientes por efecto de la disminución del potencial de intercambio catiónico.

⁹ Es el proceso mediante el cual el material vegetal se descompone, por la acción del fuego, en sus componentes minerales básicos (óxidos de carbono, agua, compuestos nitrogenados, etc.) (Greenland, 1995).

^{*} Este incremento guarda una correlación directa con la gravedad del incendio.

¹⁰ Estos elementos al oxidarse se vuelven más solubles y propensos a ser exportados por percolación o escorrentía (Ice *et al.*, 2004).

¹¹ La volatilización generalmente se alcanza a temperaturas inferiores a 450°C–500°C (Soto y Díaz-Fierros, 1990; Chandler *et al.*, 1983), y es mayor este proceso en la capa superficial del suelo (Pérez *et al.*, 2009). El nitrógeno y el fósforo se volatilizan a temperaturas cercanas a 200°C y el potasio y el calcio se vaporizan a 500°C (Boerner, 1982).

- b) Incremento de la erosión potencial del suelo debido a la pérdida de su estructura por la incineración de la materia orgánica que funge como aglomerante de las partículas y agregados.^{12*}
- c) Destrucción del estrato orgánico no incorporado al suelo mineral, aunque en incendios de baja o mediana intensidad se incrementa la tasa de descomposición de la materia orgánica por efecto del calor residual y de la predescomposición ocurrida durante incendio.
- d) Alteración de las condiciones para mantener la viabilidad de las semillas, esporas y demás formas reproductivas existentes en el suelo.

En general, una de las consecuencias más relevantes del cambio de algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo por la acción directa o indirecta del fuego es el establecimiento de las condiciones propicias para la erosión (Giovannini y Luchéis, 1988; Soto, 1993),¹³ pues al desaparecer la capa orgánica y disminuir la capacidad de infiltra-

ción del suelo por acción de estructuras o de sustancias hidrófobas producidas¹⁴ y por la obstrucción de los poros por el material microparticulado disminuye su capacidad para retener agua, lo que aumenta la escorrentía superficial,¹⁵ el arrastre de materiales y la exposición a la acción mecánica de la lluvia. Éstos, además de alterar algunos procesos hidrológicos básicos de las cuencas (infiltración, flujos subsuperficiales, percolación, evaporación, condensación, intercepción horizontal y vertical, almacenamiento y regulación, recarga de acuíferos), también tienen impactos sobre los cuerpos de agua (ríos, humedales, represas, lagunas costeras, etc.) ya que los sedimentos arrastrados y la carga química incorporada afectan sus procesos biológicos y ecológicos (White *et al.*, 2000; Neary *et al.*, 2004).

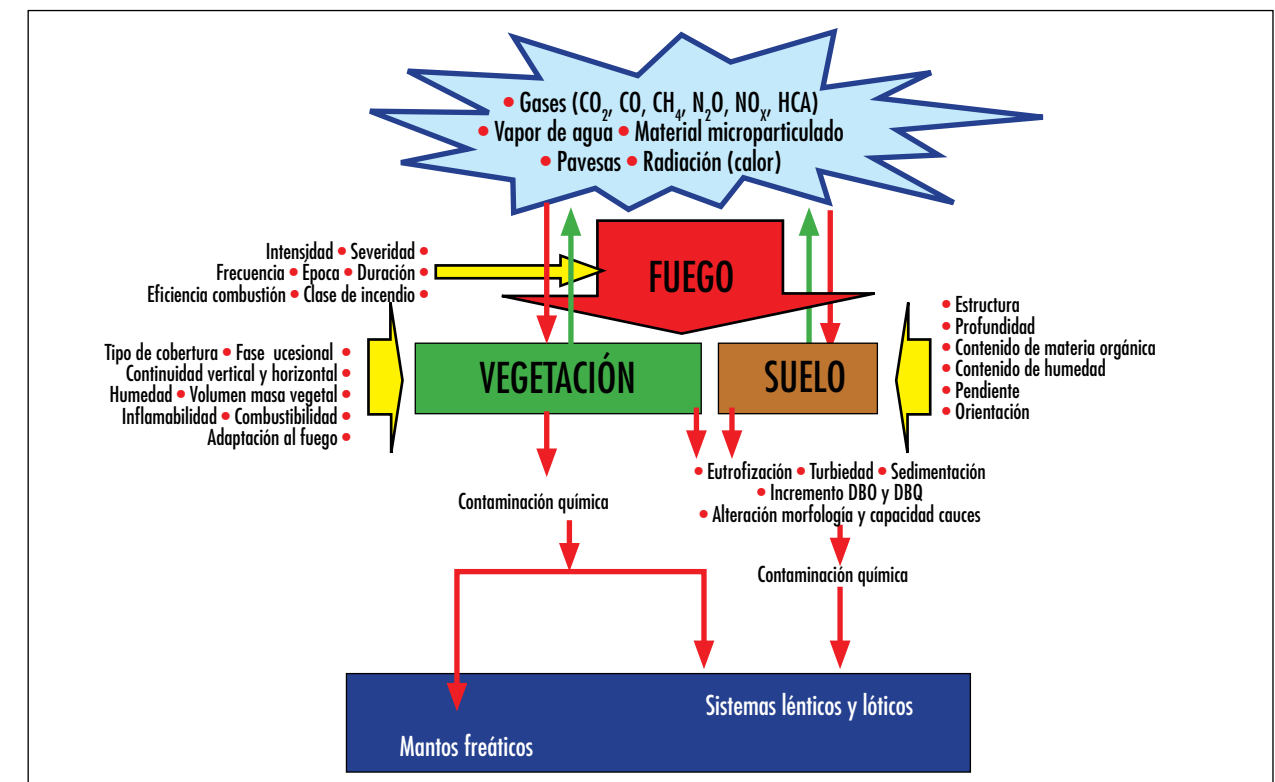
Impactos sobre la química, la física y la ecología del agua

Los Incendios de la Cobertura Vegetal (ICV) pueden afectar de forma específica los ecosistemas acuáticos de muchas maneras, (Ver Figura 2) aunque generalmente esto se

deriva de los impactos en el suelo y la vegetación. De manera particular se generan los siguientes impactos indirectos (Brown y Krygier, 1970; Raison, 1979; Tiedemann *et al.*, 1979; Richter *et al.*, 1982; Hudson *et al.*, 1983; Minshall *et al.*, 1989; Spencer y Hauer, 1991; Lavabre *et al.*, 1993; Scott, 1993; Rieman y Clayton, 1997a, 1997b; Gresswell, 1999; Pierson *et al.*, 2002; Battle y Golladay, 2003; Castillo *et al.*, 2003; Dunham *et al.*, 2003, 2007; López *et al.*, 2004; Certini, 2005; Ferreira *et al.*, 2005; Shakesby *et al.*, 2006; Temporetti, 2006; Morales *et al.*, 2007; Rinne, 1996):

- a) Contaminación química del agua debido a la descarga de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio, y en algunos casos, según el tipo de suelo y la vegetación afectada, otros elementos metálicos como aluminio, hierro, zinc y plomo.¹⁶ Los dos primeros elementos citados son los de mayor potencial tóxico de acuerdo con su concentración debido a su transformación en otros compuestos, aunque también en menores cantidades enriquecen el agua y favorecen inicialmente el incremento del fitoplancton y de la vegetación acuática.

Figura 2. Impactos en los ecosistemas acuáticos por acción del fuego



Fuente: elaboración propia.

12 En general, los suelos con menor contenido de limo y mayor contenido de arcilla son menos susceptibles a erosionarse (Agee, 1993).

* Un fenómeno postincendio común, aun en ecosistemas adaptados al fuego, es el movimiento por gravedad de material inorgánico y orgánico en el sentido de la pendiente. Este fenómeno, conocido como *dry revel*, puede llegar a concentrar cantidades importantes de sedimentos en los cauces de los drenajes principales de los sistemas hidrológicos.

13 Los incendios forestales recurrentes pueden llegar a explicar hasta el 80% de los niveles de erosión en ecosistemas forestales (Swanson, 1981, citado por Casillas, s.f). En Colombia, por ejemplo, algunos estudios (Cavelier *et al.*, 1998) han mostrado la pérdida de hasta 50 cm de suelo en áreas cuyas coberturas vegetales desaparecieron por acción del fuego.

14 Los elementos químicos volatilizados por la acción del calor en los microhorizontes más profundos del suelo, se condensan alrededor de las partículas del suelo que se enfrían debajo de las cenizas, formando una lámina o capa de aniones que por su polaridad repelen a las moléculas de agua y que, de acuerdo con su severidad y variabilidad espacial, pueden ser un condicionante de importancia para procesos erosivos (DeBano, 2000; Giovannini y Lucchesi, 1983; Savage, 1974). Este fenómeno es muy marcado a temperaturas del suelo entre 175 °C y 200 °C (DeBano y Krammes, 1966), aunque desaparece a temperaturas cercanas a los 300 °C debido probablemente a la volatilización y combustión de los compuestos orgánicos (DeBano *et al.*, 1976; Chandler *et al.*, 1983, citado por Doerr *et al.*, 2006). Es un fenómeno típico de suelos que han sufrido incendios de gran intensidad, aunque también ha sido reportado en condiciones naturales (Huffman *et al.*, 2001, citado por Tessler *et al.*, 2008).

15 Según Sempere *et al.* (1994), el volumen total de agua escurrida en un sitio aumenta entre un 25% y un 30% el año posterior a un incendio respecto al que se hubiere producido sin incendio. Por una parte, Scott y Van Wyk (1990), citados por López Alonso *et al.*, (2004), reportan un aumento del 290% en la escorrentía anual durante el año siguiente al incendio en una cuenca en Sudáfrica.

16 Las rutas de descarga de elementos o compuestos químicos en el agua son el *dry revel*, la solución formada por ellos y el agua de escorrentía que drena hacia los cauces, la deposición del material superficial del suelo desnudo arrastrado por procesos de erosión eólica y la condensación de los compuestos volatilizados por acción del fuego (De Bayley *et al.*, 1992). Shvidennko y Goldammer (2001), citados por Nasi *et al.*, (2002), señalan el efecto negativo que tuvo el incremento del dióxido de carbono en lagos y corrientes superficiales de agua sobre el desove del salmón en la federación rusa como consecuencia de los incendios ocurridos en dicha región durante 1998.

- b) Incremento de la turbiedad por sólidos disueltos debido a la descarga de material orgánico e inorgánico particulado y materia orgánica sin descomponer, especialmente durante las primeras lluvias posteriores al incendio. Este material, al colmatarse en el lecho de los cuerpos de agua, puede alterar condiciones del hábitat para procesos de ovoposición, reproducción, refugio y forrajeo de algunas especies acuáticas (moluscos, peces, anfibios, etc.), al igual que modificar gradualmente la morfología y la capacidad de los cauces y cuerpos de agua.
- c) Aumento de la temperatura del agua en cuerpos lénticos o cerrados (lagunas, charcas), especialmente cuando se quema la vegetación de sus bordes, lo cual afecta fundamentalmente a peces pequeños e invertebrados séciles.
- d) Degradación del hábitat acuático debido a la fertilización del agua con nutrientes provenientes de áreas conexas afectadas por Incendios de la Cobertura Vegetal (ICV). Este fenómeno puede propiciar el crecimiento explosivo de bacterias y organismos mixótrofos y generar un aumento de la demanda bioquímica de oxígeno.
- e) Alteración del régimen de caudales debido a la modificación de las condiciones de las cuencas para regular el ciclo local del agua.

- f) Disminución del potencial de pesca como consecuencia de los impactos ecológicos sobre el hábitat de las especies de interés o sobre los hospedantes.¹⁷
- g) Impacto por combinación de causas, sobre las cadenas alimenticias y ciclos de vida de especies que desarrollan una fase de su ciclo en el agua.

Impactos y efectos del fuego en la vegetación

Si bien existe abundante evidencia documentada sobre el papel desempeñado por el fuego sobre especies y ecosistemas templados,¹⁸ son todavía escasos los estudios sobre sus consecuencias biológicas y ecológicas en ambientes neotropicales (Barlow y Pérez, 2004; TNC / WWF / UICN, 2004; Whelan, 1995; Sanford *et al.*, 1985). En este contexto se intentará describir los impactos más significativos del fuego sobre la flora en ambientes del neotrópico, más en la perspectiva de señalar de manera rápida aquellos que tienen una mayor probabilidad de ocurrencia por causas humanas y como consecuencia del cambio climático global.

En principio podría decirse que los ICV afectan la vegetación por una combinación de procesos físicos de radiación, convección y conducción y establecen distintos escenarios de perturbación para las especies vegetales, cuyos efectos pueden ser catastróficos o tole-

rables según los grados de adaptación¹⁹ que ellas tengan al fuego, lo mismo que a la severidad, intensidad, velocidad y frecuencia con que éste se presente, aunque en condiciones extremas todos los individuos son totalmente vulnerables (Cochrane y Schulze, 1999). De manera general, los incendios pueden impactar de distintas maneras y en diferentes horizontes de tiempo las especies vegetales presentes en una localidad o región, y son sus efectos más importantes: la alteración de las condiciones microclimáticas necesarias para su reproducción y desarrollo, la reducción del tamaño de las poblaciones locales por muerte directa o diferida de sus individuos, la modificación de sus estructuras poblacionales, la disminución de su diversidad genética, la generación de condiciones para el ingreso de nuevas especies competidoras y la alteración de las interacciones biológicas y ecológicas con otras especies (Zedler *et al.*, 1983; Cochrane, 2003; Tabarelli *et al.*, 2004; Hoffmann, 1999; Uhl y Kauffman, 1990).

Mortalidad de árboles

- a) La escala de mortalidad de árboles está directamente relacionada con la severidad del incendio, aun en especies adaptadas (Uhl y Kaufman, 1990; Pinard y Huffman, 1997). El rango de mortalidad, según diversos autores referenciados por Cochrane *et al.* (1999), puede estar entre el 33% y el 66%, aunque otros estudios citados por Barlow y Pérez (2004) señalan

rangos mucho menores para incendios de superficie (8%-16%).

- b) Existe una marcada dependencia de la mortalidad de los árboles en función del Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) de sus troncos, de modo que árboles con DAP < 30 cm tienen mortandades mucho más altas que los de diámetro mayor (Woods 1989; Cochrane y Schulze, 1999; Pérez, 1999). Esta situación entraña un alto riesgo para la diversidad de especies arbóreas en bosques húmedos tropicales, si consideramos los patrones más comunes de su distribución diamétrica (errática, clases con pocos individuos, pocos ejemplares gruesos pero numerosos o con vacíos en clases diamétricas intermedias (UNESCO/PNUMA/FAO, 1980).
- c) Los árboles que no mueren de manera inmediata durante el incendio lo hacen por lo general entre el primer y segundo año posterior a él (Holdsworth y Uhl, 1997; Kinnaired y O'Brien, 1998; Haugaasen *et al.*, 2003), debido especialmente a daños anatómicos con repercusiones fisiológicas o a su estabilidad física (Gutsell y Johnson, 1996; Pinard *et al.*, 1999).

Interrupción de los procesos reproductivos

- a) Desaparición local o ahuyentamiento temporal de las especies que intervienen como polinizadores o dispersores de semillas, rol que cumple una gran diversidad de insectos, aves, murciélagos y otros animales a través de complejas y especia-

¹⁷ Un ejemplo de ello es el declive significativo de las poblaciones del molusco Náyade (*Margaritifera margaritifera* L.), en el río Negro (España), como consecuencia, entre otros factores, de la disminución de los alevines del salmón del Atlántico (*Salmo trutta* var *fario*), que sirven de hospederos para sus larvas y cuyo decrecimiento está asociado a la acción de sedimentos y cenizas provenientes de áreas afectadas por ICV (Morales *et al.*, 2007).

¹⁸ Una excelente recopilación al respecto se encuentra en DeBano *et al.*, (1998).

¹⁹ Con frecuencia se señalan como adaptaciones de las especies al fuego estrategias que en realidad pueden tener bases filogenéticas. Por ejemplo, las sequías extremas recurrentes en sabanas tropicales seguramente han ayudado a seleccionar caracteres útiles para tolerar los incendios sin que ellas sean verdaderas estrategias adaptativas al fenómeno aludido (Terradas, 2001).

lizadas relaciones de interdependencia²⁰ o de mutualismo obligado (Bawa, 1990; Janzen, 1971; Quezada *et al.*, 2004; Del Claro y Torezan-Silingardi, 2009). El problema se presenta fundamentalmente porque al no estar presentes estas especies de animales debido a la modificación de la estructura y composición del bosque y a la disminución de la oferta alimenticia los procesos de transporte de polen y dispersión de semillas no se presentan, disminuyéndose así la probabilidad de éxito reproductivo de las especies vegetales involucradas.

b) Sobrevivencia de semillas y plántulas existentes en el suelo. El grado de impacto está relacionado con el régimen de perturbaciones a las que ha estado sometido el bosque, a las características del incendio, del banco de semillas y de ellas mismas (profundidades de enterramiento, antigüedad, densidad y diversidad, capacidad para sobrevivir durante el episodio, requerimiento de fuego para la germinación); al tiempo de exposición al calor y a las condiciones ambientales posteriores al incendio (Kennard *et al.*, 2002). Algunos de los impactos y efectos ocasionados son, según diferentes estudios (Uhl *et al.*, 1981; Marod *et al.*, 2002; Dalling *et al.*, 1997; Hoffman, 1996; Pérez y Santiago, 2001; Auld y Denham 2001; Takahashi y Kikuchi, 1986), los siguientes*:

- Exposición de las semillas a la depredación principalmente por artrópo-

dos, aves y mamíferos pequeños que colonizan el área después del fuego. Este impacto es muy notable cuando se intensifica la periodicidad de incendios superficiales y poco severos.

- Daño fisiológico o muerte del embrión cuando la semilla, descarificada por acción del fuego, es expuesta a umbrales ambientales (luz, temperatura, humedad) muy superiores a los requeridos para mantener su viabilidad.
- El bloqueo o activación del proceso fisiológico de germinación debido a algunas sustancias químicas generadas por la combustión de cantidades importantes de biomasa del suelo.
- Aborto de flores y frutos. El fuego puede afectar el proceso de floración y de producción y maduración de los frutos, así como el potencial reproductivo de los individuos. Este fenómeno es altamente probable por la coincidencia entre los períodos de floración y fructificación de las especies y la época de mayores incendios.
- Mortalidad de plántulas. Ocurre por eliminación directa durante el incendio o por los daños anatómicos y fisiológicos de consecuencias letales posteriores, a una mayor exposición a la herbivoría intensiva, por la acción de patógenos y en ocasiones por

provenir de semillas que germinan y rompen así su latencia en condiciones ambientales desfavorables para el establecimiento de la plántula.²¹ Con frecuencia también la erosión y pérdida de la calidad nutricional del suelo compromete la sobrevivencia de las plántulas. Contrario a ello es el éxito mostrado por las plántulas de un número importante de especies de leñosas de sabanas sudamericanas –ecosistemas con un régimen frecuente de fuego– que son capaces de rebrotar después de un episodio de fuego gracias a la biomasa acumulada durante su primera fase de crecimiento.

- Erosión o lavado del banco de semillas. La escorrentía superficial ocurrida durante lluvias muy fuertes posteriores a los incendios puede erosionar –especialmente en áreas de ladera– el sustrato (suelo, hojarasca) y exponer las semillas al arrastre del agua y a su deposición en sitios lejanos. Un fenómeno con efectos distintos es que –en incendios de baja severidad– el fuego, al eliminar la capa superior de hojarasca o materia orgánica del suelo, facilita la germinación de las semillas “persistentes” de especies arbóreas que se encuentran en horizontes menos superficiales.

A pesar del efecto nocivo de los incendios de la cobertura vegetal en la sobrevivencia de semillas y plántulas, no se puede desconocer su importancia ecológica y biológica para las especies con algún grado de adaptación al fuego, fenómeno ampliamente documentado para zonas templadas. Gran parte de los trabajos realizados sobre este tema en el neotrópico se han concentrado en el análisis de la viabilidad, la latencia, las tasas diferenciales de germinación y las respuestas ecofisiológicas de las *spermatophytas* a las nuevas condiciones abióticas y bióticas que les imponen los incendios (Rodrigues *et al.*, 2005; Dalling *et al.*, 1997; Galvao *et al.*, 2007).

c) Interrupción temporal de la capacidad de reproducción sexual de árboles afectados por el fuego. Debido especialmente al estrés fisiológico producido por el incendio, los árboles de algunas especies estudiadas por Hoffmann (1998) interrumpen hasta por tres años la producción de semillas.

Disminución de la capacidad de regeneración vegetativa

El fuego puede afectar los tejidos meristemáticos –con capacidad regenerativa– que tienen algunas especies de plantas, localizados en ramas, troncos, cuello de la raíz y en el sistema radicular e impedir o dificultar su regeneración (Terradas, 2001; Rodrigues *et al.*, 2004; Kauffman, 1991). El grado de impacto

²⁰ Al respecto se recomienda revisar el clásico *Principles of dispersal in higher plants* (Van der Pijl, 1972).

* Estas notas están más referidas al bosque tropical húmedo por ser el ecosistema más estudiado en el tema, frente a otros como los estacionalmente húmedos y los bosques secos.

²¹ Existe una sincronización del periodo de fructificación de muchas especies de árboles tropicales con la época seca del bosque, con el fin de que maduren y sus semillas se encuentren disponibles en el suelo para germinar cuando se inicie el periodo de lluvia, lo cual además de garantizar humedad, también facilita la disponibilidad de nutrientes liberados mediante procesos de degradación física y microbiológica (Janzen, 1967; Smythe, 1970; Labouriau *et al.*, 1964; Oliveira y Silva, 1993).

o efecto depende de la clase de incendio, de su intensidad, su severidad y del tipo de ecosistema, y es mayor en aquellos ecosistemas más secos.

El tipo de regeneración vegetativa más común se da a partir de raíces en especies leñosas, fenómeno usual en las sabanas tropicales inundables. El alto contenido de humedad existente durante todo el año en el suelo del ecosistema les otorga a las plantas una ventaja competitiva para enfrentar –con un bajo costo energético– los efectos nocivos de los incendios, por el aislamiento de su sistema radicular; sin embargo, esta capacidad adaptativa solo la puede alcanzar la planta a lo largo de varios años, cuando logra desarrollar un sistema radicular robusto (García-Núñez Azócar, 2004; Hoffmann, 1998).

Desplazamiento de especies locales

Las especies invasoras son uno de los mayores problemas para la conservación de la biodiversidad, tanto por la incidencia de los procesos y ciclos ecosistémicos en la dinámica del paisaje como por las retroalimentaciones positivas que generan –en cortos periodos de tiempo– con el incremento de la susceptibilidad del ecosistema al fuego y con el ingreso de nuevas especies de plantas pirófilas (Stohlgren *et al.*, 2001). La sustitución de extensas zonas de bosque tropical por una vegetación con un bajo número de especies arbóreas resistentes al fuego y una cubierta de herbáceas inflamables es un fenómeno

observado en muchas zonas de Asia, África y América tropical (Cochrane *et al.*, 1999; Nepstad *et al.*, 1999).

Incremento de la susceptibilidad a plagas y enfermedades

Los incendios de áreas boscosas, especialmente las templadas o las de plantación en los trópicos, pueden propiciar la invasión de plagas y enfermedades, y predisponer a los árboles a una especie de *mortalidad diferida*, la cual depende aparentemente del grado de resistencia o susceptibilidad del árbol, de la visibilidad de los árboles dañados por el fuego, de las necesidades de nidificación de los insectos y de la densidad de ellos y de la dotación de sistemas de detección de calor o humo por algunas especies de insectos (Hart, 1998; Schwilk, 2006; Engstrom, 2010). Las plagas más comunes son las de insectos descortezadores, defoliadores y barrenadores (Billings y Espino, 2005).

Efectos sobre algunos taxones y grupos sensibles

a) Las epífitas (orquídeas, aráceas, bromeliáceas, helechos, musgos)²² son un grupo altamente vulnerable a la transformación de los bosques por la acción de perturbaciones como el fuego. La eliminación de árboles hospederos, especialmente los longevos, elimina los sitios de colonización e impide el proceso de sucesión y diversificación de las epífitas en los bosques. Estos efectos son mayores cuando los incendios de la cobertura vegetal generan claros en el bosque o lo fragmentan

(Kromer *et al.*, 2007; Avendaño-Torres y Aguirre, 2007).

b) Los helechos terrestres con requerimientos especializados de hábitat tienden a disminuir su diversidad por acción de ICV de baja intensidad y severidad, pero las especies generalistas resultan favorecidas por eventos de mayor intensidad y gravedad (Beukema y van Noordwijk, 2004; Ramírez *et al.*, 2007).

c) Las lianas o bejucos, aunque inicialmente pueden ser afectados por el fuego, en el corto plazo resultan favorecidos gracias a su habilidad para sobrevivir a grandes disturbios (Nabe-Nielsen y Hall, 2002). Su crecimiento poblacional casi explosivo y gran capacidad para colonizar cualquier estructura que les sirva de soporte físico en la búsqueda de luz –ramas, troncos e incluso otros bejucos– genera daño mecánico en árboles y arbustos adyacentes y dificulta la sucesión vegetal cuando el fuego ha removido el dosel o buena parte de él. Parece que esta capacidad competitiva radica en las siguientes estrategias (DeWalt *et al.*, 2000; Laurance *et al.*, 2001; Revilla y Calderón, 2006; Putz, 1984a, 1984b; Schnitzer y Bongers, 2002):

- El desarrollo de sistemas radiculares más profundos, lo cual permite un mayor acceso a reservas de agua del suelo, aun en épocas de sequía.
- Colonizar más rápidamente y con menor inversión en biomasa de raíces, a bancos de suelos ricos en nutrientes.

- Menor inversión energética en el desarrollo de estructuras de soporte físico para acceder a los mayores niveles de luminosidad existentes en el dosel superior de la vegetación o a los claros de luz.
- Estrategias reproductivas muy exitosas: polinización por insectos voladores, dispersión de semillas por el viento en muchas especies, germinación de semillas latentes y previamente dispersadas, activación del crecimiento de plántulas anteriormente suprimidas y crecimiento vegetativo profuso.
- Mayor tolerancia a incrementos de temperatura, característica que las convierte en una amenaza para la sucesión vegetal en contextos de cambio climático.

d) Los líquenes, al requerir condiciones de hábitat muy específicas (luz, humedad, composición del aire, dinámicas del viento en el bosque, sustrato), tienen una alta sensibilidad a las perturbaciones del bosque originadas por el fuego, razón por la cual su grado de respuesta depende del tipo de incendio en cuanto a intensidad, severidad y frecuencia. Los eventos poco frecuentes y de baja intensidad favorecen la presencia de pocas especies con coberturas importantes, y los más periódicos y severos disminuyen dramáticamente el número de especies y sus poblaciones; sin embargo, los incendios de intensidad heterogénea pueden incrementar la diversidad de especies al favorecer la

²² Grupo de especies de una gran importancia tanto por su alta diversidad como por el papel ecológico que cumplen respecto a los ciclos de nutrientes y del agua, a la generación de microhábitas para la fauna (artrópodos, anfibios, saurios pequeños) y en el filtraje de la radiación que penetra el dosel del bosque (García-Franco y Toledo, 2008).

apertura de un mayor y diverso número de hábitats colonizables. Para ambientes sometidos a frecuentes perturbaciones de fuego las especies de líquenes dominantes son las heliófilas (Rodrigues *et al.*, 2009).

- e) La alta probabilidad de desaparición de las plantas C_4 ante el incremento de los niveles de CO_2 atmosférico (Van der Hammen *et al.*, 2002).

Impactos y efectos del fuego en la fauna

Las especies animales responden de manera distinta y compleja a los impactos y efectos de los incendios. En general los anfibios, reptiles y pequeños mamíferos pueden resultar beneficiados por los efectos del fuego e incrementar su abundancia y su diversidad, mientras que en buena parte de las especies de artrópodos puede suceder lo contrario (Cochrane, 2003). Los impactos y efectos de los incendios sobre la fauna dependen de varios factores relacionados con este tipo de fenómenos (tipo, frecuencia, intensidad, severidad, tamaño o escala espacial y uniformidad), las características biológicas de los animales (tamaño corporal, ciclo y estacionalidad reproductiva, alimentación, locomoción), sus requerimientos ecológicos (hábitat, territorio, condiciones climáticas) y su respuesta ante el fuego (habilidad para detectar y evadir el fuego). Posiblemente debido a esto su estudio es una tarea compleja, que arroja resultados disímiles según las particularidades del sitio y de las poblaciones estudiadas.

La exposición directa del animal al fuego produce generalmente su muerte durante el evento (*mortalidad directa*) o en fases posteriores (*mortalidad diferida*). La primera es conse-

cuencia de la incineración o de la alteración fisiológica del organismo (deshidratación, intoxicación por inhalación de gases y humos, asfixia por agotamiento del oxígeno en el aire, desnaturalización de proteínas, rompimiento de membranas celulares, etc.), y es un fenómeno diferencial por edades e incluso en algunas especies por género.

La *mortalidad diferida* puede presentarse como consecuencia de tres situaciones: la primera debido a la acción del fuego sobre los diferentes componentes y procesos del ecosistema que sirven de soporte a los animales en sus procesos vitales. La fragmentación y modificación de la estructura del hábitat, el cambio en el número y abundancia de las especies de plantas o animales que proveen alimento, la eliminación de micrositios de refugio o reproducción y la modificación de las condiciones microclimáticas requeridas son algunos de los efectos más comunes por esta causa y alteran de manera determinante los patrones de movimiento de los individuos y el tamaño del territorio que requieren para desarrollar sus actividades vitales (Monroe y Converse, 2006; Green y Sanecki, 2006; Irvin *et al.*, 2003, citados por Stevens, 2008). Estos nuevos rasgos del hábitat afectado pueden ser exacerbados por condiciones climáticas locales atípicas, lo que incrementa sus efectos sobre la fauna del lugar. Como consecuencia, es posible el aislamiento de individuos o poblaciones de animales, la alteración de las relaciones interespecíficas animal-planta y animal-animal, la invasión de patógenos o especies exóticas, la emigración e inmigración de individuos y subpoblaciones.

Una segunda causa de *mortalidad diferida* son las lesiones ocasionadas por el fuego en la anatomía o fisiología de los individuos, que dificultan su movilidad, defensa o alimentación lo que, sumado a la eliminación de la vegetación, incrementa su exposición visual a los depredadores.

La tercera causa es la *muerte ex situ*, como consecuencia de la emigración no exitosa a sitios aledaños que pueden hacer algunos individuos para eludir los impactos directos del fuego, donde deben enfrentarse en situación de desventaja a los residentes por el alimento y el refugio y evadir los depredadores.

Los estudios sobre el tema han estado concentrados sobre especies de ecosistemas templados, especialmente artrópodos (Andersen y Muller, 2002; Reed, 1997; Holliday, 1992; Niwa y Peck, 2002), aves (Kolbin, 2008; Prodon, 1987; Bock y Bock, 1983; Kotliar *et al.*, 2002; Raphael *et al.*, 1987; Schulte y Niemi, 1998; Breininger y Smith, 1992) y pequeños mamíferos (Manning y Edge, 2004; Martell, 1984; Quinn, 1979; Larsen *et al.*, 2007). Para las regiones tropicales y subtropicales de América el conocimiento es menor,²³ aunque para otras regiones tropicales del mundo existe una importante documentación sobre especies de las sabanas y matorrales (Friend, 1993, 2004; Green y Sanecki, 2006; Russell *et al.*, 1999).

Tendencias en los impactos y efectos ocasionados

El estudio de los impactos y de los efectos de los incendios sobre las poblaciones de los distintos taxones de invertebrados y

vertebrados es una labor difícil debido al comportamiento complejo del fuego a pequeña escala, a las particularidades del terreno en donde se desarrolla, a las singularidades de las especies o comunidades estudiadas (tamaño corporal, hábitat, territorio, comportamiento diario, hábitos alimenticios, ciclo reproductivo, etc.), y a las características mismas del estudio realizado (tiempo transcurrido desde el evento, metodología de trabajo utilizada, línea base de referencia, época del año, escala espacial del estudio, alcance concreto o multitemporal, entre otras.).

A pesar de la limitada información disponible al respecto, se presentan a continuación algunas conclusiones preliminares sobre la relación entre el fuego y la fauna en el contexto del neotrópico. Se aclara que varias de ellas no tienen el alcance de generalizaciones debido tanto a su limitado respaldo documental como a las inconsistencias encontradas entre investigaciones similares. En este sentido, las ideas expuestas corresponden a tendencias halladas en estudios de taxa en diferentes regiones ecológicas, pero las que consideramos válidas para nuestro caso son:

- a) El fuego puede afectar a la fauna de manera directa e indirecta, con consecuencias distintas y en diferentes horizontes de tiempo, relación supeditada a factores que incluyen el tipo, la intensidad, la severidad, la duración y la velocidad del fuego; la movilidad y las estrategias adaptativas de los animales; el tipo de ecosiste-

²³ Barlow y Silveira (2009) hace una excelente revisión sobre las consecuencias del fuego sobre la fauna del bosque tropical húmedo.

- ma –en particular de la vegetación– y las características físicas del sitio (Whelan *et al.*, 2002; Engstrom, 2010; Barlow y Pérez, 2004).
- b) La ocurrencia de incendios en el rango natural del régimen de fuego del ecosistema beneficia –en el término del correspondiente ciclo– a casi todos los taxones existentes como consecuencia de la diversificación y revigorización de microhábitats (Brawn *et al.*, 2001; Platt y Connell 2003; Turner *et al.*, 2003).
 - c) Los efectos del fuego son más significativos sobre las poblaciones que sobre los individuos, por las modificaciones que producen sobre el hábitat y en las estructuras de edades y proporción de sexos de las poblaciones (Lyon *et al.*, 2000a, 2000b).
 - d) Los efectos de un incendio sobre una población de animales se pueden magnificar si, además de encontrarse disminuida, de ser pequeña o de hallarse en proceso de especiación, tiene un rango de distribución muy limitado (endémicas) o hábitos reproductivos especializados (Smith y Fischer, 1997, citado por Lyon *et al.*, 2000; Defler y Bueno, 2007).
 - e) Prácticamente en todos los taxones hay especies con capacidad para responder positivamente al fuego (Whelan, 1995; Smith, 2000 citado por Smucker, *et al.*, 2005), aunque unas tienen mayores probabilidades de éxito según sus necesidades territoriales, su especialización alimenticia o reproductiva y sus características morfológicas. Incluso en un mismo taxa los niveles de afectación y respuesta pueden ser diametralmente distintos como, por ejemplo, entre las especies de artrópodos que depositan sus huevos a varios centímetros de profundidad en el suelo y aquellas que lo hacen sobre la vegetación, principalmente sobre las hojas (Anderson *et al.*, 1989, citado por Barlow y Silveira, 2009). De igual manera, Strehlow (1993), citado por Friend (1999), menciona que la riqueza y abundancia de especies de algunas familias de arañas (Zodariidae, Salticidae y Gnaphosidae) son impactadas negativamente; otras sufren efectos limitados (Zoridae), o son beneficiadas, como en el caso de Lycosidae (Niwa y Peck, 2002).
 - f) El conocimiento de la historia natural de la especie existentes en un área determinada, sobre todo lo relacionado con la reproducción (ciclo, edad reproductiva, número de crías) y requerimientos de hábitat y relaciones ecológicas, es esencial para la comprensión de sus respuestas al fuego. Adicionalmente, se podría decir que dicho conocimiento permite pronosticar los patrones de biodiversidad más probables durante el proceso de recolonización del área afectada o el modelo esperable para una especie en particular (Friend 1993; Moir *et al.*, 2006).
 - g) No todos los individuos de una población local de la misma especie responden de igual manera ante el fuego y, por tanto, no son afectados de la misma manera. En ello pueden intervenir factores como la edad, el aprendizaje o la experiencia previa, el conocimiento sobre las oportunidades de refugio que puede ofrecer el sitio (cuevas, etc.), la ubicación del individuo con respecto al frente del fuego, entre otros. Por ejemplo, los individuos adultos tienen mayores probabilidades de escapar a los efectos directos del fuego que los más jóvenes e inexpertos (Main y Tanner, 2009).
 - h) La exposición de una población a un determinado régimen de fuego a lo largo del tiempo puede propiciar el desarrollo de habilidades para evadir este fenómeno y sus impactos. Por ejemplo, se ha observado que algunas especies de murciélagos, aves, ranas e insectos son capaces de percibir tempranamente el humo o el calor provocado por el fuego y pueden eludirlo; de igual manera, ciertas especies de lagartijas y serpientes acuden rápidamente a resguardarse en madrigueras de especies fosoriales como armadillos (*Dasypus* spp.), o en cavidades de árboles (Evans, 1966; Grafe *et al.*, 2002; Dickinson *et al.*, 2009; Bishop y Murrie, 2004; Geluso *et al.*, 1986; Smith *et al.*, 2001, citados por Engstrom, 2010; Scesny y Robbins, 2006).
 - i) La escala de paisaje afectada por el fuego es fundamental en las probabilidades de impacto sobre las diferentes especies faunísticas. El paisaje es un sistema “fractal”, es decir, un mosaico de pequeñas unidades con formas, tamaños, estructuras, condiciones microclimáticas, relaciones bióticas y abióticas internas y externas, particulares (Lyon *et al.*, 2000). Así estas diferencias sean sutiles pueden significar comportamientos diferenciados del fuego –especialmente en los de baja intensidad– y representar oportunidades para la sobrevivencia de los animales, en particular para los territoriales y los de baja movilidad (Buddle *et al.*, 2006).
 - j) La probabilidad de recuperación de una población local afectada por el fuego depende fundamentalmente de factores como las características poblacionales del grupo sobreviviente (número, proporción de géneros, estructura de edad), las presiones del entorno (déficit/oferta alimenticia) y las dinámicas poblacionales desde y hacia la matriz del área afectada y hacia ella (inmigración/emigración). Por ejemplo, con relación a la alimentación, las especies generalistas sufren menores restricciones que las de hábitos especializados, como algunas especies de aves del sotobosque (Barlow y Pérez 2004, Buddle *et al.*, 2006).
 - k) Las especies generalistas que toleran la transformación del hábitat o que hacen uso de diferentes remanentes de vegetación existentes en la matriz del área afectada por el disturbio (Galindo, 2004) tienden a ser menos vulnerables a los impactos de los incendios y poseen una mayor probabilidad de recolonizar el área.
 - l) Las áreas afectadas por el fuego son escenarios altamente explotados por especies oportunistas durante los incendios o después de ellos. Algunas especies –principalmente aves– captan a distancia las columnas de humo y realizan cacería de insectos o de pequeños mamíferos que huyen del fuego; por ejemplo, rapaces como *Buteo platypterus* y *Buteogallus meridionalis* son comunes en la periferia de los incendios (Long, 2006). Esta presión

depredativa llega a ser tan fuerte que en el caso de ecosistemas con alta dependencia al fuego como *El Cerrado Brasileño*, se ha insinuado el desarrollo de patrones de color en algunos mamíferos como estrategia para evadir a los carnívoros después de los incendios (Coutinho, 1990).

- m) La recurrencia de incendios de la cobertura vegetal por fuera de su rango natural puede alterar el complejo de relaciones interespecíficas y comprometer la existencia de otras especies del *pool* regional, así no hayan resultado afectadas de manera directa por el disturbio.

Efectos sobre especies y comunidades faunísticas particulares

Los principales efectos, positivos o negativos, sobre especies o comunidades particulares de fauna son producidos por los cambios en la estructura y complejidad del hábitat como consecuencia de la alteración del régimen de fuego de los ecosistemas. Algunos impactos y efectos en grupos de interés son:

Artrópodos

Estos organismos desempeñan un papel fundamental en los procesos ecológicos de todos los ecosistemas, especialmente en el reciclaje de nutrientes, en las dinámicas relacionadas con el desarrollo, la aireación y la estabilidad del suelo y en muchos casos en el balance entre hongos y bacterias al mantener controladas las poblaciones de los primeros mediante su forrajeo. Un número importante

de especies facilitan el trabajo de los descomponedores de la materia orgánica (hongos y bacterias, especialmente), ya que al fraccionar y reducir el tamaño del material vegetal incrementan las probabilidades y frentes de ataque sobre el material particulado. Por otra parte, juegan un rol determinante en las complejas cadenas alimenticias de los ecosistemas al servir como presas o actuar como depredadores activos (González y Seastedt, 2001; Lavelle, 1997).

Debido a la alta riqueza y abundancia de artrópodos en los bosques tropicales, tanto en el dosel (Basset *et al.*, 2003, citado por Hernandez-Ortiz y Dzul-Cauch, 2008; Stork *et al.*, 1997; Erwin, 1995) como en la hojarasca y el suelo, son uno de los grupos biológicos más afectados por cualquier tipo y nivel de perturbación,²⁴ especialmente cuando se trata de fuego o deforestación. Aunque sus comunidades regularmente son impactadas negativamente durante un incendio o en su fase inmediata (Coleman y Rieske, 2006; Springett, 1976), en etapas posteriores tienden a ser beneficiadas en distintos horizontes de tiempo (Andersen y Muller, 2000), e incluso, las especies funcionalmente importantes muestran gran capacidad de recuperación para restablecer sus condiciones de abundancia inicial. Un aspecto importante para destacar es que el fuego actúa de manera diferencial sobre todas las formas del ciclo de vida de los individuos (huevos, pupas, larvas, ninfas, juveniles, adultos, etc., según el caso).

Los impactos y efectos probables sobre algunos grupos de artrópodos son:

- Tendencia a la disminución de la biodiversidad de hormigas, especialmente de las especies exclusivas, y aumento de las más tolerantes y generalistas (Armbrecht y Ulloa-Chacon, 1999; Santos *et al.*, 2008), aunque hay estudios que no son conclusivos al respecto, y correlacionan los efectos con las características del evento y de la fauna de hormigas de la región (Farji-Brener *et al.*, 2002). Sin embargo, existe una alta correlación positiva entre heterogeneidad de coberturas vegetales y diversidad de especies (Jiménez *et al.*, 2008).
- Incremento de la biodiversidad de las comunidades de coleópteros como consecuencia de una mayor diversificación y abundancia de bejucos que originan las perturbaciones en los ecosistemas boscosos (Davies, 1998). El incremento de coleópteros puede favorecer a la vez a comunidades de anfibios, reptiles y aves que se alimentan de ellos.
- Disminución de las comunidades de alacranes (orden Escorpiones, clase Arachnida) debido a su restringida tolerancia ecológica y fisiológica y a su territorialidad. Posiblemente, los incendios más intensos, severos y de mayor tamaño y duración pueden tener un impacto mayor sobre su biodiversidad debido al alto grado de endemismo que presentan estos artrópodos en diferentes regiones ecológicas (Lamoral, 1978; Prendini, 2006; Williams, 1980; citados por Trujillo, 2009).

Las arañas son un componente muy importante de las cadenas tróficas, como depredadoras y fuente de alimento para otras especies, principalmente de vertebrados. Se caracterizan por ocupar una amplia diversidad de nichos –razón por la cual son muy abundantes en los diferentes ecosistemas– por utilizar una amplia gama de estrategias y técnicas para capturar presas y por ser muy sensibles a los cambios ambientales, ante los cuales presentan respuestas taxón-gremio específicas (Cabra, 2004). El fuego afecta negativamente, de manera especial, las comunidades de arañas del suelo, por el impacto que tiene sobre ellas la modificación de la estructura, la profundidad y el grado de humedad de la hojarasca (Uetz, 1991; Polis *et al.*, 1998; Andersen y Muller, 2000; Moretti *et al.*, 2002; Abbott *et al.*, 2003; Langlands *et al.*, 2006). Sin embargo, observaciones realizadas por los autores del presente trabajo durante el periodo inmediato a la extinción del fuego en áreas sucesionales avanzadas dan cuenta de la invasión de los sitios afectados por parte de arañas oportunistas para capturar insectos y otros invertebrados que emergen del suelo, posiblemente por la acción del calor residual.

Anfibios

Las diferentes formas de vida que presentan los anfibios (ranas, sapos, salamandras y cecilias) tienen requerimientos de hábitat muy exigentes debido a la permeabilidad de su piel, al desarrollo de algunas de sus fases de vida en ambientes acuáticos para la gran mayoría de especies y a sus hábitos alimenticios y reproductivos. Se caracterizan,

²⁴ Aun los incendios de baja intensidad tienen impactos y efectos negativos muy relevantes sobre los artrópodos del bosque, considerando que aproximadamente el 90% de las especies pasa alguna fase de su vida en el suelo o en el manto orgánico (Kleim, 1988, citado por Engstrom, 2010), aunque afecta de manera especial a las especies de omnívoros y carnívoros (Kinnaird y O'Brien, 1998).

además, por una alta fidelidad a su hábitat y microhábitat y por tener territorios reducidos (Bamford, 1992 -citado por Wilson, 1994; Duellman y Trueb, 1994; Blaustein *et al.*, 1994; Friend, 1993; Crump, 2003; Semlitch, 2003; Urbina-Cardona y Reynoso, 2005; Carey *et al.*, 2001; Duellman, 1992; Crump, 1974; Lizana y Pedraza 1998; Pefaur y Duellman 1980). Posiblemente lo planteado y la pérdida de hábitats por diferentes causas,* entre ellas los incendios de la cobertura vegetal, han hecho que los anfibios sean el grupo de vertebrados más amenazados en el mundo (Mendelson III *et al.*, 2006) y en Latinoamérica (Young *et al.*, 2001).

A pesar de que la información sobre los efectos de la relación anfibios-fuego es muy escasa, y mucho más para ecosistemas del neotrópico, se podrían mencionar como posibles los siguientes:

- a) Muerte diferida a consecuencia de la eliminación de los pequeños depósitos de agua existentes en el suelo o en el dosel, la desecación de la hojarasca, la disminución o eliminación temporal de sus principales fuentes alimenticias** y la introducción de nuevos depredadores.
- b) La eliminación de la vegetación por acción del fuego puede producir discontinuidades en el hábitat que generen aislamientos respecto a los cuerpos de agua

requeridos para completar los ciclos de vida.

- c) En los sobrevivientes, el estrés térmico y el producido por la pérdida de la calidad del hábitat (disminución de las fuentes de alimento, exposición a la depredación, eliminación de sitios de refugio y reproducción) pueden generar una disminución de su capacidad de respuesta inmunológica, y por lo tanto mayor susceptibilidad a patógenos.
- d) Al ser territoriales la mayor parte de las especies de anfibios, la eliminación o transformación de los microhábitats por el fuego puede dificultar su dispersión uniforme en los nuevos escenarios e implicar en algunos casos alteraciones en las relaciones intraespecíficas e interespecíficas (acceso a los recursos del sitio, atracción sexual, estrategias predatorias o antidepredativas, etc.).
- e) Como consecuencia de la mortalidad inicial y de la diferida, lo mismo que del impacto diferencial en edades y estadios del ciclo de vida, es posible que el fuego incida en la tasa de crecimiento de las poblaciones de las áreas afectadas por los incendios y, por tanto, en sus posibilidades de sobrevivencia y recuperación.
- f) Los incendios superficiales y de baja intensidad afectan de manera diferencial –con mayor severidad– a las poblaciones

de anfibios terrestres, tanto de manera directa como indirecta, al eliminar o alterar la estructura, la profundidad, la temperatura y la humedad de la hojarasca. Por ejemplo, los juveniles de las especies de ranas que depositan sus huevos en el piso del bosque son eliminados por la acción del fuego o del calor producido, y se interrumpe de esta manera el ciclo reproductivo de la población local de la respectiva especie.

- g) Las especies que hacen migración vertical, traslapando en muchas ocasiones su nicho estructural con otras especies con que compiten por recursos, pueden resultar beneficiadas en el corto plazo por el mayor desarrollo de las lianas, mediante las cuales pueden ampliar el área de exploración del dosel.

Frente a los cambios en la calidad del hábitat ocasionados por una perturbación, como un incendio ocurrido en el rango del régimen natural de fuego de un área determinada, los anfibios pueden experimentar cambios conductuales (patrones de actividad y de uso del hábitat), ecológicos (ampliación o reducción del territorio y del espectro alimenticio, relaciones intraespecíficas e interespecíficas) y fisiológicos (tasas de reproducción individual, duración del periodo reproductivo). Del desarrollo de estas habilidades depende el éxito reproductivo y la sobrevivencia a los eventos tolerantes al fuego a los que estén sometidas las poblaciones locales de la especie. Lo anterior no desconoce que las habilidades señaladas puedan tener una determinación filogenética (Gibbons *et al.*, 2000; Crump,

2003; Caldwell, 1996, Thorpe *et al.*, 1994, Vitt y Zani, 1996).

Reptiles

Los reptiles (serpientes, tortugas, lagartos, cocodrilos y el tuatara –*Sphenodon* de Nueva Zelanda–) son –al igual que los anfibios– organismos poiquiloterms, es decir, no tienen control fisiológico de su temperatura corporal, razón por la cual establecen relaciones conductuales muy especiales con su entorno para beneficiarse de la radiación solar directa o indirecta, según la especie. No obstante, presentan una piel más gruesa e impermeable cubierta con escamas o plaquetas que les ofrece una mayor protección contra las variaciones microclimáticas de temperatura y humedad extremas de sus hábitats. Son predominantemente carnívoros, aunque la herbivoría se presenta en algunas especies, como las lagartijas y tortugas. Las serpientes son exclusivamente carnívoras y pueden tener dietas restringidas y mecanismos de alimentación muy especializados (Goin *et al.*, 1978).

Muchas especies de lagartos y serpientes son vivíparas, lo cual implica que depositan sus huevos en sitios seleccionados que garanticen las condiciones de humedad y temperatura apropiadas para una incubación exitosa, pero en lo reproductivo el oviparismo es el modo más extendido, presenta un amplio rango adaptativo a muchos ambientes y ha colonizado todos aquellos que su tolerancia climática les permita (Bellairs y Altridge, 1978).

Las anteriores condiciones biológicas y demandas ecológicas predisponen a los

* El fenómeno de *declives enigmáticos* de las poblaciones de algunas especies de anuros neotropicales, presentados especialmente en el área mesoamericana, parecen tener su origen en el cambio climático, el ataque de hongos patógenos como *Batrachochytridium* spp, la contaminación con agroquímicos (pesticidas y fertilizantes, etc.) dispersados por las lluvias y los cambios en los usos del suelo (Carey *et al.*, 1999; García-Moreno *et al.*, 2008; Lips *et al.*, 2003; Whitfield, 2007; Urbina-Cardona *et al.*, 2006).

** Esto es particularmente sensible para las especies con hábitos especializados.

reptiles –en principio– a impactos y efectos negativos producidos por los incendios de la cobertura vegetal. No sobra advertir que es complejo desarrollar los estudios demográficos de muchas especies de reptiles debido a sus hábitos discretos, distribución territorial, demandas específicas de hábitat y tamaño poblacional.

Las observaciones y estudios sobre los impactos y efectos de los ICV sobre especies particulares de reptiles coinciden en la existencia de respuestas diferenciadas al fenómeno, aunque en todos los casos guardan una estrecha relación con la naturaleza del fuego, las demandas ecológicas específicas de cada taxón y el tiempo de regeneración del sitio. En el caso de los efectos producidos sobre las comunidades de reptiles a consecuencia de la transformación del hábitat, tampoco existe un patrón consistente,* lo cual significa que puede haber incrementos, disminuciones o alteraciones no significativos en cuanto a riqueza de especies o abundancia poblacional.

Algunos de los impactos y efectos reportados o potenciales de los incendios sobre los reptiles (Fredericksen y Fredericksen, 2000; Brown y Nelson; 1993; Walter, 1997; Russell *et al.*, 1999; Lehtinen, R.J., J. B. Ramanamajato y J. G. Raveloarison, 2003; Bell, K. E. y M. A. Donnelly, 2006; Glor *et al.*, 2001; Urbina-Cardona y Londoño, 2003; Urbina-Cardona *et al.*, 2008; Urbina-Cardona *et al.*, 2006; Suazo-Ortuño I, Alvarado-Díaz J, Martínez-Ramos M., 2008; Calderón-Mandujano, R. R., C.

Galindo-Leal y J. R. Cedeño-Vázquez, 2008; Urbina-Cardona, J.N., Londoño-Murcia, M.C. y García-Ávila, D.G., 2008; Lowell, 1994; Prior y Weatherhead, 1996; Gibbons *et al.*, 2000; Keller y Heske, 2000; Pilliod y Peterson, 2000; Herrando *et al.*, 2003; Pons *et al.*, 2003; Brotons *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 2001) son:

- a) Las especies caracterizadas por baja movilidad, como las tortugas, tienen mayor predisposición a morir por la acción directa del fuego.
- b) La transformación de las áreas boscosas a otros tipos de coberturas vegetales impacta de manera generalizada a las especies de reptiles propias de estos ecosistemas como consecuencia de la reducción, fragmentación y pérdida de calidad del hábitat remanente, a la alta posibilidad de inmigración de otras especies de reptiles con mayores ventajas competitivas y de especies depredadoras y a una mayor probabilidad de intervención humana en dichas áreas. De hecho, estos efectos sobre los ecosistemas pueden originar mayores tasas de mortalidad que la acción del fuego.
- c) Las especies que prefieren hábitats más abiertos pueden resultar beneficiadas durante los primeros años de regeneración de un área afectada por un incendio; por el contrario, aquellas que usan sitios con vegetación más densa tienden a dismi-

nuir significativamente el tamaño de sus poblaciones.

- d) Las especies de reptiles con rangos de distribución más amplia tienen una mayor probabilidad de resultar afectadas por incendios en distintos tipos de cobertura vegetal.
- e) El fuego puede tener efectos nocivos para las distintas especies de reptiles cuando se presenta al inicio del periodo de nacimiento de las crías, debido a que limita la oferta de nuevos sitios y alimentos.
- f) Las especies que utilizan micrositios con humedad abundante o que viven cerca de cuerpos de agua pueden resultar menos afectadas durante un incendio.
- g) Las lagartijas y serpientes pueden recolonizar rápidamente las áreas afectadas por el fuego desde las zonas aledañas, especialmente desde fragmentos del mismo tipo de cobertura vegetal, y puede presentarse un mayor recambio de especies entre fragmentos grandes y pequeños. Estos procesos de recolonización se encuentran supeditados a la respuesta del área afectada, especialmente en lo relacionado con el incremento de la oferta alimenticia.
- h) Las especies de reptiles que habitan la superficie del bosque generalmente resultan afectadas por los incendios debido a la alteración o transformación de los componentes críticos de ese hábitat (hojarasca, condiciones microclimáticas, barreras visuales, sitios de refugio, etc).
- i) La vulnerabilidad de las serpientes es mayor cuando coinciden los eventos de

fuego y el proceso de ecdisis o cambio de piel.

- j) Las especies propias de hábitats boscosos, en especial las de mayor porte y de hábitos arborícolas, tienen una mayor probabilidad de ser afectadas cuando los incendios alteran la estructura y continuidad de la vegetación.
- k) Los reptiles de hábitos fosoriales (lagartijas y serpientes) pueden responder más exitosamente a los impactos del fuego durante el proceso de incendio y en sus fases posteriores.

Aves

Las aves desempeñan un importante papel en procesos relacionados con la ecología de plantas y de otros animales, pero al igual que para otros taxones de vertebrados no hay mucha claridad acerca de los efectos y respuestas de las aves a los incendios de la cobertura vegetal, aunque existe una amplia percepción de que constituyen uno de los taxones más vulnerables a las perturbaciones ocasionadas por el fuego en los ecosistemas tropicales debido tanto a sus hábitos ecológicos, territoriales y reproductivos como a su intolerancia a los claros. Algunos de los impactos y efectos reportados o esperados (Barlow *et al.*, 2002; Johns, 1991; Canaday, 1996; Mason, 1996; Aleixo, 1999; Bierregard y Lovejoy, 1989; Thiollay, 1992, 1994, 1999; Cochran *et al.*, 1999; McIntyre, 1995; Petit *et al.*, 1999; Renjifo, 1999; Villard *et al.*, 1999; Hutto, 1995, Hutto *et al.*, 2008; Saab y Powell, 2005; Engstrom, 2010; Sanaiotti y Magnusson, 1995) son:

* Infortunadamente el porcentaje de estudios sobre los efectos de la pérdida del hábitat en especies de reptiles neotropicales es marginal. Carvajal-Cogollo y Urbina-Cardona (2008), citando diferentes fuentes, mencionan que a pesar de que los trópicos albergan más de la mitad de los reptiles del mundo, solo existen diecisiete publicaciones al respecto.

- a) Muerte de individuos por exposición directa al fuego, al humo y por sofocación, especialmente de crías y juveniles. Los huevos son particularmente sensibles al calor.
- b) Incremento de especies insectívoras en los periodos inmediatamente posteriores al incendio, debido al crecimiento explosivo de las poblaciones de insectos colonizadores.
- c) Relación directa entre los procesos de recambio y abundancia relativa de especies en cuanto a gremios alimentarios (insectívoros, nectarívoros, frugívoros, etc.) y los procesos de regeneración de la vegetación.
- d) Las especies de hábitos alimenticios especializados pueden resultar más afectadas cuando la intensidad, severidad y escala espacial del incendio son mayores.
- e) Las especies con mayor riesgo de ser afectadas son las que habitan el sotobosque –por la diversidad de hábitat, nichos y recursos– que para los insectívoros, frugívoros y nectarívoros.
- f) La mayor parte de especies de aves responden de manera conductual a los incendios. Por ejemplo, cuando el fuego afecta la disponibilidad y calidad nutricional del alimento, algunas especies de aves pueden alterar su régimen de forrajeo y ampliar o reducir las fuentes de recursos.
- g) La probabilidad y las tasas de recuperación de las comunidades de aves afectadas por el fuego dependen en alto grado

del tiempo de recurrencia con que se presenten los incendios.

- h) La transformación de un hábitat específico utilizado por especies que desarrollan migración latitudinal o altitudinal puede generar alteraciones *ex situ* en la estructura de las comunidades de aves de las cuales forman parte las especies involucradas.
- i) La acción del fuego sobre las áreas que sirven de conectores o que conservan relictos de vegetación primaria o secundaria avanzada en ambientes fragmentados tiene graves consecuencias para la riqueza y abundancia de aves, por el riesgo de generar aislamientos y disminuir la oferta de sitios de percha y de recursos alimenticios.

En general, las respuestas presentadas por las especies de aves en las fases posteriores al fuego se podrían clasificar, de acuerdo con la línea esquemática propuesta por Pons (2006) –la cual amplía otros estudios (Reilly, 1991; Christensen *et al.*, 1985)–, en las siguientes tendencias. Se aclara que en todo caso el comportamiento de la especie depende tanto del tipo de incendio como de sus requerimientos de alimento, refugio y cría y del nivel de adaptación o de respuesta que tenga al fuego:

- a) Especies que toleran o resisten los efectos del fuego. Sus poblaciones pueden aumentar, disminuir o mantener su número, y el nivel de respuesta está muy correlacionado con la severidad del incendio. Por ejemplo, en eventos de severidad baja o moderada las aves regresan a los pocos días de transcurrido el incendio.

- b) Especies que desaparecen temporalmente del área afectada y reaparecen al cabo de un tiempo característico para cada especie. Entre ellas están las especialistas del sotobosque y del estrato arbóreo, cuya recolonización se produce a partir del momento en que la sucesión vegetal ha regenerado dichos hábitats. Generalmente el proceso se inicia uno o dos años después del incendio.
- c) Especies que pueden colonizar transitoriamente el área quemada desde hábitats abiertos, normalmente cercanos, y que van desapareciendo en pocos años en la medida en que avanza la sucesión vegetal.
- d) Especies sin una tendencia clara, cuya presencia puede estar asociada a factores ajenos a la sucesión vegetal del área; por ejemplo, las especies migratorias.

Mamíferos

Son componentes críticos de todos los ecosistemas. Su amplio espectro alimenticio –herbívoros, carnívoros u omnívoros– les permite estar desde los niveles más inferiores hasta los más superiores de las cadenas tróficas. Esta condición y su movilidad hace que se constituyan en el principal vehículo para la dispersión y depredación de semillas, por lo cual desempeñan un papel muy importante en la estructura y dinámica de las comunidades vegetales. Ocupan un amplio espectro de hábitats, aunque parece ser que la estructura y composición de la vegetación juegan un papel muy importante en su selección, en razón de la oferta alimenticia y de los riesgos de depredación.

Los impactos y efectos de los incendios de la cobertura vegetal sobre los mamíferos son diversos y están supeditados a sus rasgos biológicos (tamaño, etc.), a sus hábitos alimenticios y reproductivos, y a los requerimientos de hábitat. Aunque la mayor parte de las investigaciones se han centrado en los pequeños mamíferos, a continuación se presentan algunas tendencias en los efectos posibles del fuego sobre los mamíferos en general, teniendo en cuenta tanto sus atributos y requerimientos como sus fuentes alimenticias y hábitats (Koproski *et al.*, 2006; Rodríguez y Arita, 2005; Lagos *et al.*, 1995; Letnic *et al.*, 2004; Vitt y Caldwell, 1994; Gorresen y Willig, 2004; Gorresen *et al.*, 2005; Noble *et al.*, 2007; Nigel *et al.*, 1997; Terborgh, 1992; Terborgh y Wright, 1994; Dodmer y Aquino, 2000.; Wells *et al.*, 2009; Cole, 2009; Alvarez-Clare y Kitajima, 2009; Paine y Beck, 2007; Mendoza y Dirzo, 2007; Dirzo y Miranda, 1991; Muller-Landau, 2007; Wright *et al.*, 2000; Brewer y Rejmánek, 1999; Wilson, 1994; Fox, 1982; Briani *et al.*, 2004; Dawes-Gromadzki, 2007; Stevens, 2008; Torre y Díaz, 2004; Converse *et al.*, 2006; Chiarello, 2008; Silveira *et al.*, 1999; Smith, 2000; Vieira, 1999; Vieira y Marinho-Filho, 1998; Pérez *et al.*, 2003; Willing *et al.*, 2007; Verdade *et al.*, 2009; Galindo, 2004).

- a) Los mamíferos de hábitos arbóreos tienen una mayor posibilidad de eludir los incendios de baja intensidad y severidad, siempre y cuando haya continuidad del dosel y su agilidad se los permita, aunque algunas especies como *Bradypus variegatus* y *Choloepus* spp. son altamente vulnerables por su escasa movilidad.

- b) Los mamíferos grandes y ágiles son generalmente más exitosos para evadir los impactos del fuego; sin embargo, se ha reportado la muerte de felinos adultos como el *Puma concolor* en Brasil durante incendios severos y de gran escala.
- c) Los efectos de los incendios sobre las poblaciones de los grandes mamíferos depredadores pueden generar la expansión de las especies mesodepredadoras, con graves consecuencias sobre las especies que les sirven de base alimenticia y, por esa vía, sobre la diversidad y estructura vegetal.
- d) Los pequeños mamíferos –que son componentes críticos en varios ecosistemas porque son la base alimenticia de muchas especies de carnívoros y omnívoros (mamíferos, reptiles y aves) y por su papel en la dispersión y depredación de semillas, lo mismo que en la dispersión de hongos hipógeos– son propensos a los efectos de los incendios cuando se queman las coberturas vegetales más densas, que buena parte de ellos prefieren como estrategia antidepredativa. En todos los tipos de cobertura el mayor impacto del fuego es la eliminación de los micrositios de refugio utilizados para eludir la depredación, almacenar alimentos y reproducirse. No obstante, en la literatura se reporta como una tendencia generalizada el incremento de las poblaciones de los micromamíferos en las fases postfuego.
- e) Los mamíferos de hábitos alimenticios especializados (frugívoros, nectarívoros, polinívoros) están expuestos a mayores tasas de depredación cuando se concentran en fragmentos pequeños de bosque y en matrices de vegetación dominadas por fases sucesionales tempranas.
- f) Los incendios en las zonas áridas bajo regímenes de fuego alterado pueden conducir a la extinción local de especies de pequeños mamíferos debido a la presión que se genera en contra de ellos por la escasez extrema de alimentos.
- g) La lluvia postfuego desempeña un papel determinante para la sobrevivencia y recuperación de las poblaciones locales de mamíferos. Si ella ocurre, se produce generalmente un crecimiento que puede ser explosivo, a manera de “pulso” poblacional.
- h) Los incendios forestales de mayor intensidad y severidad que transforman el hábitat de los mamíferos carnívoros,* pueden incidir en la estructura y composición de la vegetación al disminuir la presión que ejercen sobre los mamíferos que depredan frutos y plántulas y dispersan semillas, principalmente de árboles.
- i) Los incendios de gran escala o de alta recurrencia que transforman el hábitat de los mamíferos no carnívoros de mayor tamaño (dantas, pecaríes, venados, etc.) pueden ocasionar su desaparición local, lo cual influye de manera indirecta en la

riqueza, la composición y la estructura de la vegetación del bosque tropical, especialmente cuando se trata de fragmentos rodeados de una matriz con coberturas vegetales no favorables para ellas. Las actividades diarias de estos animales, como el “pisoteo”, el “hociqueo” y el “forrajeo”, tienen un impacto de alto significado ecológico puesto que, por una parte, promueven la creación de micrositios para la germinación exitosa de semillas y, por otro lado, afectan la densidad de semillas y de plántulas, alterando de esta manera la distribución espacial y la diversidad de las especies vegetales en el área.

- j) El fuego en los ecosistemas con clima bimodal puede exacerbar los efectos de la estación seca sobre la población de mamíferos, al disminuir sus fuentes alimenticias e incrementar la probabilidad de ser depredados.
- k) Los incendios en los ecosistemas inundables tienen efectos importantes cuando ocurren en las islas de vegetación que los mamíferos usan como zonas de refugio durante el periodo que el agua eleva de nivel, como ocurre en la *Varzea* amazónica y en las sabanas. Igual efecto se produce cuando el fuego quema los bosques de tierra firme aledaños a los inundables, vitales para las especies de mamíferos que migran a ellos durante la época de crecientes.
- l) Los mamíferos medianos y grandes de baja movilidad pueden sufrir efectos ecológicos de largo plazo cuando los incendios perturban de manera significativa su hábitat. Por ejemplo, el oso hormiguero

(*Myrmecophaga tridactyla*) –cuya alimentación especializada, bajas tasas metabólicas, largos periodos de gestación (190 días) y territorios amplios los hace muy vulnerables– sufre merma significativa de sus poblaciones si no cuenta con áreas alternas a su territorio quemado.

- m) Las poblaciones de carnívoros y omnívoros pueden responder favorablemente en las fases posteriores a los incendios, dada su naturaleza oportunista, siempre y cuando no tengan restricciones territoriales.
- n) El fuego puede contribuir indirectamente a la reducción de infecciones en las poblaciones de mamíferos, al producir la muerte directa de los individuos enfermos o al acelerar su muerte diferida.
- o) Los efectos de los incendios sobre los murciélagos pueden ser muy diversos, en razón principalmente de sus exigencias de hábitat, ya que algunas especies son totalmente dependientes de él (sólo habitan bosques primarios o secundarios avanzados y continuos o fragmentos superiores a 200 ha); otras utilizan mosaicos de vegetación, siempre y cuando existan conectores de vegetación arbórea (fragmentos de bosque primario o secundario maduro y matrices con vegetación ribereña, pastos u otro tipo de coberturas); y algunas especies más son totalmente adaptables, e incluso resultan beneficiadas por la transformación del hábitat debido a su carácter de generalistas.
- p) Posiblemente el efecto más significativo de los incendios de la cobertura vegetal que se presentan de manera reiterada en

* Por ejemplo, se han calculado las siguientes áreas vitales por individuo para algunas especies de mamíferos en el norte de Brasil: *Tayassu pecari*, 30km²; *Tayassu tajacu*, 10 km²; y *Mazama americana*, 1 km² (Dodmer, R. E.; R. Aquino, 2000).

áreas de bosque tropical con regímenes alterados de fuego es la defaunación, principalmente de mamíferos grandes. Diversos autores (Dirzo y Miranda, 1991; Redford, 1992; Beck, 2005; Roldan y Simonetti, 2001; Ickes *et al.*, 2001) han señalado las consecuencias dramáticas que puede tener la ausencia total o parcial de algunos taxones animales en los procesos de reemplazo de los distintos componentes arbóreos de la vegetación.

Perspectivas frente al cambio climático

Aunque el Cambio Climático Global (CCG), en especial el calentamiento, no es un evento nuevo en la historia geológica de la Tierra, el proceso en curso tiene de singular tanto la intensidad de su ritmo como su origen fundamentalmente antrópico, lo cual coloca a la humanidad y a las diferentes expresiones de vida ante escenarios de alta incertidumbre, que requieren actuaciones oportunas de la comunidad internacional con el fin de incorporar a las estrategias de desarrollo social una perspectiva de adaptación al fenómeno.²⁵

Teniendo en cuenta que gran parte de la documentación existente acerca de los impactos del CCG se refiere a especies, ecosistemas y procesos ecológicos de las zonas templadas, en términos generales se han identificado una serie de tendencias globales, entre las cuales se encuentran los incendios de la cobertura vegetal como eventos marcadamente catas-

tróficos en un mayor número de regiones del mundo o su atenuación en otras, en donde formaba parte de la dinámica ecosistémica. La alteración de las condiciones microclimáticas (temperatura y precipitación promedio y estacionales, principalmente) favorece algunas transformaciones en las coberturas vegetales y en los patrones de fuego (Dale *et al.*, 2001; Hellmann *et al.*, 2008; Low, 2008; Smith *et al.*, 2000; Flannigan *et al.*, 2000; Cochrane, 2001) debido a fenómenos como:

- Incremento de la retroalimentación positiva entre ICV y gases de efecto invernadero, en la medida en que mayores temperaturas propician los incendios de mayor envergadura y estos, a la vez, generan mayores descargas de gases invernadero que contribuyen a la elevación de la temperatura ambiental.
- La colonización de ecosistemas por parte de especies invasoras propensas al fuego, debido tanto a cambios en los rangos de distribución geográfica de dichas especies como a su preferencia por hábitats perturbados.
- Incremento de los combustibles vegetales como consecuencia de la mortalidad ocasionada por la propagación de plagas y enfermedades, de las sequías extremas en territorios más extensos y de la pérdida de humedad en la vegetación viva.
- Eliminación del potencial inhibitorio que tienen las especies nativas adaptadas a re-

gímenes de fuego de largo periodo para la propagación de los incendios, debido a su extinción local, ocasionada tanto por la interrupción de los procesos reproductivos (ausencia de polinizadores, disminución de la producción de semillas, mortalidad de plántulas) como por su desplazamiento por especies invasoras.

En síntesis, la biodiversidad más vulnerable al Cambio Climático Global (CCG) es la de los ecosistemas de montaña, como los bosques de niebla y de páramo, los bosques muy húmedos y los bosques secos, como consecuencia de la disminución de sus niveles de humedad. Por el contrario, las especies con mayor capacidad de ajuste o adaptación al cambio son aquellas que tienen una mayor heterocigosidad y diversidad genética.

Consideraciones finales

Es indiscutible que la sociedad humana, especialmente la occidental, avanza hacia una crisis ambiental que en el fondo es, tal como lo ha afirmado Ángel Maya, una expresión de la crisis de su propia civilización. La introducción de una sobrecarga de gases invernadero a la atmósfera y a otros sistemas naturales, lo mismo que la eliminación progresiva de los sumideros de carbono, están configurando nuevos escenarios climáticos con consecuencias imprecisas para los diferentes ecosistemas del planeta y para

la biodiversidad contenida en ellos.²⁶ Lo anterior no obsta para ignorar que el ciclo con retroalimentación positiva CCG-ICV tendrá efectos catastróficos sobre la biodiversidad y los bienes y servicios que ella presta al desarrollo económico y social del hombre.

En el anterior contexto, la pregunta es ¿qué hacer? Sin pretender indicar una ruta única y reconociendo que los incendios de la cobertura vegetal son un fenómeno multicausal que requiere ser atacado por varias vías, se podrían señalar las siguientes acciones:

- Incorporar los escenarios probables de cambio climático a los procesos de ordenamiento territorial.
- Disminuir la degradación de las coberturas vegetales, especialmente boscosas, mediante procesos de ordenamiento y protección territorial.
- Desarrollar proyectos de reforestación de gran alcance, que permitan incrementar la capacidad natural de fijación de carbono y su extracción de la naturaleza. Igualmente, disminuir la presión humana sobre los productos maderables de los bosques naturales.
- Desarrollar procesos de protección efectiva de los ecosistemas a lo largo de gradientes ambientales, con el fin de conservar una mayor diversidad genética en las especies de flora y fauna.

²⁵ Algunas de ellas tienen como referencia la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (1992), la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación (1996), el Convenio sobre la Diversidad Biológica (1992) y el Protocolo de Kyoto (1997).

²⁶ En Colombia, por ejemplo, los ecosistemas de alta montaña, ubicados por encima de los 2700 msnm –proveedores de recursos estratégicos como el agua– y los valles interandinos y los altiplanos de Boyacá, Cundinamarca y Nariño –caracterizados por ser las grandes despensas nacionales de alimentos– son ecosistemas con mayor potencial de afectación por cambio climático (MAVDT, Ideam, primer informe sobre cambio climático, 1990).

- e) Propiciar la supresión del fuego como práctica en los procesos agropecuarios.
- f) Desarrollar modelos de gestión del riesgo de ICV y CICV de mayor base científica, focalizados en la prevención de eventos y en la adaptación al cambio climático.
- g) Respalda mayores esfuerzos investigativos orientados a:

- Ampliar y profundizar la línea base de conocimiento nacional/local sobre los ICV y CICV.
- Modelar los escenarios locales de cambio climático, de las tendencias de ICV y CICV, y de los impactos sobre ecosistemas y biodiversidad.
- Monitorear los cambios poblacionales en especies clave o con estatus de conservación crítico y de los procesos de interacción biológica y ecológica.
- Desarrollar sistemas de vigilancia remota y el desarrollo de sistemas de respuesta inmediata a eventos.
- Formular políticas y normativas más exigentes para el ordenamiento de tierras y bosques.
- Diseñar estrategias de educación y gestión ambiental del riesgo de ICV y CICV que sean cultural, social e institucionalmente viables.

Se podría finalizar diciendo que la disminución del riesgo de ICV y CICV, y de sus impactos sobre la biodiversidad depende fundamentalmente del diseño e implementa-

ción de estrategias que comprometan de manera efectiva a los diferentes actores sociales (Gobierno, sociedad civil, sector productivo, academia) en acciones de largo plazo, orientadas a favorecer la adaptación individual y colectiva al cambio climático, a partir de la producción y el consumo responsable.

Bibliografía

- Abbott, I.; Burbidge, T., Strehlow, K.; Mellican, A. y Wills, A. (2003). "Logging and burning impacts on cockroaches, crickets and grasshoppers, and spiders in jarrah forest, Western Australia". *Forest Ecology and Management*, 174, 383–399.
- Abrams, M.D. (1992). "Fire and development of Oak Forest". *Bioscience*, 42, 346–353.
- Ackerman, A.S., Toon, O., Stevens, D., Heysmsfield, A., V. Ramanathan and Welton, E. (2000). "Reduction of tropical cloudiness by soot". *Science*, 288, 1042–1047.
- Agee, J.K. (1993). *Fire ecology of pacific northwest forests*. Washington, D.C.: Island Press, 1993. 477.
- Aleixo, A. (1999). "Effects of selective logging on a bird community in the Brazilian Atlantic forest". *Condor*. 101, 537–548.
- Alvarez-Clare, S. y Kitajima, K. (2009). "Susceptibility of Tree Seedlings to Biotic and Abiotic Hazards in the Understory of a Moist Tropical Forest in Panama". *Biotropica*, 41 (1), 47–56.
- Andersen A. N. y Müller, W. J. (2000). "Arthropod responses to experimental fire regimes in an Australian tropical

savannah: ordinal level analysis". *Austral Ecology*, 5, 199–209.

- Andreu V., Rubio J.L., Forteza J and Cerni R. (1996). "Postfire effects on soil properties and nutrient losses". *International Journal of Wildland Fire*, 6, 53– 6.
- Anzola, M. A. y González, Y. (2004). *Incendios, una amenaza más para los bosques tropicales*. Recuperado 15 de junio de 2010, de IDEAM, sitio web del Instituto de Investigaciones.
- Armbrrecht, I. y Ulloa-Chacón, P. (1999). "Rareza y diversidad de hormigas en fragmentos de bosque seco colombianos y sus matrices". *Biotropica*, 31 (4), 646 – 653.
- Auld, T. D. y Denham, A. J. (2001). "The impact of seed predation by mammals on post-fire seed accumulation in the endangered shrub" *Grevillea caleyi* (Proteaceae). *Biological Conservation*, 97 (3), 377–385.
- Avendaño-Torres, K. y Aguirre-C, J. (2007). "Los musgos (*Bryophyta*) de la región de Santa María-Boyacá (Colombia)". *Caldasia*, 29, 59–71.
- Barbosa, R. I, y Fearnside, P.M. (1999). "Incendios na Amzonía Brasileira: estimative da emissao de gases do efeito estufa pela queima de diferentes ecossistemas de Romaina na Passagem do evento El Niño" (1997/1998). *Acta Amazônica*, 29, 513–534.
- Barlow, J y Pérez, C.A. (2004). "Ecological responses to El Niño-induced surface fires in central Brazilian Amazonia: management implications for flam-

mable tropical forests". *Proceedings of the Royal Society of London*, 359, 367–380.

- Barlow, J y Silveira, J. (2009). "The consequences of fire for fauna of humid tropical forest". In Cochrane, M. (Editor). *Tropical Fire Ecology*. Springer-Parxis Publishing, New York, 543–556.
- Barlow, J., Haugaasen, T y Perez, C.A. (2002). "Effects of ground fires on understory bird assemblages in Amazonian forests". *Biological Conservation*, 105, 157–169.
- Battle, J. y Golladay, S.W. (2003). "Prescribed fire's impact on Water Quality of Depressional Wetlands in Southwestern Georgia". *American Midland Naturalist*, 150 (1), 15–25.
- Bawa, K.S. (1990). "Plant-pollinator interaction in tropical rain forest". *Annual Review of Ecology and Systematics*, 21, 399–422.
- Bell, K. E. y Donnelly, M.A. (2006). "Influence of forest fragmentation on community structure of frogs and lizard in northeastern Costa Rica". *Conservation Biology*, 20 (6). 1750–1760.
- Bellairs, A. y Altridge, J. (1978). *Los reptiles*. Madrid: H. Blume Ediciones. 261.
- Beschta, R.L. (1990). "Effects of fire on water quantity and quality". En J. D. Walsstad; S.R., Radosevich y D.V., Sandberg (eds.). *Natural and prescribed fire in Pacific Northwest forests*. Oregon: Oregon State University Press, 45–61.
- Beukema, A. y Noordwijk, H.M. Van. (2004). "Terrestrial pteridophytes as indicators of a forest – like environment in rubber

- production systems in the lowlands of Jambi, Sumatra". *Agricultura, ecosystems and environment*, 104, 63-73.
- Bierregard, R.O y Lovejoy, T.E. (1989). "Effects of forest fragmentation on Amazonian understory bird communities". *Acta Amazónica*, 215-241.
- Billings R. y Espino J.V. (2005). "*El gorgojo descortezador del pino* (Dendroctonus frontalis): cómo reconocer, prevenir y controlar plagas". Servicio Forestal de Texas, Publ. 0605/15000.
- Blaustein A. R.; Wake, D. B. y Sousa W. P. (1994). "Amphibian declines: Judging Stability, Persistence, and Susceptibility of Populations to local and Global Extinctions". *Conservation Biology*, 8, 60-71.
- Bock, C. E. y Bock, J.H. (1983). "Responses of birds and deer mice to prescribed burning in ponderosa pine". *Journal of Wildlife Management*, 47, 836-840.
- Boerner, R. (1982). "Fire and Nutrient Cycling in Temperate Ecosystems". *BioScience*, 32 (3), 87-192.
- Bond W.J, y Van Wilgen, B.W. (1996). *Fire and Plants*. London, UK: Chapman & Hall.
- Bond, W. y Keele, J. (2005). "Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems". *Trends in Ecology and Evolution*, 20, 387-394.
- Bowman, M. J. S. et al., (2009). "Fire in the Earth System". *Science*, 324, (5926), 481-484.
- Brawn, J.D.; Robinson, S.K. y Thompson III, F.R. (2001). "The role of disturbance in the ecology and conservation of birds" vn kn. *Annual Review of Ecology and Systematics* 32:251- 276.
- Breining, D.R. y Smith, R.B. (1992). "Relationships between fire and bird density in coastal scrub and slash pine flatwoods in Florida". *American Midland Naturalist*, 127, 233-240.
- Brewer, S.W. y Rejmánek, M. (1999). "Small rodents as significant dispersers of tree seeds in a Neotropical forest". *Journal of Vegetation Science*, 10 (2), 165-174.
- Briani, D.C. et al. (2004). "Post-fire succession of small mammals in the Cerrado of central Brazil". *Biodiversity and Conservation*, 13, 1023-1037.
- Brotons, L., Pons, P. y Herrando, S. (2005). "Colonisation of dynamic Mediterranean landscapes: where do birds come from after fire?" *J. Biogeography*, 32, 789-798.
- Brown, G.W. y Nelson, L.L. (1993) "Influence of successional stage of *Eucalyptus regnans* (mountain ash) on habitat use by reptiles in the central highlands, Victoria" *Australian Journal of Ecology*, 18, 405-17.
- Brown, G.W. y Krygier, J.T. (1970). "Effects of clearcutting on stream temperature". *Water Resources Research*, 6, 1133-1140.
- Buddle, C.M. et al. (2006). "Arthropod responses to harvesting and wildfire: Implications for emulation of natural disturbance in forest Management". *Biological Conservation*, 128 (3). 346-357.
- Buschbacher, R. (1986). "Tropical deforestation and pasture development". *BioScience*, 36 (1), 22-28.
- Cabra, J.J. (2004). "Estimación de la diversidad alfa, beta y gamma de arañas en un ambiente heterogéneo: Parque Natural Regional El Vínculo (Valle, Colombia)". En *Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle*. Departamento de Biología. Cali: Universidad del Valle, 14-22.
- Calderón-Mandujano, R. R., Galindo-Leal, C. y Cedeño-Vázquez, J.R. (2008). "Utilización de hábitat por reptiles en estados sucesionales de selvas tropicales de Campeche". México. *Acta Zoológica Mexicana* (Nueva Serie), 24, 95-114.
- Canaday, C. (1996). "Loss of insectivorous birds along a gradient of human impact in Amazonia". *Biological Conservation*, 77, 63-77.
- Carey, C., Cohen, N. & Rollins-Smith, L. (1999). "Amphibian declines: An immunological perspective". *Developmental and Comparative Immunology*, 23, 459-472.
- Carvajal-Cogollo, J.E. y Urbina-Cardona, J.N. (2008). "Patrones de diversidad y composición de reptiles en fragmentos de bosque seco tropical en Córdoba, Colombia". *Journal Tropical Conservation Science*, 1 (4), 397-416.
- Casillas, P. (s. f.). *Efecto de los incendios forestales en los suelos, la calidad del agua y el hábitat*. Guadalajara: La Universidad.
- Castillo, M., Pedernera, P. y Peña, E. (2003). "Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global". *Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA*, 19 (3-4), 9.
- Cavelier, J.; Aide, T.M.; Santos, C.; Eusse, A.M. y Dupuy, J.M. (1998). "The savanization of moist forest in the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia". *Journal of Biogeography*, 25, 901-912.
- Ceccon, E. y Miramontes, O. (1999). "Mecanismos y actores sociales de la deforestación en la Amazonia Brasileña". *Revista Interciencia*, 24 (2), 112-119.
- Certini, G. (2005). "Effects of fire on properties of forest soils: a review". *Oecologia*, 143, 1-10.
- Chiarello. (2008). *Density and Population Size of Mammals in Remnants of Brazilian Atlantic Forest*. *Conservation Biology*. 14 (6), 1649 – 1657.
- Christensen, P.E.; Wardell-Johnson, G. y Kimber, P. (1985). "Birds and fire in southwestern forests". In A Keast, H.F. Recher, H. Ford & D. Saunders (eds) *Birds of eucalypt forests and woodlands: Ecology, conservation, management*. Surrey Beatty & Sons, Sydney, 291-99.
- Chuvieco, E.; Martín, M.P.; Martínez, J. y Salas, F.J. (1998). "Geografía e incendios forestales". *Serie Geográfica*, 7, 11-17.
- Cochrane M.A. y Schulze M.D. (1999). "Fire as a recurrent event in a tropical forest of the eastern Amazon: effects on forest structure, biomass, and species composition". *Biotropica*, 31, 2-16.
- Cochrane, M.A. (2003). "Fire science for rainforests". *Nature*, 421, 913-919.
- Cochrane, M.A. (2002). "Spreading like Wildfire. Tropical forest fires in Latin America and the Caribbean". *United Nations Environment Programmer, Re-*

- gional Office for Latin America and the Caribbean. Mexico, 97.
- Cochrane, M.A. *et al.* (1999). Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. *Science*, 284, 1832–1835.
- Cole, M.M. (1986). *The Savannas: Biogeography and Geobotany*. London: Academic Press, 438.
- Cole, R.J. (2009). "Postdispersal Seed Fate of Tropical Montane Trees in an Agricultural Landscape, Southern Costa Rica". *Biotropica*, 41 (3), 319-327.
- Coleman, T.W y L.K. Rieske. (2006). "Arthropod response to prescription burning at the soil-litter interface in oak-pine forests". *Forest Ecology Management*, 233, 52–60.
- Convention on Biological Diversity, Secretariat of the Convention on Biological Diversity- SCBD,. 2001. *Impacts of human-caused fires on biodiversity and ecosystem functioning, and their causes in tropical, temperate and boreal forest biomes*. Montreal, Canadá: SCBD, 42.
- Converse, S.; Block, W. y White, G. (2006). "Small Mammal Population and Habitat Response to Forest Thinning and Prescribed Fire". *Forest Ecology and Management*, 228, 263-273.
- Coutinho, L.M. (1990) "Fire in the Ecology of the Brazilian Cerrado". In *Fire in the Tropical Biota Ecosystem: Processes and Global Changes* (ed. J. G. Goldammer), Springer-Verlag, Berlin, 82–105.
- Crump, M.L. (1974). *Reproductive strategies in a tropical anuran community*. Kansas: University of Kansas, 69.
- Crump, M.L. (2003). "Conservation of amphibians in the New World tropics". In: *Semlitsch, R.D.* (ed.) *Amphibian Conservation*. Estados Unidos: Smithsonian Institution, 53-69.
- Dale, V.H., *et al.* (2001). "Climate Change and Forest Disturbances". *BioScience*, 51 (9), 723-734.
- Dalling, J.; Swaine, M. y Garwood, N.C. (1997). "Soil seed bank community in seasonally moist lowland tropical forest, Panama". *Journal of Tropical Ecology*, 13 (5), 659-680.
- Davies, S.J. y UNAM (1999). "Smoke-haze from the 1997 Indonesian forest fires: effects on pollution levels, local climate, atmospheric CO₂ concentrations, and tree photosynthesis". *Forest Ecology and Management*, 124: 137-144.
- Dawes-Gromadzki, T.Z. (2007). "Short-term effects of low intensity fire on soil macroinvertebrate assemblages in different vegetation patch types in an Australian tropical savanna". *Austral Ecology*, 332, 663-668.
- DeBano L.F (2000). "The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review". *Journal of Hydrologic*, 231 / 232, 195– 206.
- DeBano, L. F., Savage, S. M. y Hamilton, D. A. (1976). "The transfer of heat and hydrophobic substances during burning". *Soil science society of America journal*, 40, 779-782.
- DeBano, L.; Neary, D.G. y Ffolliott, P.F. (1998). *Fire's effects on ecosystems*. New York: John Wiley & Sons, 333.
- DeBano, L.F y Krammes, J.S. (1966). "Water repellent soils and their relation to wildfire temperatures. International Bulletin of the Association of Hydrological" *Sciences*, 2, 14-19.
- Defler, T.R y Bueno, M.L. (2007). "Aotus Diversity and the Species Problem". *Primate Conservation*, 22, 55–70.
- Del Claro, K. y Torezan-Silingardi, H.M. (2009). "Insect-Plant Interactions: New Pathways to a Better Comprehension of Ecological Communities in Neotropical Savannas". *Neotropical Entomology*, 38 (2), 159-164.
- Dewalt S.J, Schnitzer S.A. y Denslow J.S. (2000). "Density and diversity of lianas along a chronosequence in a central Panamanian lowland forest". *Journal of Tropical Ecology*, 16. 1-9.
- Di Bella. *et al.* (2008). "La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones". *Ecosistemas*, 17 (3), 39-52.
- Dirzo, R. y Miranda, A. (1991). "Altered patterns of herbivory and diversity in the forest understory. A case study of the possible consequences of contemporary defaunation". En P. W. Price. Lewinsohn, G. W. Fernandes, and W. W. Benson (Eds.). *Plants-animal interactions: Evolutionary ecology in tropical and temperate regions*. New York: John Weley, 273-287.
- Dodmer, R.E. y Aquino, R. (2000). "Ecología poblacional de mamíferos en bosques inundables de la Amazonia Peruana". En: E. Cabrera, C. Mercolli & R. Resquin (eds.) *Manejo de Fauna Silvestre en Amazonia y Latinoamérica*. Asunción, Paraguay: Fundación Moisés Bertoni. 153-166.
- Doerr S.H. *et al.* (2006). "Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response". En: *Journal of Hydrology*, 319 (1-4), 295-311.
- Duellman W. y Trueb L. (1994). *"Biology of amphibians"*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 670.
- Duellman, W. E. (1992). "Estrategias reproductoras de las ranas". *Investigación y Ciencia*, Sept, 54-61.
- Dunham, J. *et al.* (2003). "Effects of fire on fish populations: landscape perspectives on persistence of native fishes and nonnative fish invasions". *Forest Ecology and Management*, 178, 183-196.
- Durigan, G.; Ferreira de Siqueira, M. y Daher Correa, G. A. (2007). "Threats to the cerrado remnants of the State of São Paulo". *Brazil. Sci. Agric.* (Piracicaba, Braz.), 64 (4), 355-363.
- Dusha-Gudym. (1996). "The effects of forest fires on the concentration and transport of radionuclides". En J.G. Goldammer & V.V. Furyaev, (eds.) *Fire in ecosystems of boreal Eurasia*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 476-480.
- Engstrom, T. (2010). First-order fire effects on animals: "Review and recommendations". *Fire Ecology*, 6 (1) 115-130.

- Erwin, T.L. (1995). "Measuring arthropod biodiversity in the tropical forest canopy". In: *Forest Canopies*, M. D. Lowman & N. M. Nadkarni (eds). San Diego, CA: Academic Press, 3-26.
- Espinoza-Martínez L.A.; Rodríguez-Trejo, D.A. y Zamudio-Sánchez, F.J. (2008). "Synecology of the *Pinus hartwegii* understory two and three years after prescribed burns". *Agrociencia*, 42, 717-730.
- Farji-Brener, A. G., Corley J. C. & Bettinelli, J. (2002). "The effects of fire on ant communities in north-western Patagonia: the importance of habitat structure and regional context". *Diversity and Distributions*, 8, 235-243.
- Ferreira, A.J. *et al.* (2005). "Temporal patterns of solute loss following wildfires in Central Portugal". *International Journal of Wildland Fire*, 14 (4), 401-412.
- Flannigan, M.D.; Stocks, B.J y Wotton, B.M. (2000). "Climate change and forest fires". *Science of the Total Environment*, 262, 221-229.
- Food y Agriculture Organization. *Manejo del Fuego: principios y acciones estratégicas*. Recuperado el 3 marzo de 2010, de www.fao.org/forestry/site/35853/en.
- Fox, B. (1982). "Fire and Mammalian Secondary Succession in an Australian Coastal Heath". *Ecology*, 63, 1332-1341.
- Fredericksen N., Fredericksen, T. (2000). *Respuesta de la fauna terrestre al aprovechamiento forestal y los incendios en un bosque húmedo tropical en Bolivia*. Doc. Tec. /89/2000. BOLFOR. USAID/BOLIVIA.
- Friend, G. (1999). "Fire and faunal response patterns – a summary of research findings". In: *Management of fire for the conservation of biodiversity – workshop proceedings*. (Eds G. Friend, M. Leonard, A. MacLean and I. Sieler.) 39-45.
- Friend, G.R. (1993). "Impact of fire on small vertebrates in mallee woodlands and heathlands of temperate Australia". *Biological Conservation*, 65, 99-114.
- Friend, G.R. (2004). "Fire impacts on fauna". *The Victorian Naturalist*, 121, 116-121.
- Galindo, J. (2004). "Clasificación de los murciélagos de la región de Los Tuxtlas, Veracruz, respecto a sus respuestas a la fragmentación del hábitat". *Acta Zoológica Mexicana* (nueva serie). 20 (002), 239-243.
- Galvao de Melo, A.C.; Durigan, G. y Romero, M. (2007). "Efeito do fogo o banco de sementes em faixa de borde de Floresta Estacional Semidecidual". SP, Brasil. *Acta Botanica Brasileira*, 21 (4), 927-934.
- García-Corona, R.; Benito, E.; DeBlas, E. y Varela, M.E. (2004). Effects of heating on some soil physical properties related to its hydrological behaviour in two northwestern Spanish soils. *International Journal of Wildland Fire*, 13, 195-199.
- García-Franco, J. y Toledo Aceves. (2008). "Epífitas vasculares: bromelias y orquídeas". En Manson, R.; V. Hernández-Ortiz; S. Gallina; K. Mehltreter (editores). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz*. Instituto Nacional de Ecología, México. 69-83.
- García-Moreno, J. *et al.* (2008). "Una visión del estado de los anfibios críticamente amenazados del norte de Centroamérica y los sitios en los que habitan". *Mesoamericana*, 12 (1), 37-40.
- García-Núñez C. y Azócar, A. (2004). "Ecología de la regeneración de árboles de la sabana". *Ecotropicos*, 17 (1-2), 1-24.
- Getzin, S. (2002). *Formation and Consequences of Fire-Induced Structures in Tropical and Sub-Tropical savannas*. Germany: Institute for Biochemistry and Biology University of Potsdam.
- Gibbons, J.W. *et al.* (2000). "The global decline of reptiles, déjà vu amphibians". *Bioscience*, 50, 653-666.
- Giovannini G, and Lucchesi S. (1983). "Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates". *Soil Science*, 136, 231-236.
- Glor, R. E; *et al.* (2001). "Lizard diversity and agricultural disturbance in a Caribbean forest landscape". *Biodiversity and Conservation*, 10, 711-723.
- Goin, C., Goin, O. y Zug, G. (1978). *Introduction to Herpetology*. San Francisco, USA: W.H. Freeman and Company, 378.
- González G., y Seastedt, T.R. (2001). "Soil fauna and plant litter decomposition in tropical and subalpine forests". *Ecology*, 82, 955-964.
- González-Pérez, J.A., González-Vila, F.J., Almendros, G. y Knicker, H. (2004). "The effect of fire on soil organic matter-a review". *Environment International*, 30, 855-870.
- Gorresen, P. M. y Willig, M.R. (2004). "Landscape responses of bats to habitat fragmentation in Atlantic Forest of Paraguay". *Journal of Mammal*, 85, 688-697.
- Gorresen, P.M., Willig, M.R. y Strauss, R.E. (2005). "Multivariate analysis of scale-dependent associations between bats and landscape structure". *Ecology Applications*, 15, 2126-2136.
- Green, K. y Sanecki, G. (2006). "Immediate and short term responses of bird and mammal assemblages to a subalpine wildfire in the Snowy Mountains, Australia". *Austral Ecology*, 31, 673-681.
- Greenland, D.J. (1995). "Land use and soil carbon in different agroecological zones". En Haug, R. T. 1993. *The practical handbook of compost engineering*.
- Gresswell, R. (1999). "Fire and aquatic ecosystems in forested biomes of North America". *Trns. Am. Fisheries Soc*, 128, 193-221.
- Guhl, E. (1975). *Colombia: Bosquejo de su geografía tropical*. Tomo 1. Instituto Colombiano de Cultura. Biblioteca Básica Colombiana. Bogotá. Imprenta Nacional de Colombia, 286.
- Gutsell, S.L. y Johnson, E.A. (1996). "How fire scars are formed: coupling a disturbance process to its ecological effect". *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 166-174.
- Haltenhoff, H. (1998). "El impacto del fuego sobre el medio ambiente". Corporación Nacional Forestal, Gerencia de Operaciones, Unidad de Gestión Manejo del Fuego. CONAF, Gobierno de Chile. 1998.

- Hardesty, J., Myers, R.L. y Fulks, W. (2005). "Fire, ecosystems, and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue". *The George Wright Forum*, 22, 78-87.
- Hart, S. (1998). "Beetle mania: an attraction to fire". *BioScience*, 48, 3-5.
- Haugaasen, T., Barlow, J. y Pérez, C. A. (2003). "Surface wildfires in central Amazonia: Short-term impact on forest structure and carbon loss". *Forest Ecology and Management*, 179, 321-331.
- Hellmann, J.J., Byers, J.E., Bierwagen, B.G. y Dukes, J.S. (2008). "Five potential consequences of climate change for invasive species". *Conservation Biology*, 22 (3), 534-543.
- Hernandez-Ortiz, V. y Dzúl-Cauich, J.F. (2008). "Moscas (*Insecta: Diptera*). Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz". En: Manson, R.; V. Hernández-Ortiz; S. Gallina; K. Mehltreter (ed). *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz. Biodiversidad y Conservación*. México.
- Herrando, S., Brotons, L. & Llacuna, S. (2003). *Does fire increase the spatial heterogeneity of bird communities in Mediterranean landscape*. *Ibis*, 145, 307-317.
- Hoffmann, W.A. (1996). "The effects of fire and cover on seedling establishment in neotropical savanna". *Journal of Ecology*, 84, 383-393.
- Hoffmann, W.A. (1998). "Post-burn reproduction of woody plants in a neotropical savanna: the relative importance of sexual and vegetative reproduction". *Journal of Applied Ecology*, 35, 422-433.
- Holdsworth, A.R y Uhl, C. (1997). "Fire in Amazonian selectively logged rain forest and the potential for fire reduction". *Ecology Apply*, 7, 713 – 725.
- Holliday, N.J. (1992). "The carabid fauna (Coleoptera: Carabidae) during postfire regeneration of boreal forest: properties and dynamics of species assemblages". *Can. J. Zool*, 70 (3), 440-452.
- Hudson, J., et al. (1983). "Prescribed burning of Pinus oocarpa in Honduras II. Effects on nutrient cycling". *Forest Ecology and Management*, 5, 283-300.
- Hutto, R.L. (1995). "Composition of bird communities following stand-replacement fires in northern Rocky Mountain conifer forests". *Conservation Biology*, 9, 1041-1058.
- Hutto, R.L. et al. (2008). "What constitutes a natural fire regime? Insight from the ecology and distribution of coniferous forest birds in North America". *Fire Ecology*, 4 (2), 115-132.
- Ice, G. G., Neary, D.G. y Adams, P.W. (2004). "Effects of Wildfire on Soils and Watershed Processes". *Journal of Forestry*, 102 (6), 16-20.
- Janzen, D. (1967). "Synchronization of sexual reproduction of trees within dry season in Central América". *Evolution*, 21, 620-637.
- Janzen, D. (1971). "Seed predation by animals". *Annual Review Ecology Systems*, 2, 465-492.
- Jiménez, E., Lozano-Zambrano, F. y Álvarez-Saa, G. (2008). "Diversidad alfa y beta de hormigas cazadoras del suelo en tres paisajes ganaderos de los andes centrales de Colombia". En: *Book on Ants of Colombia*.
- Johns, A.D. (1991). "Responses of Amazonian rain-forest birds to habitat modification". *Journal of Tropical Ecology*, 7, 417-437.
- Kauffman J.B. (1991). "Survival by sprouting following fire in tropical forests of the eastern Amazon". *Biotropica*, 23, 219-224.
- Keller, L. & Heske, E. (2000). "Habitat Use by Three species of Snakes at the Middle Fork Fish and Wildlife area Illinois". *Journal of Herpetology*, 34, 558-564.
- Kennard, D.K., Gould, K., Putz, F.E., Fredericksen, T.S. y Morales, F. (2002). "Effects of disturbance intensity on regeneration mechanisms in a tropical dry forest". *Forest Ecology and Management*, 162, 197-208.
- Kinnaird, M.F y O'Brien, T.G. (1998). "Ecological effects of wildfire on lowland rainforest in Sumatra". *Conservation Biology*, 12 (5), 954-956.
- Kolbin, V. (2008). "Effect of Forest Fires on the Avifauna of the Northern Amur Region". *Russian Journal of Ecology*, 39 (6), 398-404.
- Koproski, L., Mangini, P.R., Pachaly, J.R., Soares, R.V. y Batista, A.C. (2006). "Fire effects on reptiles and mammals in Ilha Grande National Park (PR/MS), Brazil". *Forest Ecology and Management*, 234S, S180.
- Kotliar, N. B., Heijl, S.J., Hutto, R.L., Saab, V.A., Melcher, C. P. y McFadzen, M. (2002). "Effects of fire and post-fire salvage logging on avian communities in conifer-dominated forests of the western United States". *Studies in Avian Biology*, 25, 49-64.
- Kromer, T., Gradstein, R.S. y Acebey, A. (2007). "Diversidad y ecología de epífitas vasculares en bosques montanos primarios y secundarios de Bolivia". *Ecología en Bolivia*, 42 (1), 23-33.
- Labouriau, L.G., Marques Valio, I.F. y Heringer, E.P. (1964). "Sobre o sistema reproductivo de plantas dos Cerrados". *Anales de la Academia Brasileira de Ciências*, 36, 449-464.
- Landsberg, J.D. (1997). "El fuego y los bosques: el fuego puede ser un buen criado o un mal amo". (cap. 6) XI Congreso Forestal Mundial. Antalya: FAO.
- Langlands, P.R., Brennan, K.E.C. y Pearson, D.J. (2006). "Spiders, spinifex, rainfall and fire: long-term changes in an arid spider assemblage". *Journal of arid environments*, 67002C 36-59.
- Laurance, W.F., Pérez-Salicrup, D., Delamonica, P., Fearnside, P., D'Angelo, S., Jerozolinski, A., Pohl, L. y Lovejoy, T. (2001). "Rain forest fragmentation and the structure of Amazonian liana communities". *Ecology*, 82, 105-116.
- Lavabre, J., Sempere, D. y Cernesson, F. (1993). "Changes in the hydrological response of a small mediterranean basin a year after a wildfire". *Journal of Hydrology*, 142, 273-299.
- Lavelle, P. (1997). "Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that

- determine ecosystem function". *Adv. Ecol. Res.*, 27, 93–132.
- Lehtinen, R.J., Ramanamanjato, J.B. y Raveloarison, J.G. (2003). "Edge effects and extinction proneness in a herpetofauna from Madagascar". *Biodiversity and Conservation*, 12, 1357–1370.
- Letnic, M. *et al.* (2004). "The responses of small mammals and lizard to post-fire succession and rainfall in arid Australia". *Journal of Arid Environments*, 59, 85–114.
- Levine, J.S. (ed.). (1996a). *"Biomass Burning and Global Change I: Remote Sensing, Moedling and Inventory Development, and Biomass Burning in Africa"*. Massachusetts The MIT Press, I, 551.
- Levine. (1991). *Global Biomass Burning. Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*. Massachusetts: The Mit Press, 569.
- Levine. (1996b). *Biomass Burning and Global Change II: Biomass Burning in South America, Southeast Asia, and Temperate and Boreal Ecosystems, and Oil Fires of Kuwait*. Massachusetts: The MIT Press, II, 902.
- Lips, K.R., Reeve J.D. y Witters, L.R. (2003). "Ecological traits predicting amphibian population declines in Central America". *Conservation Biology*, 17, 1078–1088.
- Lizana, M. & Pedraza, E.M. (1998). "The effect of UV-radiation on toad mortality in mountainous areas of central Spain". *Conservation Biology*, 12 (3), 703–707.
- Long, A.J. (2006). *Benefits of prescribed burning*. For 70. Florida Corporative Extension Service. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida.
- López R., Pérez, A. y Batalla, R.J. (2004). "Efectos de un incendio forestal sobre la respuesta hidrológica de la cuenca mediterránea de Arbúcies (cordilleras costeras catalana, NE España)". *Investigación Agraria: Sistemas Recursos Forestales*, 13 (2), 305–316.
- Low, T. (2008). *Climate Change and Invasive Species: A review of interactions*. Biological Diversity Advisory Committee. Commonwealth of Australia. 2008. Workshop report November 2006. Australia, 30.
- Lyon, J., Huff, M.H. y Smith, J.K. (2000a). *Fire Effects on Fauna at Landscape Scales*. In Smith, J.K., 2000 (ed). *Wildland Fire in Ecosystems. Effects of Fire on Fauna*. Smith, J. Kapler (ed). 2000. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 1. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 90.
- Lyon, J.J., Telfer, E.S. y Schreiner, D.S. (2000b). "Direct Effects of Fire and Animal Responses". En Smith, Jane Kapler (editor). *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on fauna*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 1. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 17–23.
- Main, M. y Tanner, G. (2009). *Efectos del fuego en la vida silvestre de Florida y su hábitat*. Publicación técnica WEC137S, Departamento de Wildlife Ecology and Conservation, Servicio de Extensión Cooperativa de la Florida, Instituto de Alimentos y Ciencias Agrícolas, Universidad de la Florida. (UF/IUFAS). Florida. <http://edis.ifas.ufl.edu>.
- Manning, J.A. y Edge, W.D. (2004). "Small mammal survival and downed wood at multiple scales in managed forests". *J. Mamm.*, 85, 87–96.
- Manso-Jiménez, R.W. (2000). *Emisiones de gases y partículas producto de los incendios forestales en Cuba entre 1989 y 1999*. Centro de Contaminación y Química Atmosférica. I. Meteorología. CITMA. 2000. Recuperado 13 de marzo de 2010. http://www.produccionbovina.com/incendios_y_uso_del_fuego/.
- Marod, D., Kutintara, U., Tanaka, H. y Nakashizuka, T. (2002). "The effects of drought and fire on seed and seedling dynamics in a tropical seasonal forest in Thailand". *Plant Ecology*, 161, (1), 41–57.
- Mason, D. (1996). "Responses of Venezuelan understory birds to selective logging, enrichment strips, and vine cutting". *Biotropica*, 28, 296–309.
- Mataix-Solera, J. (1999). *Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos afectados por incendios forestales. Contribución a su conservación y regeneración*. Tesis doctoral, Universidad de Alicante (España), 330.
- Mataix-Solera, J., Gómez, I., Navarro-Pedreño, J., Guerrero, C. y Moral, R. (2002). "Soil organic matter and aggregates affected by wildfire in *Pinus halepensis* forest in a Mediterranean environment". *International Journal of Wildland Fire* 11, 107–114.
- McIntyre, N. (1995). "Effects on forest patch size on avian diversity". *Landscape Ecology*, 10, 85–99.
- Medina, E. y Silva, J.F. (1990). "Savannas of northern South America: a steady state regulated by water-fire interactions on a background of low nutrient availability". *Journal Biogeography*, 17, 403–413.
- Mendelson III, J.R *et al.* (2006). "Confronting amphibian declines and extinctions". *Science*, 313, 48.
- Mendoza, E. y Dirzo, R. (2007). "Seed-size variation determines interspecific differential predation by mammals in a neotropical rain forest". *Oikos*, 2007. 116 (1), 1841–1852.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. *Colombia Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Bogotá D. C.: IDEAM. 271.
- Minshall, G. W., Brock, J.T. y Varley, J.D. (1989). "Wildfires and Yellowstone's stream ecosystems". *BioScience*, 39, 707–715.
- Moir, M.L., Brennan, K. y Wittkuhn, R.S. (2006). "Fire refugia: The mechanism governing animal survivorship in a highly flammable understorey plant". *Forest Ecology and Management*, 234S, S166.
- Morales, J. *et al.* (2007). "Incidencia negativa de los incendios forestales sobre una población de *Náyade margaritifera* L. (Bivalvia: Unionoida) en el río Negro (Zamora)". *Ecología* (España), 21, 91–106.
- Moretti, M., Conedera, M., Duelli, P. y Edwards, P.J. (2002). "The effects of wil-

- dfire on ground-active spiders in deciduous forests on the Swiss southern slope of the Alps". *Journal of Applied Ecology*, 39, 321–336.
- Muller-Landau, H. *et al.* (2010). "Forest plots, climate change and the global carbon cycle: Linking forest structure and composition to carbon pools and fluxes". In: *Taking Stock HSBC climate Partnership Research*. Panama, Republic of Panama: Smithsonian Tropical Research Institute, 2010.
- Muller-Landau, H.C. (2007). "Predicting the Long-Term Effects of Hunting on Plant Species Composition and Diversity in Tropical Forests". *Biotropica*, 39 (3), 372-384.
- Myers, R.L. (2005). *Incendios y Ecosistemas: un enfoque integral del manejo del fuego en América Latina y el Caribe*. Recuperado el 17 de diciembre de 2009 de <http://www.imacmexico.org/>.
- Nabe-Nielsen, J. & Hall, P. (2002). "Environmentally induced clonal reproduction and life history traits of the liana *Machaerium cuspidatum* in an Amazonian rain forest". Ecuador. *Plant Ecology*, 162 (2), 215-226.
- Nasi, R., Dennis, R., Meijaard, E., Applegate, G. y Moore, P. (2002). "Los Incendios forestales y la diversidad biológica". Revista. *Unasylva*, 209.
- Neary, D.G., Ryan, K.C. y DeBano, L.E. (2004). RMRS-GTR-42, Volume 4: *Wildland fire in ecosystems: effects on soil and water*. Recuperado el 25 de noviembre de 2009, de http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr042_4.html.
- Nepstad, D.C. *et al.* (2001). "Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests". *Forest ecology and management*, 154, 395–407.
- Nepstad, D.C., Moreira, A.G. y Alencar, A. (1999). "Flames in the rain forest: origins, impacts and alternatives to Amazonian fire (cap. 5)". In: *Origins, Impacts and Alternatives to Amazonian Fire*. edited by W. Bank and Ppg-7, University of Brasília Press, Brasília, Brazil.
- Nigel, M. *et al* (1997). "Does mammal community composition control recruitment In neotropical forests? Evidence from Panama". *Ecology*, 78 (3), 941–946.
- Niwa, C.G. y Peck, R.W. (2002). "Influence of prescribed fire on carabid beetle (Carabidae) and spider (Araneae) assemblages in forest litter in southwestern Oregon". *Environ. Entomol*, 31 (5), 785–796.
- Noble, J.C., Muller, W.J., Detling, J.K., y Pfizner. (2007). "Landscape ecology of the burrowing bettong: warren distribution nad pathc dynamics in semiarid eastern Australia". *Austral Ecology*, 32, 326-337.
- Nordoto, G.B., Bustamante, M.M. (2003). *Effects of fire on soil nitrogen dynamics and microbial biomasa in Savannas of Central Brasil*. Pesc. Agropec. Bras., 8: 955-962.
- Oliveira, P.E. y Silva, J.C. (1993). "Reproductive biology of two species of *Kielmeyera* (Guttiferae) in the Cerrados of Central Brazil". *Journal of Tropical Ecology*, 9, 67-79.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1980). *Ecosistemas de los bosques tropicales: informe sobre el estado de conocimiento*. Madrid: Altamira Industria Gráfica.
- Organización Internacional de Maderas Tropicales -OIMT. *Directrices de la OIMT sobre el manejo de incendios en los bosques tropicales. Serie OIMT de políticas forestales*, 6. 1997. Recuperado el 6 de junio de 2010, de <http://www.itto.int/es/feature06/>.
- Pacheco, T. (2009). *Las perturbaciones naturales en los ecosistemas forestales, Silabo de Ecología Vegetal*. Recuperado el 10 diciembre de 2010, de <http://www.uhu.es/03016/pagina03016/apuntes/perturb.PDF>.
- Paine, C.E.T. y Beck, H. (2007). "Seed predation by neotropical rain forest mammals increases diversity in seedling recruitment". *Ecology*, 88 (12), 3076-3087.
- Pefaur, J.E. y Duellman, W.E. (1980). "Community structure in high Andean herpetofaunas". *Transactions of the Kansas Academy of Sciences*, 83 (2), 45-65.
- Pérez, C.A. (1999). "Ground fires as agents of mortality in a central Amazonian forest". *Journal of Tropical Ecology*, 15, 535–541.
- Pérez, C.A., Barlow, J. y Hougaaen, T. (2003). "Vertebrate responses to surface fires in a central Amazonian Forest". *Horyx*, 37, 97-109.
- Pérez, C.A., López, J. y Vela, G. (2009). "Influencia del relieve en las propiedades de un suelo afectado por incendio en el volcán El Pelado, Centro de México". *Investigaciones Geográficas* (UNAM), Núm. 69: 7-20.
- Pérez, E.H. y Santiago E.T. (2001). "Dinámica estacional del banco de semillas en una sabana en los Llanos Centro-Orientales de Venezuela". *Biotropica*, 33, 435-446.
- Petit, L.J. *et al.* (1999). "Bird communities of natural and modified habitats in Panama". *Ecography*, 22, 292-304.
- Pierson, F.B., Carlson, D.H. y Spaethe, K.E. (2002). "Impacts of Wildfire on soil hydrological properties of steep sagebrush-steppe rangeland". *International Journal of Wildland Fire*, 11, 145-151.
- Pinard, M. y Huffman, J. (1997). "Fire resistance and bark properties of trees in a seasonally dry forest in Eastern Bolivia". *Journal of Tropical Ecology*, 13, 727-740.
- Pinard, M., Putz, F. y Licona, J. (1999). "Tree mortality and vine proliferation following a wildfire in a subhumid tropical forest in eastern Bolivia". *Forest Ecology and Management*, 116, 247-252.
- Platt, W.J., y Connell, J.H. (2003). "Natural disturbances and directional replacement of species". *Ecological Monographs*, 73:507-522.
- Polis, G.A., Hurd, S.D., Jackson, C.T. y Sánchez-Pinero, F., (1998). "Multifactor population limitation: variable spatial and

- temporal control of spiders on Gulf of California islands". *Ecology*, 79, 490-502.
- Pons, P., (2006). "Consecuencias de los incendios forestales sobre los vertebrados y aspectos de su gestión en regiones mediterráneas. En: Conservación de la biodiversidad y gestión forestal: su aplicación en la fauna vertebrada. Barcelona: Universidad de Barcelona, 229-245.
- Pons, P., Lambert, B., Rigolot, E. & Prodon, R. (2003). "The effects of grassland Management using fire on habitat occupancy and conservation of birds at a mosaic landscape". *Biodiversity and Conservation*, 12, 1843-1860.
- Prieto, C. y Dahners, H.W. (2006). "Eumaeini (Lepidoptera: Lycaenidae) del cerro San Antonio: Dinámica de la riqueza y comportamiento de *Hilltopping*". *Revista Colombiana de Entomología*, 32 (2), 179-190.
- Prior, K. & Weatherhead, P. (1996). "Habitat Features of Black Rat Snake *Hibernacula* in Ontario". *Journal of Herpetology*, 30, 211-218.
- Prodon, R. (1987). "Fire, Bird Conservation and Land Management in the North-Mediterranean Area". *Ecol. Mediterr*, 13 (4), 129-133.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2007). *Perspectivas del medio ambiente mundial GEO 4, medio ambiente para el desarrollo*. Recuperado el 3 de marzo de 2009, de [Http://www.unep.org/geo/geo4/report/geo-4_report_full_es.pdf](http://www.unep.org/geo/geo4/report/geo-4_report_full_es.pdf).
- Putz, F.E. (1984a). "The natural history of lianas on Barro Colorado Island, Panama". *Ecology*, 65, 1713-1724.
- Putz, F.E. (1984b). "How trees avoid and shed lianas". *Biotropica*, 16, 19-23.
- Quesada M., Stoner, K.E., Lobo, J.A., Herrerías-Diego., Palacios-Guevara, C., Murguía-Rosas, M.A. and O.-Salazar, K.A. (2004). "Effects of forest fragmentation on pollinator activity and consequences for plant reproductive success and mating patterns in bat pollinated *bombacaceous trees*". *Biotropica*, 36, 131-138.
- Quinn, R.D. (1979). "Effects of fire on small mammals in the chaparral". *Cal-Neva Wildlife Transactions*, 125-133.
- Raison R.J. (1979). "Modifications of the soil environment by vegetation fires, with particular reference to nitrogen transformations: a review". *Plant Soil*, 51, 73-108.
- Ramírez, M., Pérez, B. y Orozco, A.D. (2007). "Helechos invasores y sucesión secundaria post-fuego". *Ciencias*, 85, 18-25.
- Raphael, M.G., Morrison, M.L. y Yoder-Williams, M.P. (1987). "Breeding bird populations during twenty-five years of postfire succession in the Sierra Nevada". *Condor*, 89, 614-626.
- Redford, K.H. (1992). "The empty forest". *Bioscience*, 42, 412-423.
- Reed, C.C. (1997). "Responses of prairie insects and other arthropods to prescription burns". *Natural Areas Journal*, 17, 380-385.
- Reilly, P. (1991) "The effect of wildfire on bird populations in a Victorian coastal habitat" *Emu*, 91, 100-106.
- Renjifo, L.M. (1999). "Composition changes in a subandean avifauna after long-term forest fragmentation". *Conservation Biology*, 13, 1124-1139.
- Revilla, C. y Calderón, A. (2006). "Estructura y diversidad de lianas y hemiepipítas de la selva baja de la Provincia de Oxapampa - Pasco, Perú". *Ecología Aplicada*, 5 (1,2), 9-21.
- Richter, D.D., Ralston, C.W. y Harms, R. (1982). "Prescribed fire: effects on water quality and forest nutrient cycling". *Science*, 215, 661-663.
- Rieman, B. y Clayton, J. (1997b). "Wildfire and Native Fish: Issues of Forest Health and Conservation of Sensitive Species. American Fisheries Society". *Online Journals*. 22 (11): 22-25.
- Rieman, B.E. y Clayton, J.L. (1997a) "Fire and fish issues of forest health and conservation of native fishes". *Fisheries*, 22 (11), 6-15.
- Rodríguez, L.E., Silva, A.S., Paulo, A.A. y Grande, M.T. (2005). "Effects of thèse of sown seed on growth and yield of common bean cultivars of different seed sizes". *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17 (3), 273-281.
- Rodríguez, R., Torres, R., Matthes, L. y Penha, A. (2004). "Tree Species Sprouting from Root Buds in a Semideciduous Forest Affected by Fire". *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 47 (1), 127-133.
- Rodríguez, J. M., Estrabou, C., Fenoglio, R., Robbiati, F., Salas, M. C y Quiroga, G. (2009). "Recuperación post-fuego de la comunidad de líquenes epífitos en la provincia de Córdoba, Argentina". *Acta Botánica Brasileira*, 23 (3), 854-859.
- Rodríguez, P. y Arita, H.T. (2005). "La diversidad beta como un elemento integrador de distintos patrones macroecológicos". En: *Sobre Diversidad Biológica: el Significado de las Diversidades Alfa, Beta y Gamma*.
- Roldán, A.L. y Simonetti, J.A. (2001). "Plant-mammal interactions in tropical Bolivian forest with different hunting pressures". *Conservation biology*, 15, 617-623.
- Russell, K.R., Van Lear, D.H. y Guynn, D.C. (1999). "Prescribed fire effects on herpetofauna: review and management implications". *Wildlife Society Bulletin*, 27, 374-384.
- Saab, V. y Powell, H. (eds). (2005). "Fire and avian ecology in North America". *Studies in Avian Biology*, 30, 1-193.
- Sánchez, P. (1981). *Suelos del trópico*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA., San José, Costa Rica. 634.
- Santos, J.C., Delabie, J.H. y Fernández, G. (2008). "A 15-years post evaluation of the fire effects on ant community in an area of Amazonian forest". *Revista Brasileira de Entomología*, 52 (1), 82-87.
- Savage S.M. (1974). "Mechanism of fire-induced water repellency in soil". *Soil Sci. Soc Am Proc.*, 38, 652-7.
- Schulte, L.A. y Niemi, G.J. (1998). "Bird communities of early-successional burned

- and logged forest". *Journal of Wildlife Management*, 62, 1418-1429.
- Schwela, D. *et al.* (1999). "Contaminación del aire causada por los incendios de vegetación y la salud". En: OMS (eds.). *Guías de salud para incendios de vegetación: documento de orientación*. Lima: OMS, 50.
- Schwilk, D.W. (2006). "Tree mortality from fire and bark beetles following early and late season prescribed fires in Sierra Nevada mixed-conifer forest". *Forest Ecology and Management*, 232, 36-45.
- Scott, D.F. (1993). "The hydrological effects of fire in South African mountain catchments". *Journal of Hydrology*, 150, 409-432.
- Semlitch, R.D. (2003). *Amphibian Conservation*. USA: Smithsonian Institution Press.
- Sempere, D., Urbano, A., Lavabre, J. y Dolz, J. (1994). "Consecuencias hidrológicas de los incendios forestales". *Ingeniería del Agua*, Vol. 1 (4): 33-48.
- Shakesby y Doerr, S.H. (2006). "Wildfire as a hydrological and geomorphological agent". *Earth-Science Reviews*, 74 (3-4), 269-307.
- Shakesby, R.A. *et al.* (1996). "Limiting the soil degradational impacts of wildfire in pine and eucalyptus forests in Portugal: a comparison of alternative post-fire management practices". *Applied Geography*, 16 (4), 337-355.
- Silva, J.F., Raventos, J. y Caswell, H. (1990). "Fire and Fire exclusión effects on the growth and survival of two savanna grasses". *Acta Oecologica*, 11 (6), 783-800.
- Silva, J.M.C. y Bates, J.M. (2002). "Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: a tropical savanna hotspot". *Bioscience*, 52, 225-233.
- Silveira, L. *et al.* (1999). "Impact of wildfires on the megafauna of Emas National Park, central Brazil". *Oryx*, 33 (2), 108-114.
- Smith, L.J., Holycross, A.T., Painter, C.W. y Douglas, M.E. (2001). "Montane rattlesnakes and prescribed fire". *Southwestern Naturalist*, 46, 54-61.
- Smith, S.D., *et al.* (2000). "Elevated CO₂ increases productivity and invasive species success in an arid ecosystem". *Nature*, 408, 79.
- Smucker, K. M., Hutto, R.L. y Steele, B.M. (2005). "Changes in bird abundance after wildfire: importance of fire severity and time since fire". *Ecological Applications*, 15 (5), 1535-1549.
- Smythe, N. (1970). "Relaciones entre las épocas de abundancia de frutos y los métodos de dispersión de las semillas en un bosque neotropical". En: De Alba, G. y R.W. Rubinoff (eds), *La evolución en los trópicos*. Smithsonian Tropical Research Institute y Editora Universitaria. Panamá: Smithsonian.
- Solbrig, O.T. (1996) "The diversity of the savanna ecosystem". En: Solbrig OT, Medina E, Silva J (Eds.) *Biodiversity and savanna ecosystem processes: a global perspective*. Ecological Studies Vol. 121. Springer. Berlín, Alemania, 1-27.
- Soto, B. y Díaz-Fierros F. (1990). *Heat-induced degradation processes in forest soils*. Proc. Inter. Conf. Forest Fire Res. C.04: 1-10. Coimbra. Portugal.
- Spencer, C.N. y Hauer, F.R. (1991). "Phosphorus and nitrogen dynamics in streams during a wildfire". *Journal of the North American Bantological Society*, 10 (24), 30.
- Springett, J.A. (1976). *The effect of prescribed burning on the soil fauna and on litter decomposition in Western Australian forests*. Aust J Ecol, 1: 77-82.
- Stevens, M. (2008). *Severe landscape scale wildfire, quantifying the impact to fauna*. (Deakin University B. Env. Sc. (Hons) literature review: Melbourne). Unpublished, 19.
- Stohlgren, T.J., Otsuki, Y., Villa, C.A., Lee, M. & Belnap, J. (2001). Patterns of plant invasions: a case example in native species hotspots and rare habitats. *Biological Invasions*, 3 (1) 37-50.
- Stork, N.E., Didham, R.K. & Adis, J. (1997). Canopy arthropod studies for the future. In: *Canopy Arthropods* (eds). N. E. Stork, J. Adis & R. K. Didham. London: Chapman & Hall, 551-561.
- Suazo-Ortuño, I., Alvarado-Díaz, J. y Martínez-Ramos, M. (2008). Effects of conversion of dry tropical forest to agricultural mosaic on herpetofaunal assemblages. *Conservation Biology*, 22, 362-374.
- Tabarelli, M., Cardoso, J.M. y Gascon, C. (2004). "Forest fragmentation, synergisms and the impoverishment of neotropical forests". *Biodiversity and Conservation*, 13, 1419-1425.
- Temporetti, P. (2006). "Efecto a largo plazo de los incendios forestales en la calidad del agua de dos arroyos en la sub-región Andino-Patagónica, Argentina". *Ecología Austral*, 16, 157-166.
- Terborgh, J. (1992). "Maintenance of diversity in tropical forests". *Biotropica*. 24 (2b), 283-292.
- Terborgh, J. y Wright, S.J. (1994). "Effects of mammalian herbivores on seedling recruitment and survivorship in two neotropical forests". *Ecology*, 75, 1829-1833.
- Terradas, J. (2001). *Ecología de la vegetación. De la eco fisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes*. Barcelona: Ediciones Omega, 703.
- Tessler, N. *et al.* (2008). "Effects and short-term changes in soil water repellency-mt carmel, Israel" *Catena*, 74, 185-191.
- The Nature Conservancy, World Wide Foundation. Union International para la Conservación de la Naturaleza. (2004). *El Fuego, los Ecosistemas y la Gente: una evaluación preliminar del fuego como un tema global de conservación*. Recuperado el 25 de enero de 2010, de <http://nature.org/initiatives/fire/science>.
- Thiollay, J.M. (1992). "Influence of selective logging on bird species diversity in a Guianan Rain Forest". *Conservation Biology*, 6 (1), 47-63.
- Thiollay. (1994). "Structure, density and rarity in an Amazonian rain-forest bird community". *Journal of Tropical Ecology*, 10, 449-481.

- Thiollay. (1999). "Responses of an avian community to rain forest degradation". *Biodiversity and Conservation*, 8, 513-534.
- Tiedemann, A.R. *et al.* (1979). *Effects of fire on water*. U.S. Department of Agriculture Forest Service. General Technical Report WO-10, 28.
- Torre, I. y Díaz, M. (2004). "Small mammal abundance in Mediterranean post-fire habitats: a role for predators?" *Acta Oecologica*, 25, 137-143.
- Trujillo, R.E. (2009). *Impacto del cambio de uso del suelo sobre la diversidad de alacranes (Arachnida: Scorpiones) en el monte espinoso de la cuenca del río Motagua*. Tesis de grado Biología, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Turner, M.G., Romme, W.H. y Tinker, D.B. (2003). "Sur-prises and lessons from the 1988 Yellowstone fires". *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1:351-358.
- Uetz, G.W. (1991). "Habitat structure and spider foraging". In Bell, S, McCoy, E. Mushinsky H. (eds) *Habitat structure: The physical arrangement of objects in space*. Chapman y Hall. London.
- Uhl, C. y Kauffman, J.B. (1990). "Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon". *Ecology*, 71, 437-449.
- Uhl, C., Clark, H. y Clark, P. (1981). "Early plant succession after cutting and burning in the upper río Negro región of Amazonas Basin". *Journal of Ecology*, 69, 631-649.
- Urbina-Cardona y Reynoso, V.H. (2005). "Recambio de anfibios y reptiles en el gradiente potrero-borde-interior en la Reserva de Los Tuxtlas, Veracruz, México". (cap. 15). En: Halffter, G; J. Soberón, P. Koleff & A. Melic (eds.) *Sobre Diversidad Biológica: El significado de las Diversidades Alfa, Beta y Gamma*. CONABIO, Sea, Diversitas & CONACYT. Volumen 4. Zaragoza, España: Editorial Monografías Tercer Milenio, p. 191-207.
- Urbina-Cardona, J.N. y Londoño-Murcia, M.C. (2003). "Distribución de la comunidad de herpetofauna asociada a cuatro áreas con diferente grado de perturbación en la isla de Gorgona, Pacífico colombiano". *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, 102, 105-113.
- Urbina-Cardona, J.N., Londoño-Murcia, M.C. y García-Ávila, D.G. (2008). "Dinámica espacio-temporal en la diversidad de serpientes en cuatro hábitats con diferente grado de perturbación antropogénica en el Parque Nacional Natural Isla Gorgona, pacífico colombiano". *Caldasia*, 30 (2), 479-493.
- Urbina-Cardona, Olivares-Pérez, M. y Reynoso, V.H. (2006). "Herpetofauna diversity and microenvironment correlates across the pasture-edge-interior gradient in tropical rainforest fragments in the region of Los Tuxtlas, Veracruz". *Biological Conservation*, 132, 61-75.
- Van Breugel, M. (2010). "Variation of carbon stocks across different land-use types in a tropical rural landscape". In: *Taking Stock HSBC climate Partnership Research*. 2010. Smithsonian Tropical Research Institute, Panama, Republic of Panama.
- Van Der Hammen, T., Pabón-Caicedo, J.D. y Gutiérrez & Alarcón, J.C. (2002). El cambio global y los ecosistemas de alta montaña. (Castaño Uribe, C. (ed.), *Páramos y ecosistemas alto-andinos de Colombia en condición hotspot y global climatic tensor*. Bogota D.C.: Minambiente.
- Van der Pijl, L. (1972). *Principles of dispersal in higher plants*. Berlin: Springer-Verlag, 161.
- Verdade, Luciano M. *et al.* (2009). Middle-sized carnivores (mammalia: carnivora) in agricultural landscapes of mediterranean Europe and Southeastern South America: mesopredators release or increased carrying capacity. In *International Mammalogical Congress*. Mendoza, Argentina.
- Vieira, E.M. (1999). "Small mammal communities and fire in the Brazilian Cerrado". *Journal of Zoology*, 249, 75-81.
- Vieira, E.M. y Marinho-Filho, J.S. (1998). "Pre- and post-fire habitat utilization by rodents of Cerrado from central Brazil". *Biotropica*, 30:491-496.
- Villard, M., Trzcinski, M.K. y Merriam, G. (1999). "Fragmentation effects on forest birds: relative influence of woodland cover and configuration on landscape occupancy". *Conservation and Biology*, 13, 774-783.
- Vitt, L.J., y Caldwell, J.P. (1994). "Resource utilization and guild structure of small vertebrates in the Amazon forest leaf litter". *B Journal of Zoology*, 234, 463-476.
- Walter, M. (1997) "The effect of Fire on Fauna in the Australian Alps National Parks: A Review". A report to the Australian Alps Liaison Committee.
- Wells, K. *et al.* (2009). "Seed consumption by small mammals from Borneo". *Journal of Tropical Ecology*, 25 (5), 555-558.
- Whelan, R. (1995). *The ecology of fire*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Whelan, R.J., Rodgerson, L., Dickman, C.R. y Sutherland, E.F. (2002). "Critical life processes of plants and animals: developing a process-based understanding of population changes in fire-prone landscapes", 94-124 in: R.A. Bradstock, J.E. Williams, y A.M. Gill, editors. *Flammable Australia: the fire regimes and biodiversity of a continent*. Cambridge University Press, United Kingdom.
- White, A.T., Vogt, H.P. and Arin, T. (2000). "Philippine coral reefs under threat: The economic losses caused by reef destruction". *Marine Pollution Bulletin*, 40, 598-605.
- Whitfield, S. *et al.* (2007). *Amphibian and reptile declines over 35 years at La Selva, Costa Rica*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 104, 8352-8356.
- Willing, Michael R. *et al.* (2007). "Phyllostomid bats of lowland Amazonia: effects of habitat alteration on abundance". *Biotropica*, 39 (6), 737-46.
- Wilson, B.A. (1994). *Fire effects on vertebrate fauna and implications for fire management and conservation*. In: *Biodiversity and Fire: The effects and effectiveness*

- of fire management. Recuperado el 11 de febrero de 2010 de <http://www.environment.gov.au/biodiversity/publications/series/paper8/paper11.htm>.
- Woods, P. (1989). "Effects of logging, drought, and fire on structure and composition of tropical forests in Sabah, Malaysia". *Biotropica*, 21, 290-298.
- Wright, S.J. *et al.* (2000). "Poachers Alter Mammal Abundance, Seed Dispersal, and Seed Predation in a Neotropical Forest". *Conservation Biology*, 14 (1), 227-239.
- Young, B.R. *et al.* (2001). "Population declines and priorities for amphibian conservation in Latin America". *Conservation Biology*, 15, 1213-1223.
- Zedler, P.H., Gautier, C.R. y McMaster, G.S. (1983). "Vegetation change in response to extreme events: the effects of a short interval between fires in California Chaparral and coastal scrub". *Ecology*, 64 (4), 809-818.

Susceptibilidad de las coberturas vegetales de Colombia al fuego^{*}

GABRIEL EDUARDO PÁRAMO-ROCHA¹

Resumen

El fenómeno de incendios de las coberturas vegetales es multicausal, altamente dinámico en tiempo y espacio y generador de impactos de alcance variable sobre el medio natural y social. Teniendo en cuenta que la información científica sobre el mismo constituye un insumo fundamental para su adecuada gestión, se desarrolló un proceso de investigación acerca de la susceptibilidad que presentan las diferentes coberturas vegetales existentes en la geografía colombiana, generando como producto principal un mapa nacional de susceptibilidad. Se espera que

la cartografía producida y la metodología empleada, sirva de referente para estudios regionales orientados a una mejor comprensión del fuego y al diseño de estrategias de gestión más efectivas por parte de los diferentes actores del Estado y de la sociedad civil relacionados con esta problemática.

Palabras clave: incendios de coberturas vegetales, susceptibilidad a incendios, mapa de susceptibilidad a incendios, Colombia.

Abstract

The phenomenon of fires on vegetable covers is multi-causal, highly dynamic in

^{*} Documento elaborado a partir de la información generada por el autor en el marco del trabajo *Análisis, Diagnóstico y Elaboración del Mapa de Susceptibilidad a los Incendios Forestales y de la Cobertura Vegetal en Colombia*. Contrato de Consultoría No. 2062372 (MAVDT-FONADE). El Editor reconoce y valora el interés del MAVDT en la socialización de los resultados de los proyectos de consultoría e investigación financiados por el mismo.

¹ Biólogo, consultor. geparamo@gmail.com.

time and space, and generator of variable-scope impacts on the natural and social environments. Bearing in mind that the scientific information about it is an essential input for its proper management, a research process on the susceptibility the different covers existing in the Colombian geography present was developed, generating a national map of susceptibility as the main product. It is expected that the mapping produced and the methodology used, serve as benchmark for regional studies oriented to a better understanding of fire and the design of more effective management strategies by the part of different State and civil society actors associated with this problem.

Key words: vegetable covers fire, susceptibility to fire, map of susceptibility to fire, Colombia.

Introducción

De acuerdo con lo definido en el Plan Nacional de Prevención, Control de Incendios Forestales y Restauración de Áreas Afectadas, la información derivada de procesos de investigación básica y aplicada es un insumo fundamental para la comprensión del fenómeno del fuego forestal y de sus dinámicas, y posibilita, entre otras cosas, una gestión integral para su enfoque preventivo. En el contexto anteriormente anotado, la generación de conocimiento científico sobre la susceptibilidad de los distintos tipos de cobertura vegetal al fuego, tanto en condiciones climáticas normales como de estrés inducido por fenómenos como *El Niño* resulta de alta prioridad nacional.

El presente capítulo describe los lineamientos metodológicos y los procedimientos fundamentales sobre los cuales se ha planteado el desarrollo del proyecto de Análisis y Diagnóstico y Elaboración del Mapa de Susceptibilidad a los Incendios de la Cobertura Vegetal en Colombia. La propuesta de un método (técnicamente soportado) para la identificación, el análisis y la clasificación de susceptibilidad a incendios forestales de cada una de las coberturas vegetales, discutido y aprobado en coordinación con el MAVDT y el Ideam, busca fortalecer la cooperación entre los actores relacionados con ello –comunidades locales, habitantes en general y autoridades ambientales–, los cuales deberán manejar de manera eficaz la información para la detección de los incendios forestales y de la cobertura vegetal y generar sistemas de alerta temprana y manejo de estas emergencias.

La metodología aquí descrita se elaboró a escala general aplicable a nivel nacional (escalas 1:500000 o menores) y se fundamenta en la utilización de imágenes de sensores remotos de moderada resolución espacial (tamaño de píxel de 500 m). No obstante, se prevé su utilización a escalas más detalladas a nivel regional o local, mediante la incorporación de nuevas variables de análisis con la utilización de imágenes de alta y muy alta resolución (30 m a 15 m de resolución espacial por píxel). Se empleó *software* especializado (Sistemas de Información Geográfico Idrisi Andes y Arc View versión 3.2) para el procesamiento digital de imágenes de sensores remotos, la estructuración de bases de datos espaciales, el modelamiento espacial y la realización de la cartografía temática.

Metodología para la clasificación de la susceptibilidad a la ocurrencia de incendios de coberturas vegetales en Colombia

Fundamentos conceptuales

La propuesta se fundamenta conceptualmente en el enfoque metodológico sistémico como principal herramienta heurística de aproximación, y se desarrolla en un esquema ecléctico de aplicación.

El método sistémico tiene sus fundamentos en el paradigma científico conocido como la Teoría General de Sistemas, la cual pretende explicar la conducta de la realidad compleja a través de una descripción de carácter colectivo de los entes integrados (sistemas). En esta teoría el reconocimiento del conjunto no se logra con el estudio individual de las partes o elementos que lo conforman, sino con el conjunto total, estudiado a partir de las propiedades emergentes, nuevas, que le proporcionan identidad e integridad.

El método sistémico o análisis de sistemas se puede definir como la aplicación del método científico al estudio de problemas complejos, y su aplicación ha sido ampliamente desarrollada en casos cuya magnitud y complejidad requieren de una herramienta adecuada para el modelamiento de múltiples variables interrelacionadas y la búsqueda de soluciones prácticas y de respuestas analíticas a los problemas complejos. Esta aproximación ha tenido también gran utilidad en el estudio estructural y dinámico de los sistemas naturales complejos, pues da pautas para elaborar modelos de investigación que permiten optimizar el control del sistema

en estudio, obteniéndose así mayor rapidez y eficiencia en su conocimiento. El enfoque de sistemas aplicado a ecosistemas y comunidades bióticas ha jugado un importante papel en temas como la simulación, la optimización, la cualificación y la cuantificación, el monitoreo y el conocimiento funcional de los sistemas en mención.

Es importante acotar que dadas las características de integridad que poseen los sistemas naturales, para abordar su estudio y comprensión es necesario considerarlos como entes organizados compuestos por subsistemas como elementos estructurantes, que se disponen y relacionan en diferentes niveles jerárquicos, de forma tal que para lograr mayores niveles de detalle en el acercamiento a un determinado sistema, se deben considerar los subsistemas como sistemas aislados que se interconectan y conforman un ente de orden superior (Páramo, 1999 y 2000).

El axioma holístico de que “el todo es más que la suma de sus partes” hizo que se introdujera en la ecología el concepto de organización jerárquica de la naturaleza como uno de los pilares de la teoría general de sistemas. De acuerdo con este concepto, el universo es definido como una organización estructurada con base en un orden jerárquico de sistemas estratificados en multiniveles de la siguiente manera: el nivel alto está compuesto por sistemas más bajos con diferentes cualidades y que le proporcionan a los más altos cualidades emergentes nuevas y diferenciales. Esta regla de la organización jerárquica de los sistemas es fácilmente observable al analizar los diferentes niveles de organización: subatómico, atómico, molecular, celular y así

sucesivamente, hasta llegar a los de mayor complejidad, organismos, poblaciones, comunidades, ecosistemas y paisajes.

Lo anterior sugiere que para abordar el estudio de un sistema complejo, como lo es un ecosistema, debemos aproximarnos a él desde los niveles más amplios hasta los más bajos y aumentar cada vez más el detalle. De igual manera, al aumentar de nivel jerárquico aumenta de manera proporcional la escala temporal del trabajo y disminuye la espacial.

El enfoque ecléctico utiliza los estudios y propuestas más recientes para la evaluación de la vulnerabilidad y riesgo de incendios forestales a nivel mundial, que vienen desarrollando principalmente equipos de investigación que trabajan sobre el tema en países como Canadá, Estados Unidos, España, Italia, Australia, Brasil y México, y autores como Andrews, P.L.; Bevins, C.D.; Seli, R.C., 2003; Burgan, R.E., y Rothermel, R.C., 1984; Calderón, C. A, Fernández, J, Cuenca y M, Martínez, 2004; Chuvieco, E. D, Coceroa, D Riaño, P, Martínez, J, Martínez, J, de la Riva y F, Pérez, 2004; Chuvieco, E., Salas, F.J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D., 2001; Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E., 2005; Ferraz, S.F.B., Vettorazzi, C.A., 1998; Forestry Canada FIRE Danger Group, 1992; Fournier, d'Albe E. M, 1985; Matthew G. Rollins, Robert E. Keane y Russell A. Parsons. 2004; P.S. Roy, 2003; Parisien, M.A.; Kafka, V.G.; Hirsch, K.G.; Todd, J.B.; Lavoie, S.G.; Maczek, P.D., 2005; Pivello, V.R., Norton, G.A., 1996; Rollins, Matthew G.; Frame, Christine K., tech. eds, 2006; Rothermel, R.C. 1972; Schmidt, K.M.; Menakis, J.P.; Hardy, C.C.; Hann, W.J.; Bunnell, D.L., 2002; Scott, J.H.; Burgan, R.E., 2005; The Canadian

Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS), 2004; Vázquez, E y B, Denore, 1999.

Características y alcances

Teniendo en cuenta que los estudios y trabajos realizados sobre zonificación y caracterización de la susceptibilidad y vulnerabilidad de las coberturas vegetales a los incendios han sido realizados casi en su totalidad en países con características climáticas y de vegetación muy diferentes a las de Colombia, casi todos ellos en latitudes de zonas templadas, el conocimiento que se tiene sobre las realidades propias de países ecuatoriales es muy limitado o está aún en ciernes. Esto hace necesario que la metodología que se propone en el presente documento tenga las siguientes características:

- Que sea ajustada a las realidades del país tanto en lo que hace referencia a los aspectos climáticos y meteorológicos que inciden en Colombia como a la gran diversidad de ecosistemas, cobertura vegetal y flora existente y a las condiciones socioeconómicas y culturales específicas del país, que se presentan o pueden presentar como detonantes fundamentales de los incendios forestales y de la cobertura vegetal.
- Que la metodología sea escalable, es decir, que si bien se realizó a una escala general para el ámbito nacional (1:500000 o menor), pueda ser fácilmente replicable a escalas regionales (1:250000) o locales (1:100000 o 1:50000), mediante la incorporación de variables que le agreguen especificidad y mayor resolución, pero

con la misma estructura de la escala nacional.

- Que los resultados obtenidos sean replicables para que se realicen actualizaciones periódicas (cada cinco años, en lo posible) de las características de susceptibilidad de la vegetación a estos eventos.
- Que los resultados permitan ser incorporados a los modelos de alerta temprana de incendios forestales que desarrolla y lleva a cabo el Ideam.
- Que el modelo y la zonificación de susceptibilidad de la vegetación a incendios sirvan para apoyar y planificar integralmente actividades de prevención y mitigación de desastres llevadas a cabo por la Dirección Nacional de Prevención y Atención de Desastres, la Comisión Nacional de Incendios Forestales y los organismos relacionados, tales como las autoridades ambientales (CAR, Dagma, Secretarías de Ambiente, Parques Nacionales) como por autoridades de mitigación y atención de emergencias (Bomberos, Defensa Civil, Policía Nacional, Ejército, Socorro Nacional, etc.).

Métodos y procedimientos

Generalidades

La metodología para el desarrollo del análisis, diagnóstico y elaboración del mapa de susceptibilidad a los incendios de la cobertura vegetal en Colombia se estructuró mediante la elaboración de una secuencia lógica de fases o etapas. Un esbozo general (ver Figura 1) de los procesos diseñados se expone a continuación.

Fase 1. Definición del marco teórico y conceptual.

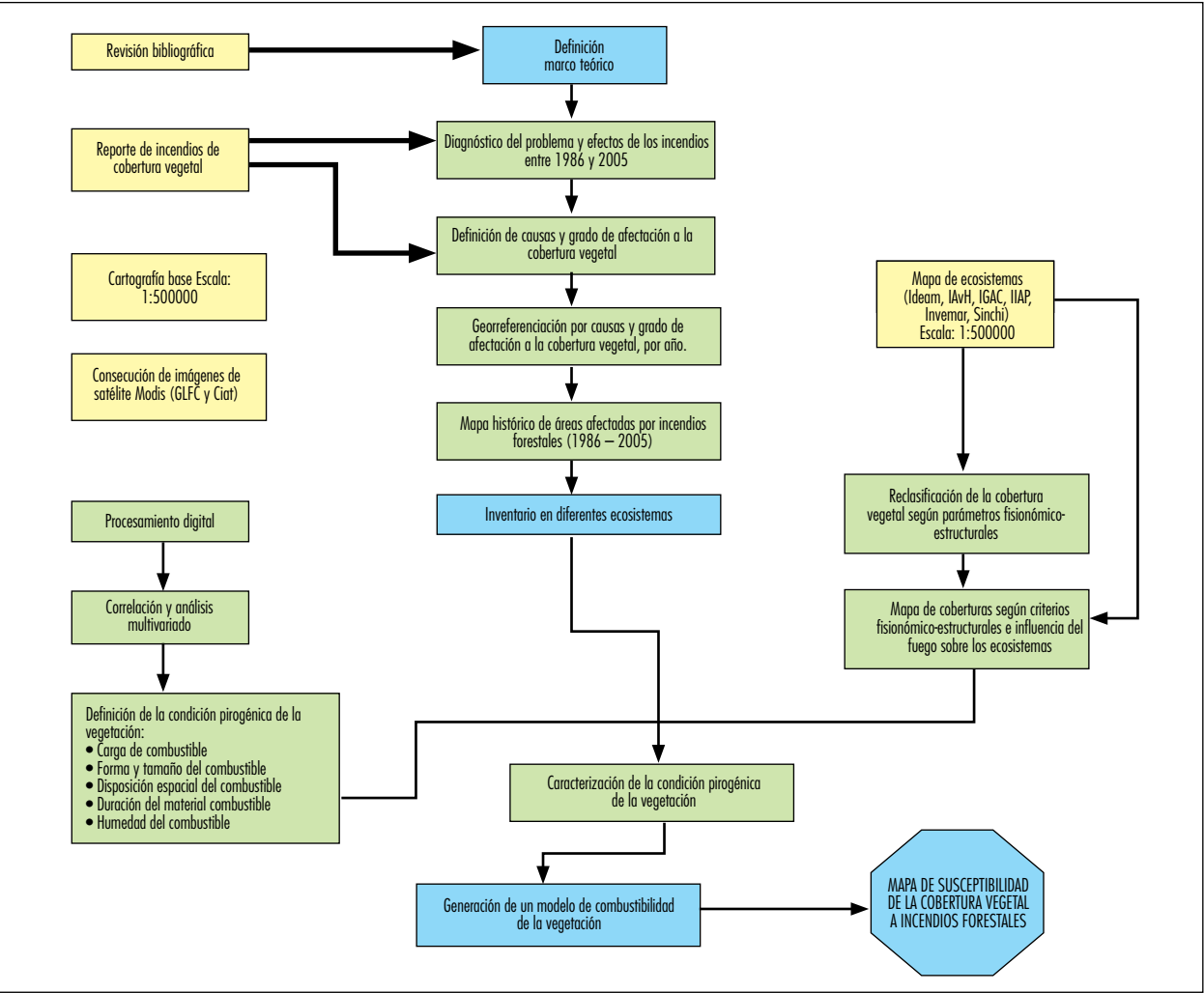
Esta fase se llevó a cabo mediante una extensa revisión de la literatura existente sobre el tema, con el propósito de generar un marco teórico y conceptual o su estado actual. El desarrollo de esta fase condujo a la elaboración y adopción de los conceptos fundamentales sobre los cuales se sustentó el trabajo.

Fase 2. Diagnóstico de la problemática y efectos ocasionados por los incendios de la cobertura vegetal ocurridos entre 1986 y 2005 en Colombia.

Con base en la información suministrada por el MAVDT, la Dirección General para la Prevención y Atención de Desastres, el Ideam, las Corporaciones Autónomas Regionales, las Secretarías del Medio Ambiente municipales, los Bomberos, la Cruz Roja, la Defensa Civil etc., se realizó el diagnóstico de la problemática y los efectos ocasionados por los incendios de la cobertura vegetal en Colombia, que arrojó información de valiosa importancia para el logro de la meta final del trabajo: el mapa de susceptibilidad de las coberturas vegetales a los incendios, que contiene los siguientes resultados y análisis:

- Definición de causas (en los casos en los cuales existe información confiable) de los incendios forestales y grado de afectación a la cobertura vegetal y a los ecosistemas.
- Representación espacial de las áreas (municipios y áreas de Parques Nacionales Naturales) afectadas por los incendios reportados según su tipología, causa y grado de afectación.

Figura 1. Diagrama metodológico general



Fuente: elaboración propia.

- Realización de mapas históricos de las áreas afectadas por incendios forestales a escalas pequeñas (aproximadamente 1:3000000) y presentados como gráficos comparativos.
- Inventario de los incendios forestales ocurridos sobre los diferentes ecosistemas del país entre los años de 1986 y 2005, a partir de la información recopilada por las instituciones correspondientes, previa evaluación y selección.

La información producida a partir de este análisis (diagnóstico de la problemática y efectos ocasionados por los incendios de la cobertura vegetal ocurridos entre 1986 y 2005 en Colombia) permitió:

- Recopilar la información existente en el país sobre los eventos de incendios forestales acontecidos entre las fechas estipuladas.
- Realizar una evaluación de la información existente, teniendo en cuenta para ello el grado de confiabilidad en aspectos como

las áreas reportadas, las causas y la georreferenciación de los eventos. Es necesario aclarar que las bases de datos disponibles presentan grandes limitaciones sobre dichos aspectos, principalmente en la información reportada entre los años 1986 y 2002.

- Contribuir con la construcción de una base de datos unificada sobre los incendios forestales ocurridos en los últimos veinte años en el país.
- Adicionalmente, el análisis histórico permite la identificación de áreas y coberturas que presentan temporalmente mayor frecuencia de incendios, lo cual posibilita la generación de hipótesis sobre la vulnerabilidad y susceptibilidad de la vegetación en esas áreas y tipos de coberturas (¿por qué son recurrentes los incendios en estas áreas; qué factores bióticos, abióticos o antrópicos están influyendo en la ocurrencia de los incendios sobre las áreas de mayor frecuencia de incendios, o sobre los tipos o categorías de cobertura de mayor afectación?).

Fase 3. Caracterización de la condición pirogénica de la cobertura vegetal.

A partir de la información obtenida en la anterior fase y mediante la utilización de la información espacial disponible, se buscó en esta fase poder elaborar un modelo de combustibilidad y caracterización de la condición pirogénica de la cobertura vegetal del país.

La caracterización de la condición pirogénica de la vegetación se fundamentó en

la identificación, descripción y cualificación de los tipos de combustibles, y desarrolló y estableció los siguientes parámetros característicos:

- Carga de combustible.
- Forma y tamaño del combustible.
- Disposición espacial del combustible.
- Duración del material combustible.
- Humedad del combustible.

Como se mencionó anteriormente, la metodología propuesta se basó en técnicas de teledetección mediante la utilización de imágenes de satélite para la zonificación y espacialización de la condición pirogénica de la vegetación. Así, se optó por la utilización de sensores de moderada resolución espacial, como lo son las imágenes del programa Modis* de la Nasa, que poseen las siguientes características y ventajas:

- Para la escala de trabajo (1:500000) dan la suficiente resolución espacial.
- Tienen una muy buena resolución temporal (uno a dos días).
- En la evaluación de fenómenos asociados con la cobertura vegetal y los incendios forestales presentan una resolución espectral óptima, treinta y dos bandas, de las cuales las siete primeras son de gran utilización en estudios de la cobertura vegetal.
- Se pueden obtener de diferentes sitios de Internet de manera gratuita para épocas recientes y para actualizaciones posteriores; su bajo costo es una ventaja adicional.

* The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

- Las escenas completas de estas imágenes tienen recubrimiento para todo el país, lo cual hace fácil su manipulación e interpretación y permiten obtener información global del territorio colombiano en estándares radiométricos muy bien definidos.

De esta manera, la metodología planteada para esta fase se estructuró sobre los siguientes procedimientos:

- Consecución de imágenes de satélite Modis para Colombia (obtenidas de Internet para diferentes años) a través de la página de la Universidad de Maryland, con el programa GLCF–*Global Land Cover Facility*–, y del Centro Internacional de Agricultura Tropical Ciat, del programa gismap.ciat.cgiar.
- Aplicación de una serie de análisis espaciales (correlaciones y análisis multivariados) para llegar a obtener, mediante la adaptación a nuestras condiciones, un modelo de combustibilidad de la vegetación y la posterior caracterización de la condición pirogénica de las coberturas, utilizando para ello información generada por el Ideam, IAVH, Invemar, Sinchi, IIAP e Igac del mapa de ecosistemas de Colombia.

La caracterización de la condición pirogénica de la cobertura vegetal es un análisis de características intrínsecas a los tipos de vegetación y cobertura, que depende de factores como las estructuras horizontal y vertical de la vegetación, la composición (especies presentes), más el grado de fragmentación y la conectividad entre parches de vegetación. Atendiendo a ello, esta caracterización brinda

información relativa a la probabilidad de ocurrencia de incendios, para lo cual considera factores inherentes al tipo de vegetación, variable que en general tiene poca variabilidad temporal.

Es importante aclarar que la caracterización y espacialización de la condición pirogénica de la vegetación es tan sólo un componente de la susceptibilidad y vulnerabilidad de la cobertura a los incendios; por tanto, no debe esperarse que a partir de sólo esta información se puedan prever frecuencias o niveles de riesgo de la ocurrencia de eventos, pues ello debe ser resultado de la aplicación de modelos específicos de riesgo con la incorporación de múltiples variables de índole climática, meteorológica, antrópica de susceptibilidad de la vegetación, etc.

Fase 4. Generación del mapa de susceptibilidad de la cobertura vegetal a incendios forestales.

A partir de la caracterización y espacialización de la condición pirogénica de las coberturas vegetales y mediante la unión y análisis espaciales necesarios se desarrolló el mapa final de susceptibilidad. La ponderación y calificación final de la susceptibilidad total de la cobertura a los incendios forestales se presentaron en un mapa a escala 1:500000.

Procedimientos específicos para el desarrollo de la caracterización y espacialización de la condición pirogénica de las coberturas vegetales

Los procedimientos específicos para la caracterización y espacialización o zonificación de la condición pirogénica o la combustibi-

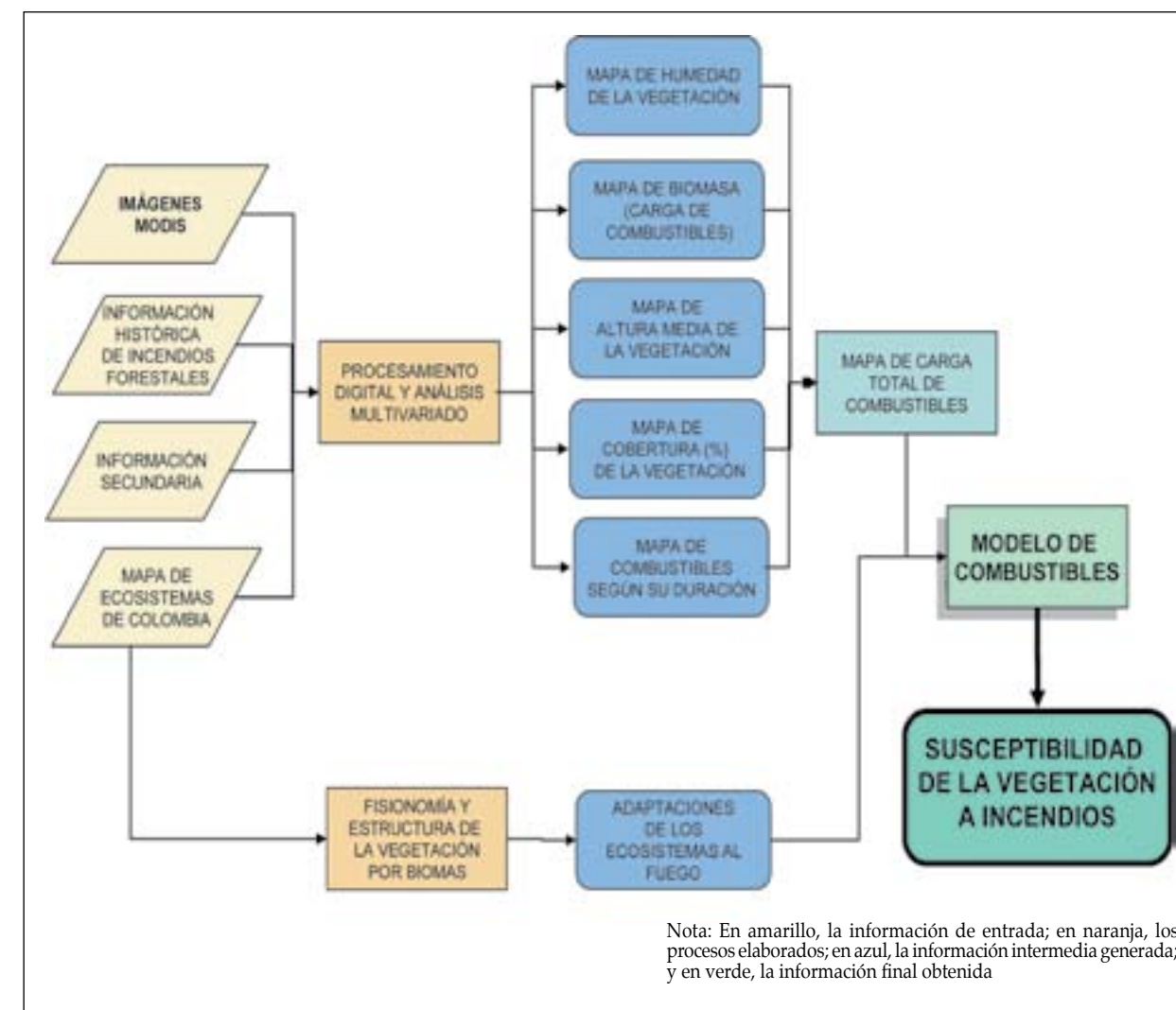
lidad de la vegetación se enmarcaron en la metodología general expuesta anteriormente.

Teniendo en cuenta que para el logro de las metas planteadas se requiere generar una serie de información intermedia lograda mediante procesos continuos de inducción y deducción (análisis y síntesis), como lo plantea el método sistémico, se hizo necesario realizar una serie de modelaciones y

análisis multivariados utilizando sistemas de información geográfica y aplicando diversos métodos. Su caracterización pormenorizada se presenta a continuación:

La Figura 2 muestra el flujo de información y los resultados que se fueron obteniendo paso a paso con la aplicación de la metodología propuesta; refleja también las entradas de información secundaria sobre las cuales se fundamentó el trabajo, los pro-

Figura 2. Flujo de información y resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología propuesta



Fuente: elaboración propia.

cesamientos específicos que se desarrollaron y los productos intermedios, que a su vez se convirtieron en información de entrada para la obtención del producto final.

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta la especificidad de los pasos realizados, los procesos que se llevaron a cabo se pueden discriminar en las siguientes etapas:

- Obtención de imágenes de sensores remotos Modis.
- Obtención y procesamiento inicial de la información secundaria (reportes históricos de incendios, documentación sobre la vegetación colombiana y análisis y extracción de información a partir del mapa de ecosistemas de Colombia).
- Procesamiento digital de las imágenes Modis y elaboración de modelos espaciales mediante técnicas de regresión, correlación y análisis multivariados, específicas para la producción de los mapas y las bases de datos espaciales referidas a las características de los combustibles vegetales.
- Generación de los mapas de humedad de la vegetación, carga de combustibles (biomasa aérea), disposición espacial de los combustibles (altura de la vegetación y cobertura o cubrimiento de la vegetación sobre el espacio) y duración de los combustibles en procesos de ignición. Es necesario aclarar que para la obtención de cada uno de los mapas y las bases de datos espaciales mencionados se requirieron procedimientos específicos de modelación espacial.

- Elaboración del mapa síntesis de carga de combustibles.
- Elaboración del modelo de combustibles (definición de la condición pirogénica de la vegetación).
- Elaboración del mapa de susceptibilidad de la vegetación a incendios forestales y de la cobertura vegetal de Colombia.

Obtención de las imágenes de sensores remotos Modis

Las imágenes Modis, fueron obtenidas a partir de la información disponible en USGS-Eros Data Center, Ciat y el Global Land Cover Facility (GLCF), de Maryland University.

De las imágenes utilizadas del Ciat (2004), se obtuvieron las escenas completas para Colombia en las bandas espectrales 1, 2, 3, 4 y 7 (ver Cuadro 1), el índice normalizado de vegetación (NDVI), el índice mejorado de vegetación (EVI) y las máscaras de nubes para los meses de enero a diciembre. Es importante aclarar que dichas imágenes tienen ventaja sobre las del GLCF por estar georreferenciadas y ortorrectificadas en el sistema Magna-Siras para Colombia.

Cuadro 1. Imágenes del CIAT para Colombia en las bandas espectrales 1, 2, 3, 4 y 7

Banda	Rango Espectral	Color	Resolución (Tamaño del pixel)
1	620-670 nm	Rojo	250
2	841-846 nm	Infrarrojo cercano (NIR)	250
3	459-478 nm	Azul	500
4	545-574 nm	Verde	500
7	2105-2155 nm	Infrarrojo medio (MIR)	500

A partir del GLCF se obtuvo la imagen para Suramérica del algoritmo VCF (Campos

Continuos de Vegetación) procesado por la Nasa entre 2001 y 2006. Esta imagen no se encuentra georreferenciada ni ortorrectificada para Colombia; por lo tanto, fue necesario realizar este procedimiento mediante el SIG Idrisi Andes.

• **Características de las imágenes Modis**

El sensor Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es el instrumento principal a bordo del satélite Terra1 (EOS AM-1) y su homólogo Aqua1, cuya administración pertenece a la Nasa. Modis, realiza observaciones de la superficie de la Tierra cada doce horas y capta información en treinta y seis bandas del espectro electromagnético situadas entre los 0.4 µm e 14.4 µm y se distribuyen en diferentes grupos de resolución espacial. De esta información hiperespectral algunas bandas están dedicadas al estudio de la atmósfera; otras, al comportamiento de la Tierra; y otras, al estudio del océano.

Los satélites Terra1 y Aqua1 se encuentran en una órbita cuasipolar, heliosincronizada a 705 km de altura y cruzan el territorio mexicano a las once de la mañana y a las dos de la tarde, respectivamente; Terra1 se lanzó en diciembre de 1999 y Aqua1 el 4 de mayo de 2002 con una duración de operación aproximada de cinco años.

La información es capturada en el sensor y almacenada a bordo a 12 bits (valor dinámico de 0 a 4096). Con respecto a la resolución temporal de la constelación Aqua-Terra, tenemos que en forma individual cada satélite cruza cada día el territorio colombiano, y ambos satélites cubren la totalidad del país,

bien sea en su paso ascendente o en su modo descendente. La cobertura de cada imagen es de 2330 km de ancho.

Las imágenes del Ciat disponibles para Colombia tienen una resolución espacial de 500 m cada dieciséis días, según el calendario juliano correspondiente al 2004, para un total de veintitrés periodos. Modis contiene diferentes productos disponibles actualmente, pero el presente documento se enfoca principalmente en el Índice de Vegetación de dieciséis días de composición (EVI y NDVI), tierras, monitoreo de la deforestación, predicción en el cambio global, entre otros.

Los Índices de Vegetación (IV) están diseñados para proveer una comparación permanente y consistente de los cambios temporales y espaciales de la vegetación al responder a la cantidad de radiación fotosintéticamente activa en determinado píxel, al contenido de clorofila, al área foliar y a las características estructurales de las plantas. El sistema de imágenes Modis contiene dos tipos de Índices de Vegetación: el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), sensible a la clorofila, y el EVI (Enhanced Vegetation Index), enfocado en las variaciones estructurales de las plantas, como su fisonomía, su tipo o su área foliar.

En colaboración con USGS-Eros Data Center y Ciat se generó un método de procesamiento de productos Modis para toda Colombia con proyección Magna-Sirgas Bogotá. Este método nos permitió obtener imágenes de veintitrés periodos de dieciséis días para el año 2004. La información se genera en formato GEO_tiff (compatible con los diferentes

software GIS) con imágenes separadas de cada banda de NDVI, EVI, MIR; contienen estas últimas información adicional sobre nubosidad, calidad de aerosol, datos atmosféricos, entre otros.

Un paso importante es la reproyección de las imágenes a un sistema de coordenadas estándar para cada país que sea compatible con un software de GIS y de procesamiento de imágenes. Colombia recientemente actualizó el sistema geodésico de referencia Datum Bogotá, adoptado en 1941, por un sistema moderno compatible a nivel internacional que soporta las tecnologías actuales. Este sistema de proyección es conocido como Magna (Marco Geocéntrico Nacional de Referencias), Sirgas (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur), cuya precisión facilita el intercambio de información georreferenciada entre los diferentes usuarios de información geográfica.

• **Características de la imagen VCF (Campos Continuos de Vegetación, algoritmo desarrollado sobre imágenes Modis multitemporales)**

La colección de campos continuos de vegetación contiene estimaciones proporcionales para los tipos de cobertura: vegetación arbórea, vegetación herbácea y suelo desnudo. El producto se deriva de las siete bandas del sensor Modis a bordo del satélite Terra1 de la Nasa. El esquema de la clasificación del producto de VCF representa áreas discretas de clasificación de la cubierta de tierra.

El primer resultado del algoritmo de campos continuos de vegetación muestra la cobertura global arbórea, herbácea y de

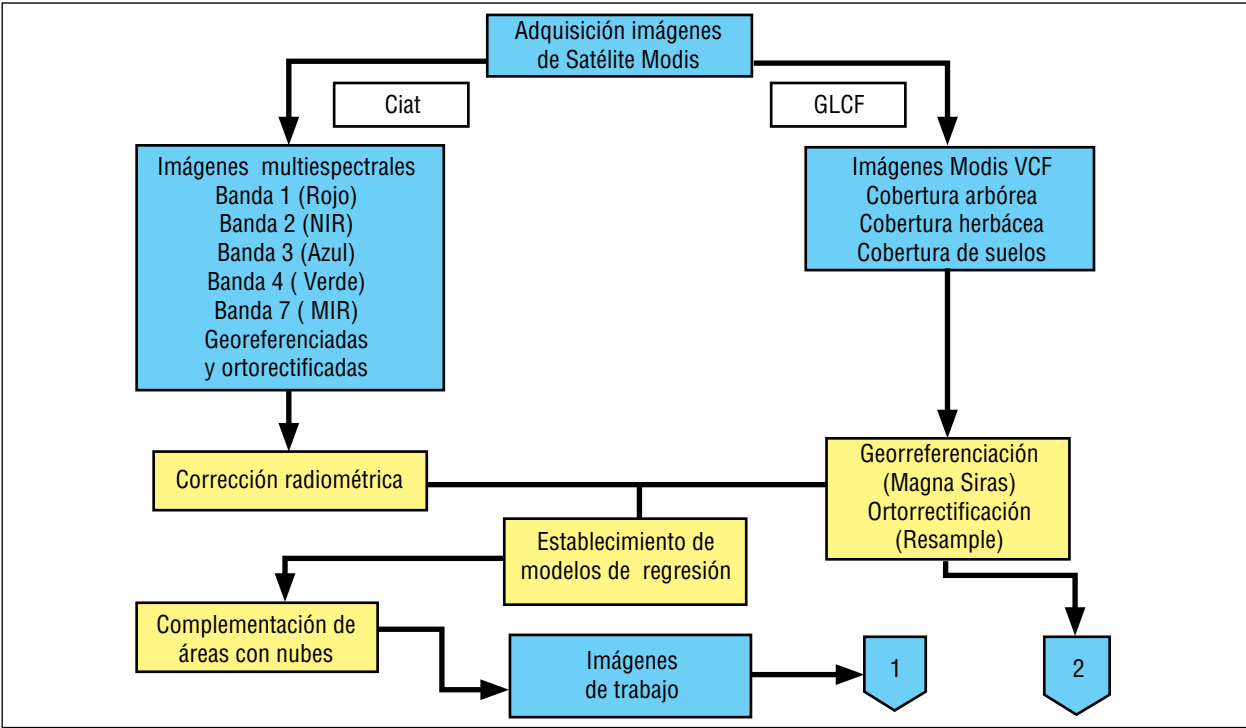
suelo desnudo en valores de porcentaje, con resolución ajustada a 500 m. Por ser un algoritmo basado en modelos multitemporales para consolidar una sola imagen, se obtienen mayores ventajas para nuestras condiciones climáticas ecuatoriales y hay mayor exactitud debido a que posee firmas espectrales más robustas, lo cual se refleja en la reducción del fondo de dispersión de los píxeles adyacentes (efecto generador de sombras) y en un diseño propio para limitar el impacto de la dispersión atmosférica, que implica la presencia de una cobertura mínima de nubes.

Procesamiento inicial de las imágenes de sensores remotos Modis

El procesamiento inicial de las imágenes adquiridas tuvo como objeto mejorar el contraste y hacer las correcciones radiométricas y geométricas necesarias (ver Figura 3), para así llegar a tener un set de imágenes sobre las cuales realizar el trabajo de manera óptima.

Partiendo de los dos tipos de imágenes antes mencionadas –Modis en sus bandas originales georreferenciadas y ortorrectificadas, y una imagen de Campos Continuos de Vegetación (VCF), preparada también a partir de imágenes Modis–, el procesamiento inicial para las primeras empezó con reducir la nubosidad, pues éstas presentan características radiométricas (12 bits) y una cobertura cercana al 10% de nubosidad para ciertas áreas del país (andén Pacífico y piedemontes amazónico y llanero), lo cual limita su utilización en la interpretación; para las imágenes VCF, el procesamiento inicial llevó a su georreferenciación y ortorrectificación.

Figura 3. Diagrama de flujo de la fase de procesamiento inicial de las imágenes



Fuente: elaboración propia.

Las correcciones radiométricas de las imágenes originales Modis llevaron a cambiar la información de 12 bits (valores radiométricos entre 0 y 4096) a 8 bits (valores radiométricos entre 0 y 256), con los cuales trabajan los SIG y los software especializados en interpretación de imágenes de sensores remotos. Esta modificación se logró mediante la ecualización del histograma de cada una de las bandas con la utilización del módulo *enhancement-strech* de IDRISI, que además de ajustar las imágenes a los valores de 8 bits permite realizar una distribución más normalizada de los datos (valores radiométricos de los píxeles); de esta forma se logra mejorar el contraste de cada una de las bandas y se facilita el discernimiento entre las categorías que muestra.

Para el procesamiento inicial de la imagen VCF se aplicaron tres procesos principales:

Corte de la imagen: la imagen original cubre todo Suramérica, por lo que se hizo necesario realizar un corte a la ventana ocupada por Colombia, proceso realizado mediante la utilización del módulo Windows de Idrisi.

Georreferenciación de la imagen: mediante la utilización del módulo *Project de Idrisi* se realiza el cambio de proyección de la imagen original (la cual viene georreferenciada en coordenadas geográficas *Lat-Long* proyectada con el *datum WGS84*) al sistema de proyección utilizado actualmente en Colombia, un sistema de coordenadas planas con la proyección transversal *Mercator* en el *datum Magna-Sirgas*.

Las características de este sistema de referencia son las siguientes:

- Datum de proyección: Magna-Sirgas / Bogotá-Colombia.
- Proyección: Transversal de Mercator.
- Parámetros:
 - Falso Este: 1000000
 - Falso Norte: 1000000
 - Meridiano Central: -74.077508
 - Latitud de origen: 4.596200
 - Factor de escala: 0.999600

Ortorrectificación de la imagen: una vez georreferenciada la imagen se hizo la ortorrectificación (cambio de proyección central a ortogonal) utilizando para ello el módulo *Resample* de Idrisi, el cual permite realizar las correcciones geométricas necesarias.

Sobre las imágenes originales de Modis se colocó una máscara obtenida a partir de la imagen VCF, que no contiene nubes, lo cual permitió eliminar la cobertura de nubes de dichas imágenes. Para lograrlo se aplicó la siguiente secuencia de procesos (ver Figura 4):

Enmascaramiento de las áreas nubosas de las imágenes originales: se superpuso la imagen de máscara de nubes disponible en la página del Ciat, acompañante de las imágenes originales. Esta máscara posee valores booleanos, es decir, un valor de 1 para las áreas de nubes y de 0 para las áreas sin nubes. Este proceso se hizo aplicando el módulo *overlay* de Idrisi, y se obtiene así un vacío de valores radiométricos (valor del píxel 0) en las áreas nubosas.

Complementación de la información inexistente en las imágenes originales: con la generación de un modelo de regresión lineal entre la imagen VCF y las originales para las áreas sin cobertura de nubes se logró la extrapolación de datos en las áreas enmascaradas de las bandas originales, complementando de esta manera la información inexistente en las imágenes originales. Se empleó para ello el módulo *Regress* de Idrisi.

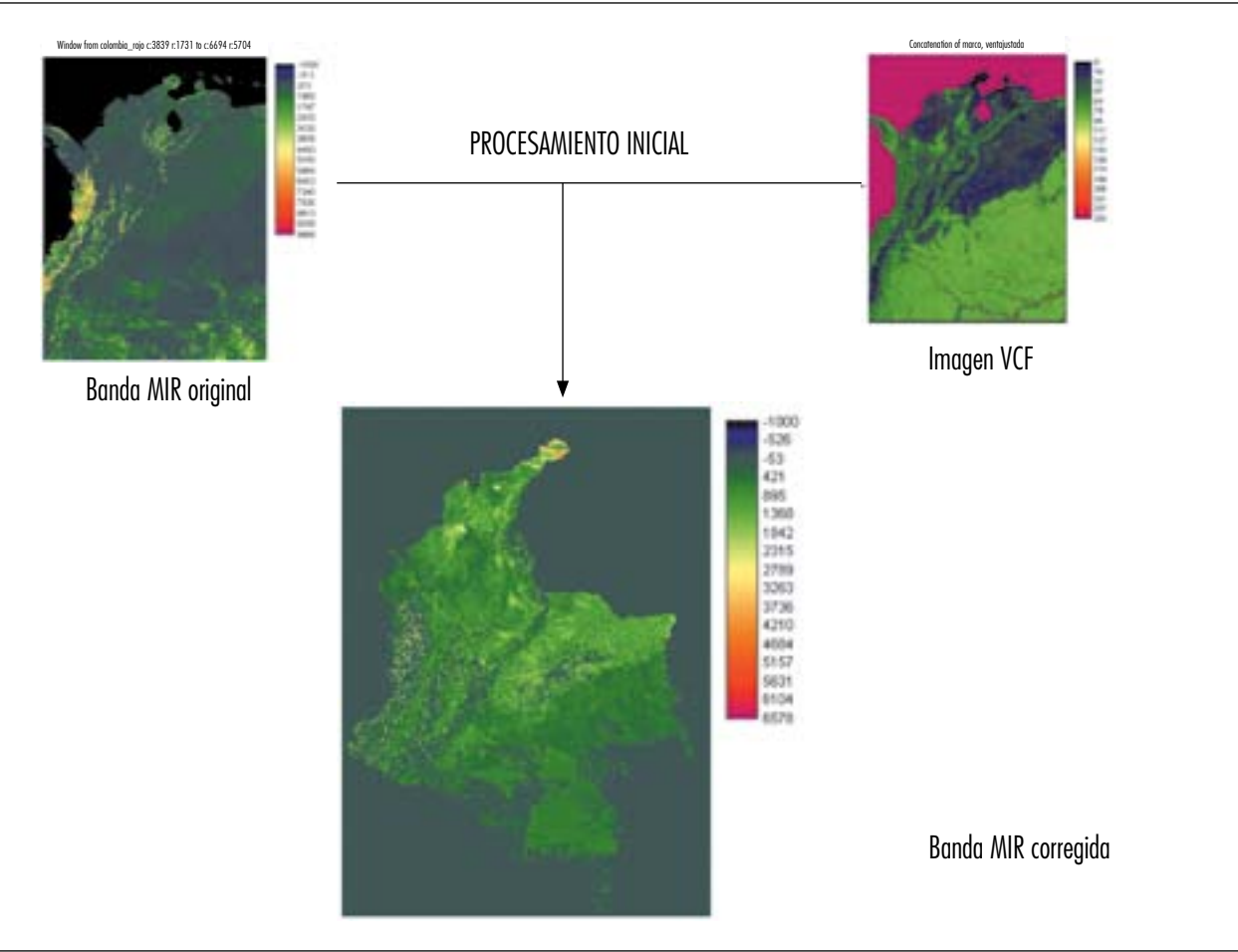
Procesamiento digital de las imágenes Modis y elaboración de modelos espaciales: logrados mediante técnicas de regresión, correlación y análisis multivariados, específicas para la producción de los mapas y las bases de datos espaciales referidas a las características de los combustibles vegetales.

Realización del mapa de humedad de la vegetación

A partir de las imágenes de trabajo ya procesadas, como antes se indicó, se procede a realizar el mapa de humedad de la vegetación mediante la modelación espacial con las bandas 1, 2 y 7, para la obtención de índices de vegetación (NDVI y NDII). La Figura 5 muestra los procedimientos específicos aplicados.

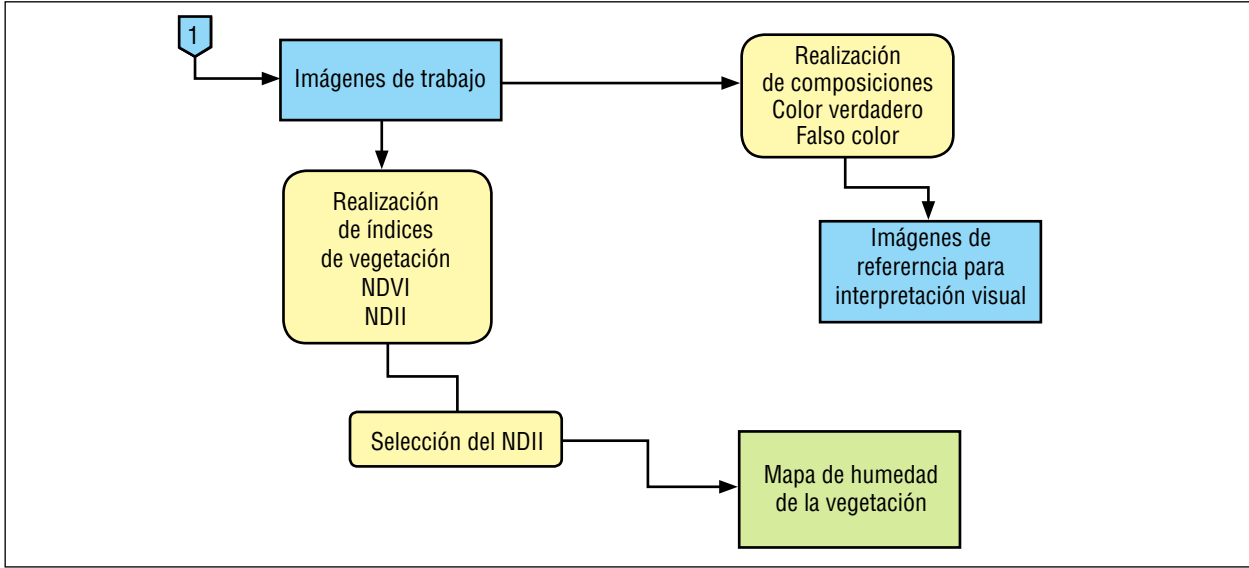
Comparando la información referida de humedad ambiental en el mapa de ecosistemas y las composiciones realizadas también en esta fase, de falso color y color verdadero, para confrontación y ayuda visual, se escogieron los índices que mejor respuesta tuviesen a la

Figura 4. Esquema gráfico de los procedimientos de la fase de interpretación inicial de imágenes



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Diagrama de flujo para la generación del mapa de humedad de la vegetación



Fuente: elaboración propia.

humedad de la vegetación. Las características de los mencionados índices son las siguientes:

• **Índice normalizado de vegetación (NDVI)**

NDVI es la sigla en inglés de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*). Es un índice que se calcula a partir de las distintas reflectancias que presenta la vegetación sana y la enferma o senescente, en lo que respecta a las bandas del rojo y del infrarrojo cercano.

El índice permite observar el nivel de desarrollo de la vegetación, ya sea natural o cultivada. Si se compara el NDVI de dos períodos distintos se puede observar la marcha de los cultivos y pastizales y distinguir el patrón de uso predominante de las tierras en cada zona.

Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés, como plagas o sequías, su reflectividad será inferior en el infrarrojo cercano y aumentará en el rojo, con lo que el contraste entre ambas bandas será mucho menor que si la planta no estuviera sometida a esa situación de estrés. Cuanto mayor sea el contraste entre las reflectividades de la banda roja e infrarroja, mayor vigor vegetal presentará la cubierta en cuestión. Bajos valores de contraste implican una vegetación enferma o senescente, y los contrastes casi nulos corresponden a suelos cada vez más desnudos.

Este índice es un algoritmo entre las bandas correspondientes al rojo visible y al infrarrojo cercano que refleja respuesta (estado, vigor) de la vegetación. Toma valores entre -1 y 1.

$NDVI = (Banda \text{ infrarrojo cercano} - Banda \text{ del rojo}) / (Banda \text{ infrarrojo cercano} + Banda \text{ del rojo})$

En el caso específico de las imágenes Modis se calcula así:

$NDVI = (Banda \text{ 2} - Banda \text{ 1}) / (Banda \text{ 2} + Banda \text{ 1})$

Valores mayores a 0 representan diferentes estados de la vegetación; cuanto mejor y más vigorosa esté creciendo la vegetación los valores tenderán a 1. En términos generales se puede decir que sólo a partir de valores superiores a 0,3–0,4 se puede hablar de vegetación activa (viva). Otra ventaja de este índice es que nos permite comparar objetivamente imágenes de diferentes fechas sin que las condiciones particulares de cada una de ellas lo afecten.

• **Índice de Vegetación Normalizado del Infrarrojo (NDII)**

El Índice de Vegetación Normalizado del Infrarrojo (*Normalized Difference Infrared Index*) tiene una relación directa con el contenido de agua de la vegetación, ya que resulta muy sensible a la humedad de ésta, pues está calculado a partir de una banda espectral muy sensible a la absorción de agua en las hojas (el infrarrojo medio de onda corta, SWIR). En consecuencia, funciona bien tanto en pastizales como en matorrales y bosques.

Se calcula de la siguiente manera:

$NDII = (Banda \text{ del infrarrojo cercano} - Banda \text{ del infrarrojo medio}) / (Banda \text{ del infrarrojo cercano} + Banda \text{ del infrarrojo medio})$

Para el caso de las imágenes Modis se calcula así:

$NDII = (Banda \text{ 1} - Banda \text{ 7}) / (Banda \text{ 1} + Banda \text{ 7})$

Por presentar menor influencia atmosférica que el NDVI, este índice es muy útil para la cartografía del estrés hídrico y de áreas quemadas.

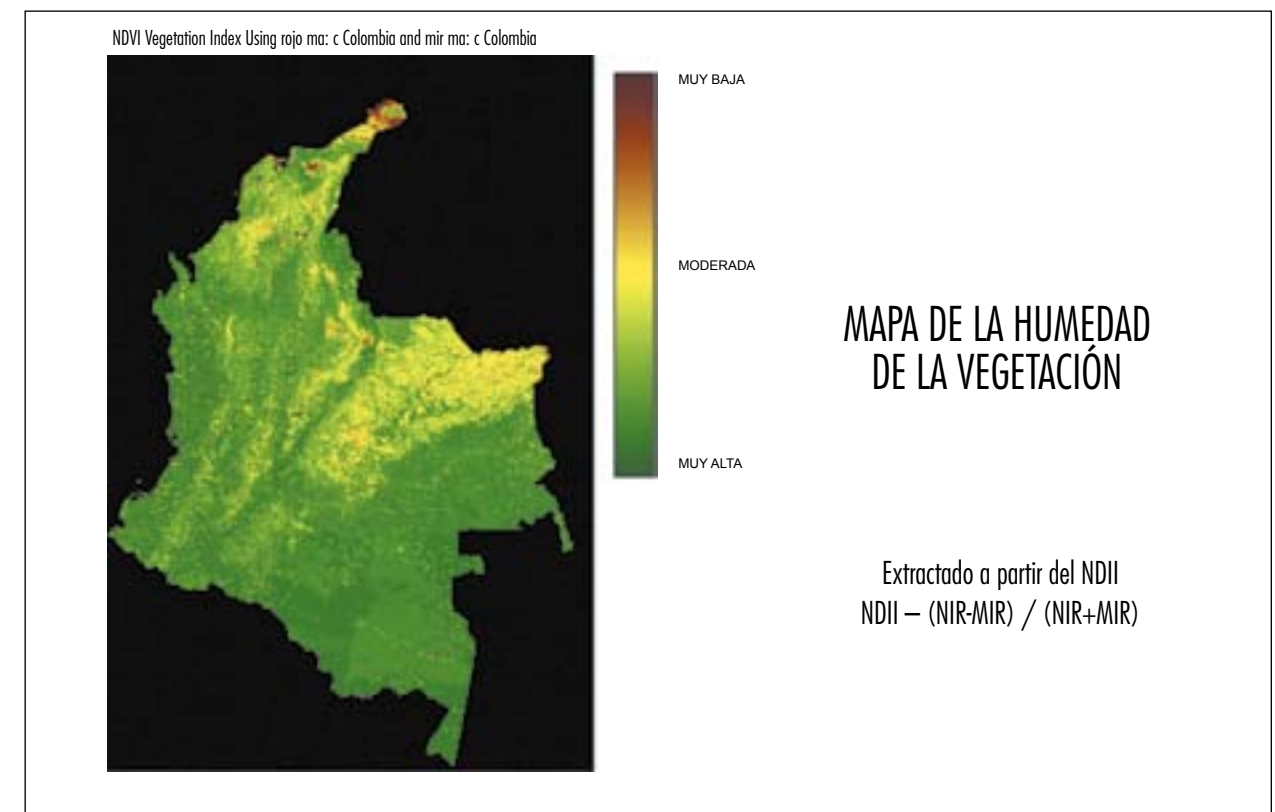
Al igual que el NDVI, este índice presenta valores entre -1 y 1 donde:

Los valores por encima de 0 hasta 1 indican vegetación sin estrés hídrico. A menor valor, mayor humedad de la vegetación. Los valores de cero muestran nubes, y en las áreas que carecen de éstas, vegetación a capacidad de campo. Los valores menores de 0 hasta -1 indican vegetación con diferentes estados (en aumento del estrés hídrico). En estos últimos

hay una correlación directa entre pastos mejorados, con menores valores (tienden hacia 0) y pastos naturales con valores que tienden hacia 1 o están más próximos a 1.

Los índices anteriores se obtuvieron utilizando el módulo Vegindex de Idrisi. Es necesario aclarar que dada la respuesta de cada índice se propuso, para estimar cualitativamente la humedad de la vegetación, utilizar el NDII, por su mejor respuesta en comparación con el NDVI, que presenta mejores respuestas al estado fenológico, no así al contenido de humedad. La Figura 6 muestra el mapa resultante del índice seleccionado (NDII).

Figura 6. Humedad de la vegetación, generada a partir del NDII



Fuente: elaboración propia.

Realización del mapa de carga de combustibles

La carga de combustibles se evaluó estimando el volumen de biomasa total de cada una de las formaciones vegetales del país, y realizando una correlación previa con las imágenes de sensores remotos. El procedimiento para estimar y espacializar la carga de combustibles se indica a continuación.

De acuerdo con lo expresado por diversos autores, la banda del infrarrojo medio es la que mejor respuesta da al volumen de biomasa de una determinada área; no obstante, para que la respuesta sea más eficiente se propone trabajar con la imagen invertida (inverso aditivo de los valores de píxel 1-255). Por ello, en el presente enfoque metodológico se toma como referencia la imagen (Banda 7) correspondiente al infrarrojo medio, a la que se le realizó la transformación indicada, luego de lo cual fue necesario, con procedimientos estadísticos, la interpolación de datos para lograr que los valores radiométricos originales de la imagen arrojaran los valores del volumen de biomasa.

Con la revisión bibliográfica se obtuvieron cerca de 190 datos de biomasa en toneladas por hectárea, reportados para diferentes tipos de vegetación de Colombia y estimados por distintos autores. Esta información se tabuló para posteriormente realizar una espacialización por puntos de muestreo. Recurriendo al módulo *Regress* de Idrisi se buscó el modelo de regresión

de mejor ajuste; se utilizó como variable independiente el valor radiométrico de la banda siete y como variable dependiente los valores de volumen de biomasa espacializados. Al observar que en los modelos de regresión utilizados el valor del coeficiente de correlación era estadísticamente muy poco significativo se procedió a transformar los valores radiométricos de la banda usada con el objeto de normalizarlos. La transformación que resultó ser la más adecuada fue la raíz cuadrada de dichos datos.

La ecuación de regresión alcanzada mediante este procedimiento fue la siguiente:

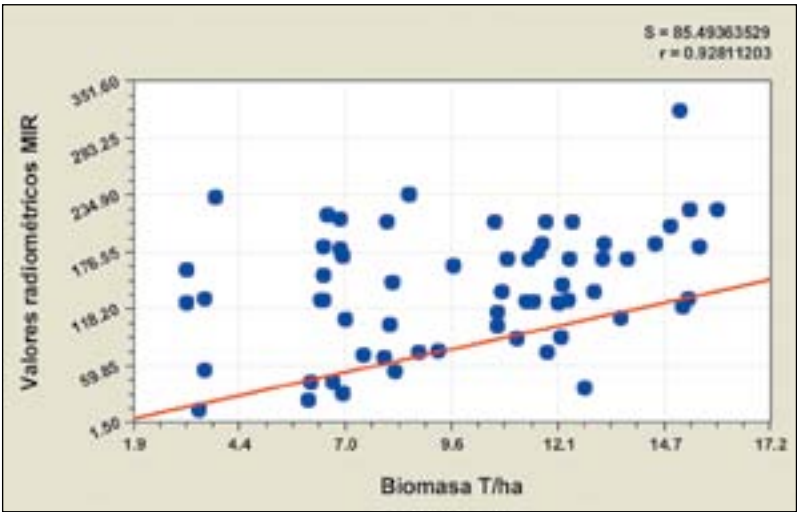
$Y=11.2693 + 9.255X$

$R= 0.9281$

$S= 85.49$

Lo cual quiere decir que el 92% de los datos de biomasa tienen relación directa con los valores radiométricos transformados, y muestran una alta significancia estadística. La Figura 7 presenta la curva de regresión obtenida.

Figura 7. Gráfico de regresión valores radiométricos Banda 7 vs. volumen de biomasa



Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenido el modelo de regresión se procedió a interpolar los datos, para así establecer el mapa de biomasa o de carga de combustibles vegetales para el país. Las Figuras 8 y 9 presentan de manera gráfica los procedimientos utilizados.

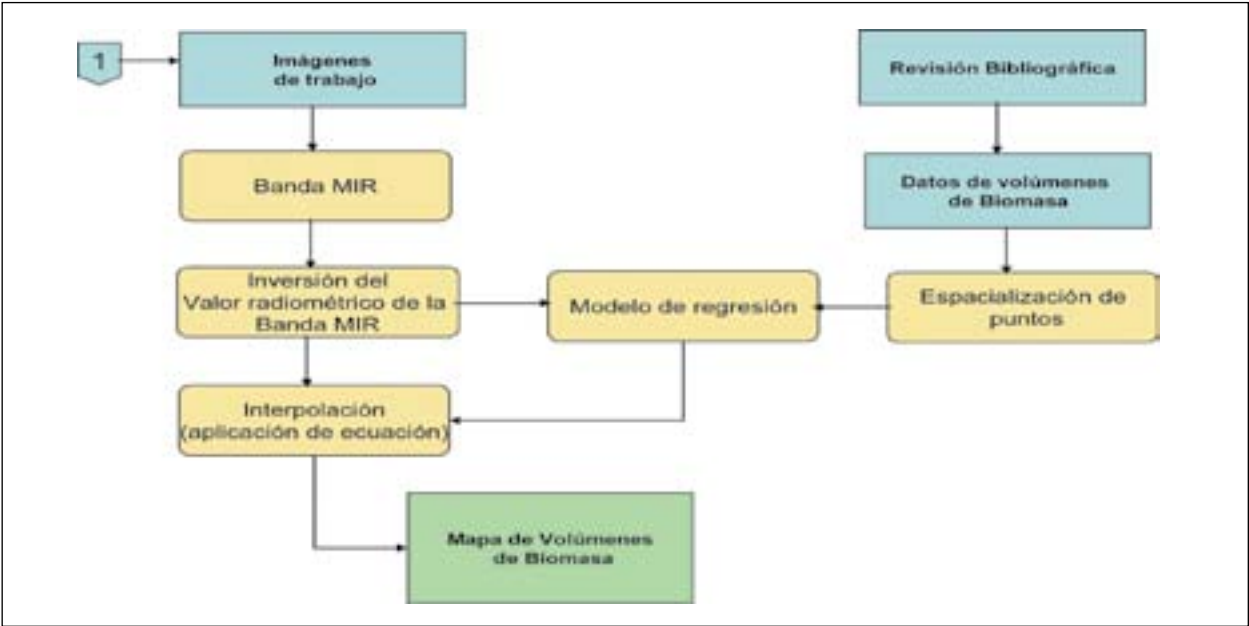
Disposición espacial de los combustibles (altura de la vegetación y cobertura o cubrimiento de la vegetación sobre el espacio) y duración de los combustibles en procesos de ignición

Considerando que uno de los factores de mayor incidencia en la generación de un incendio de la cobertura vegetal es la disposición del combustible, entendida como la distribución de la vegetación sobre el terreno (tanto en el plano horizontal como en el vertical), el presente esbozo metodológico tiene en cuenta esta variable, y para ello ge-

nera los mapas de altura de la vegetación y de cobertura, o proyección de la vegetación sobre el suelo.

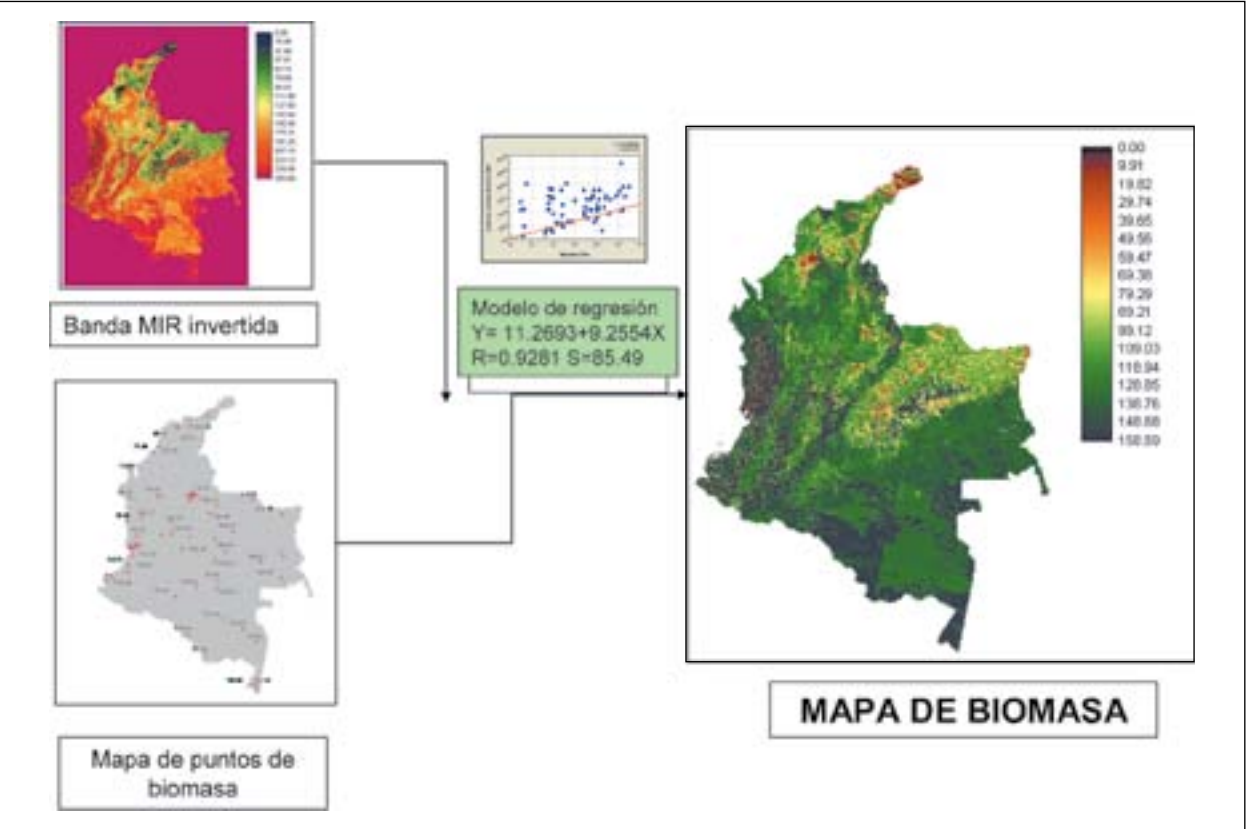
Adicionalmente, las características geométricas de forma y tamaño del combustible (cilíndrica, esférica, irregular; grueso, ancho y largo) son importantes en la definición del tipo de combustible, ya que de manera general se observa que el tiempo de ignición decrece cuando decrece el tamaño del combustible quemado y que la velocidad de propagación de un incendio está directamente relacionada con la superficie y el volumen del combustible, razón por la cual se generó también el mapa de duración de combustibles. La generación de esta información cartográfica se llevó a cabo mediante la aplicación de los siguientes procedimientos (ver Figuras 10 y 11).

Figura 8. Diagrama de flujo de los procedimientos utilizados para la generación del mapa de carga de combustibles (volúmenes de biomasa)



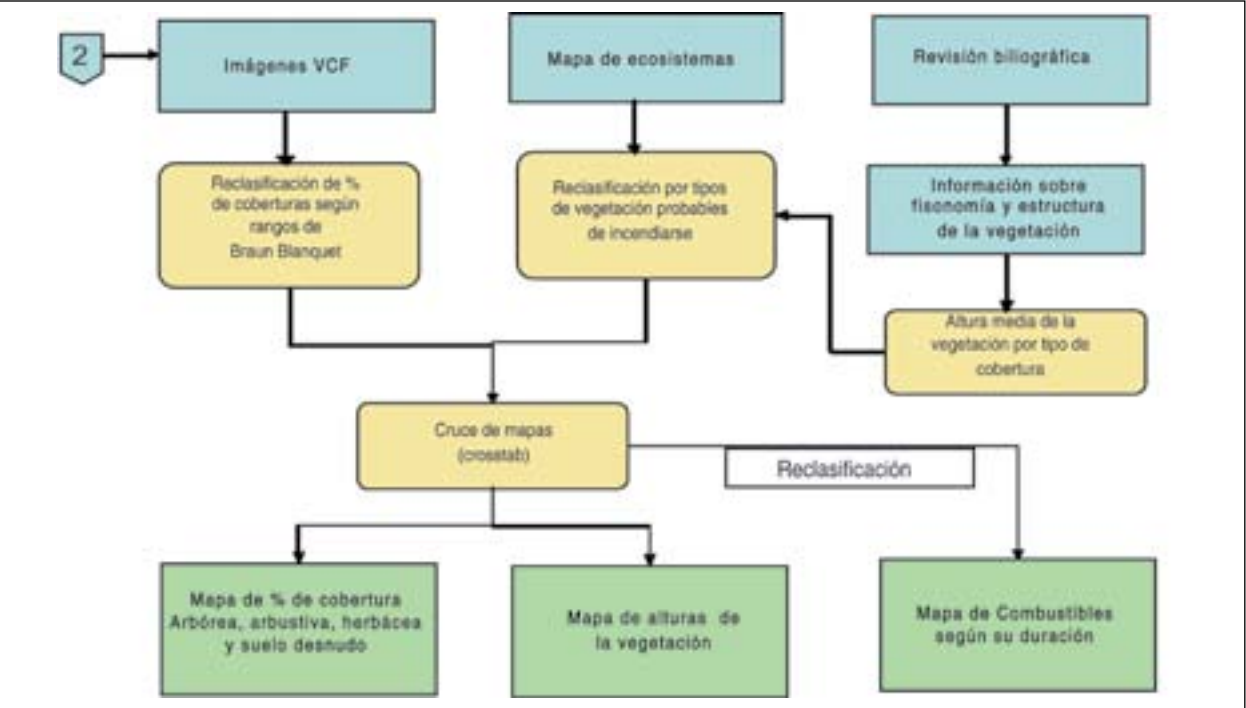
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Esquema gráfico para la elaboración del mapa de carga de combustibles



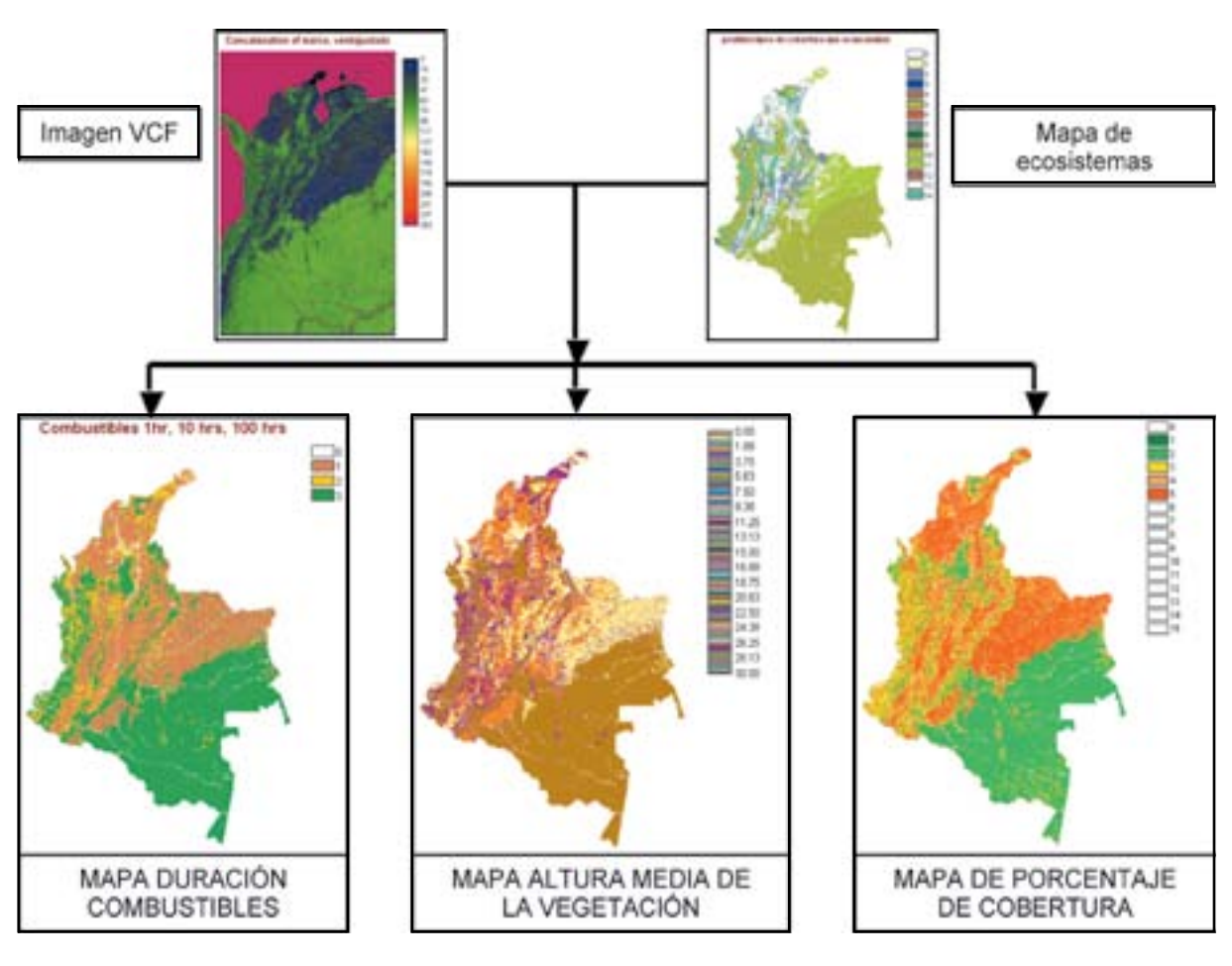
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Diagrama de flujo de los procedimientos utilizados para la generación los mapas de disposición espacial de los combustibles



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Esquema gráfico de los procedimientos utilizados para la generación de los mapas de disposición espacial de los combustibles



Fuente: elaboración propia.

A partir de la imagen VCF (Campos Continuos de Vegetación), se realizó una reclasificación empleando el módulo *Reclass* de Idrisi, con el fin de ordenar los datos de porcentaje de cobertura (valores originales de la imagen) a valores en rangos según la clasificación de Braun-Blanquet, de alta difusión en el mundo (ver Cuadro 2), para así obtener el mapa de cobertura o disposición espacial del combustible en el plano horizontal por tipo de forma de vida dominante, esto es, cobertura de hierbas, arbustos, árboles y suelo desnudo.

Cuadro 2. Rangos de cobertura según la escala de Braun-Blanquet

Rango según Braun-Blanquet	Porcentaje de cobertura
1	0 – 5%
2	5 – 25%
3	25 – 50%
4	50 – 75%
5	75 – 100%

Para la obtención del mapa de altura de la vegetación se procedió a conseguir información sobre el tema referida en la memoria del mapa de ecosistemas de Colombia para los tipos de vegetación que allí se describen y se obtuvieron así los valores medios

de altura en metros de la vegetación para las coberturas descritas.

Con esta información se reclasificó el mapa de ecosistemas por los valores medios de altura de la vegetación. El mapa obtenido se cruzó, mediante un proceso de intersección con la imagen VCF; para obtener así el mapa de alturas de la vegetación que se empleó posteriormente para la caracterización de la condición pirogénica. Para ello se usó el módulo *crosstab* de Idrisi.

A partir de la información anteriormente procesada y mediante un nuevo proceso de reclasificación por los biotipos o formas de vida dominante, se logró el mapa de duración de los combustibles a la ignición, para lo cual se utilizó la clasificación contenida en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación de combustibles según su duración

Duración en quemarse el combustible	Forma y tamaño por tipo de combustible	Biotipo representativo
1 Hora	Ramillas cuyo diámetro es menor a 0.6 cm.	Hierbas y pastos
10 Horas	Ramillas cuyo diámetro está entre 0.6 y 2.5 cm.	Arbustos y arbolitos
100 Horas	Ramas cuyo diámetro está entre 2.5 y 7.5 cm	Árboles

Elaboración del mapa síntesis de carga total de combustibles

El siguiente paso en la propuesta metodológica consistió en la elaboración -a partir de los productos intermedios de humedad de la vegetación, carga de combustibles (biomasa), altura de la vegetación, cobertura y duración de combustibles- del mapa síntesis de carga total de combustibles, información indispensable para la realización del modelo de combustibles.

El procedimiento consistió en la unión, por suma ponderada, de cada uno de los productos mencionados, previa calificación por su importancia. Para ello se optó por aplicar un análisis de evaluación multicriterio con el fin de disminuir la subjetividad al calificar y ponderar cada una de las variables, para lo cual, inicialmente y mediante un análisis de componentes principales, se determinó tanto la correlación entre ellas como la importancia o el peso de cada una en el conjunto, y posteriormente, las técnicas multicriterio, utilizando para ello el módulo MCA de Idrisi. Para mayor claridad de la técnica utilizada se describen a continuación los fundamentos del método:

- **Evaluación multicriterio.** Un método que viene siendo utilizado con mayor frecuencia en estudios ambientales, especialmente en los relacionados con planeación territorial, es la evaluación de impacto ambiental y la gestión del riesgo ambiental. A continuación se transcribe una breve referencia sobre este método, hecha por Arancibia *et al.* (2005):

Para los peligros naturales, la toma de decisiones es una actividad multidimensional y multidisciplinaria, tomándose en cuenta factores ambientales y socioeconómicos. Una tarea común en estas decisiones es resolver el conflicto aplicando reiteradamente tareas como evaluación, ordenación y selección. Así la evaluación Multicriterio, unida a los métodos de los SIG, pueden ser usados para tomar tales decisiones.

El proceso analítico jerárquico (AHP), es una metodología de análisis multicriterio desarrollada a fines de la década

del setenta por el doctor en matemáticas Thomas L. Saaty. Con el tiempo se transformó en una de las metodologías multicriterio de mayor aplicación práctica, y es éste el motivo por el cual se seleccionó para su aplicación en este trabajo.

El AHP involucra todos los aspectos del proceso de toma de decisiones; modela el problema a través de una estructura jerárquica y utiliza una escala de prioridades basada en la preferencia de un elemento sobre otro, combinando de este modo la multiplicidad de escalas correspondientes a los diferentes criterios y sintetiza, además, los Outranking, juicios emitidos, y entrega un ranking u ordenamiento de las alternativas, de acuerdo con los pesos obtenidos (prioridades).

Esta metodología propone una manera de ordenar el pensamiento analítico, destacando tres principios básicos:

- El principio de la construcción de jerarquías.
- El principio del establecimiento de prioridades.
- El principio de la consistencia lógica.

Los sistemas complejos pueden ser mejor comprendidos si se descomponen en elementos constituyentes, se estructuran dichos elementos jerárquicamente y se sistetizan los juicios, de acuerdo con la importancia relativa de los elementos de cada nivel de jerarquía más simples, si son lineales, si ascienden o descienden de un nivel a otro.

Las jerarquías de que trata el método de AHP son aquellas que conducen un sistema hacia un objetivo deseado, como la solución de conflictos, un desempeño eficiente o la felicidad total.

Cada conjunto de elementos en una jerarquía como la antes mencionada ocupa un nivel en la estructura jerárquica. El nivel superior, llamado Foco, consta solamente de un elemento: el objetivo amplio y global. Los niveles siguientes pueden tener cada uno diversos elementos, aunque su cantidad es generalmente pequeña, entre cinco y nueve elementos. Debido a que los elementos de un nivel deberán compararse uno con el otro en función de un criterio del nivel superior siguiente, los elementos de cada nivel deben ser del mismo orden de magnitud.

El segundo principio que destaca este método multicriterio es el establecimiento de prioridades entre los elementos de la jerarquía. Se propone una escala de prioridades como forma de independizarse de las diferentes escalas que existen entre sus componentes. Los seres humanos perciben relaciones entre los elementos que describen una situación, pueden realizar comparaciones por pares entre ellos con respecto a un cierto criterio y de esta manera expresar la preferencia de uno sobre otro. La síntesis del conjunto de estos juicios arroja la escala de intensidades de preferencias (prioridad) entre el total de elementos comparados. De esta forma es posible integrar el pensamiento lógico con los sentimientos, la intuición (que es reflejo

de la experiencia) y los juicios, que son ingresados en las comparaciones por pares, en respuesta a estos factores.

De acuerdo con lo anterior, el primer paso para establecer las prioridades es comparar por pares entre elementos de un mismo nivel con respecto al elemento de nivel superior del que dependen. Las matrices de comparación resultan ser la forma más conveniente para esta etapa del proceso. En cada elemento de la matriz se ingresa el valor de la preferencia del elemento. De acuerdo con el procedimiento matemático propuesto por la metodología, una vez completadas las matrices de comparación la obtención de las prioridades se transforma en un problema de vectores y valores propios (la justificación de esta aseveración se señala más adelante), donde el vector propio asociado al mayor valor propio de cada matriz de comparaciones representa el ranking u orden de prioridades, mientras que el mayor valor propio es una medida de la consistencia del juicio.

El tercer principio del pensamiento analítico es la consistencia lógica. Los seres humanos tienen la capacidad de establecer relaciones entre los objetos o las ideas, de manera que sean consistentes, es decir, que se relacionen bien entre sí y sus relaciones muestren congruencia. En este sentido, consistencia implica dos cosas: transitividad y proporcionalidad. Por la primera deben respetarse las relaciones de orden entre los elementos, es decir, si A es mayor que C y C es mayor que B entonces la lógica dice

que A es mayor que B. Por la segunda, las proporciones entre los órdenes de magnitud de estas preferencias también deben cumplirse con un rango de error permitido. Por ejemplo, si A es tres veces mayor que C, y C es dos veces mayor que B entonces A debe ser seis veces mayor que B; éste sería un juicio ciento por ciento consistente (se cumple la relación de transitividad y de proporcionalidad).

La escala a la cual se hace referencia existe en el inconsciente, está explícita y sus valores no son números exactos. Lo que hay en el cerebro es un ordenamiento jerárquico para los elementos. Dada la ausencia de valores exactos para esta escala, la mente humana no está preparada para emitir juicios ciento por ciento consistentes (que cumplan las relaciones de transitividad y proporcionalidad). Se espera que se viole la proporcionalidad de manera tal que no signifique violaciones a la transitividad.

En el Cuadro 4 se definen y explican los elementos que forman la escala recomendada para las comparaciones por pares entre los elementos de los niveles de la jerarquía. Los valores en ella contenidos representan una escala absoluta, con los que se puede operar perfectamente. En todo caso, cabe señalar que el método es independiente de la escala utilizada. De esta manera el análisis jerárquico de procesos integra aspectos cualitativos y cuantitativos en un proceso único de decisión, en el que es posible incorporar simultáneamente valores personales y pensamiento lógico

Cuadro 4. Valores de calificación entre pares de elementos

Intensidad	Definición	Explicación
1	Igual	Dos actividades contribuyen de igual forma al cumplimiento del objetivo
3	Moderada	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a una actividad sobre la otra
7	Muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra, es absoluta y totalmente clara
2, 4, 6, 8	Para transar entre los valores anteriores	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes
Recíprocos	Si la actividad se le ha asignado uno de los números distintos de cero mencionados cuando se compara con la actividad j, entonces j tiene el valor recíproco cuando se la compara con i ($a_{ji} = 1/a_{ij}$)	Hipótesis del método

Fuente: Sara Arancibia, Eduardo Contreras, Sergio Mella, Pablo Torres e Ignacio Villablanca, 2005. Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva.

en una estructura única de análisis, de modo que se convierta el proceso que ocurre naturalmente en nuestra mente en un proceso explícito, que facilite y promueva la toma de decisiones en escenarios multicriterios, generando resultados más objetivos y confiables.

Un supuesto importante implícito en este modelo es que es necesario partir de la base de que no existe la decisión “correcta e inmutable” (como si se tratara de un sistema de ecuaciones en que se deba despejar y encontrar el valor exacto de x), lo cual queda determinado por las percepciones de quienes participan en el proceso. De esta manera las decisiones son subjetivas, dependiendo de los valores y objetivos personales del momento. Se debe recordar que los juicios considerados en la evaluación están sujetos a las condiciones impuestas por el escenario existente al momento de

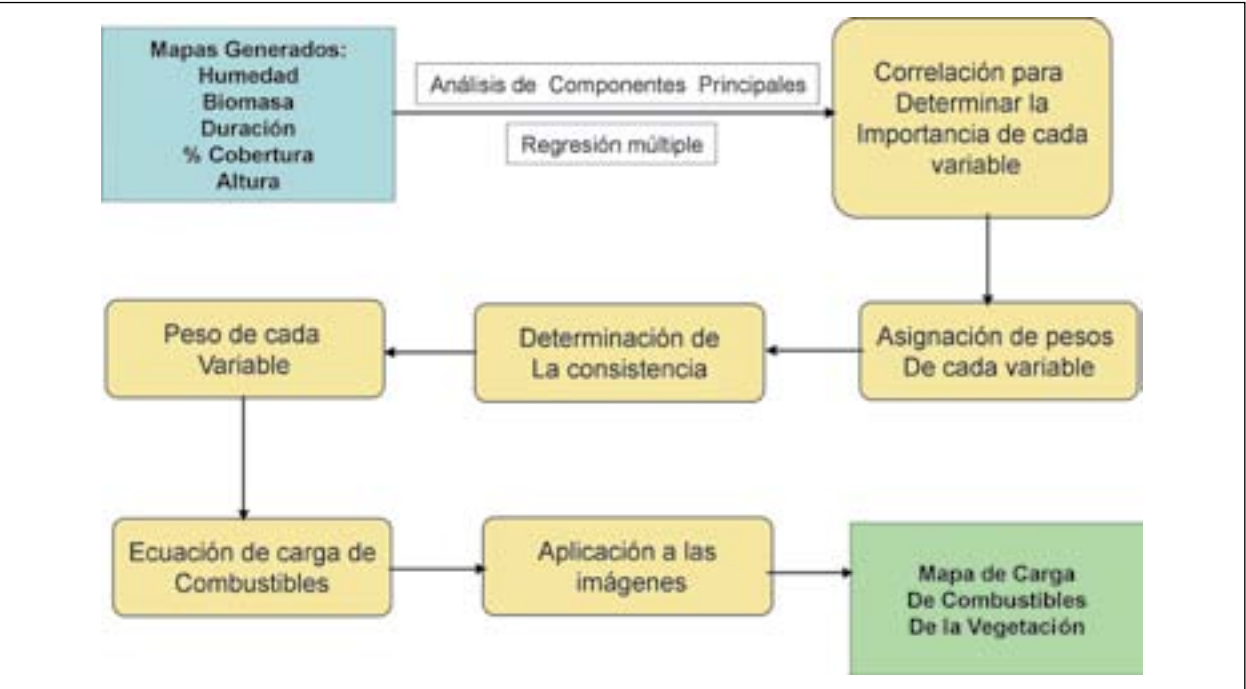
realizar el análisis; las decisiones propuestas por el modelo son válidas para esa realidad en ese instante de tiempo. Para otras circunstancias (otro escenario) es probable que la importancia relativa de los criterios sea diferente.

A partir de la aplicación de esta metodología se obtuvieron los valores de cada uno de los mapas utilizados, los cuales, a través de una ecuación de suma ponderada, posibilitaron obtener el mapa total de carga de combustibles, como se aprecia en las Figuras 12 y 13.

Elaboración del modelo de combustibles (definición de la condición pirogénica de la vegetación)

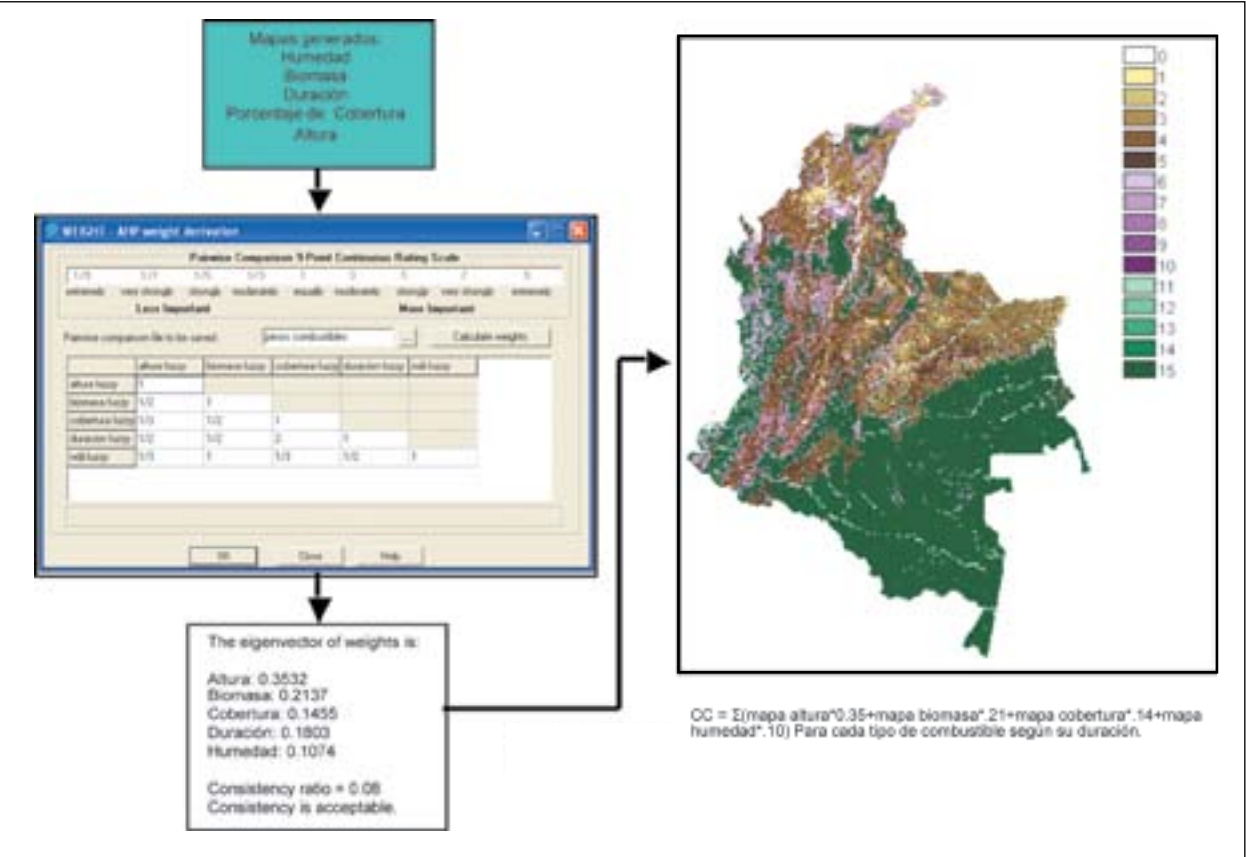
Con la información elaborada hasta el momento se procedió a presentar una propuesta de modelo de combustibles, es decir, una clasificación de la vegetación por su condición pirogénica. El modelo, por tanto, debe mostrar las condiciones que una determinada forma-

Figura 12. Diagrama de flujo de los procedimientos utilizados para la generación del mapa de carga total de combustibles



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Procesos para la obtención del mapa de carga total de combustibles



Fuente: elaboración propia.

ción vegetal tiene para que sea más o menos combustible. Para ello es necesario considerar la cantidad de combustible disponible, la humedad de la vegetación, la disposición del combustible en el espacio y la duración de estos factores para cada ecosistema colombiano, teniendo en cuenta que por factores como la altitud, su distribución espacial en el país, el régimen de lluvias, la insolación, la temperatura media anual, la geomorfología y la intensidad de uso afectan la condición pirogénica de cada uno de los ecosistemas.

El modelo de combustibles se elaboró en una clasificación jerárquica, la cual tiene como entrada principal la codificación de cada uno

de los biomas referidos en el mapa de Ecosistemas de Colombia, según la influencia que el fuego ejerce sobre ellos, atendiendo a los criterios expresados en el Cuadro 5.

Un siguiente grupo jerárquico del modelo de combustibles es la clasificación de cada tipo de cobertura de acuerdo con su combustible dominante, teniendo en cuenta para ello la fisonomía de cada una de las unidades de vegetación presentadas en el mapa de ecosistemas.

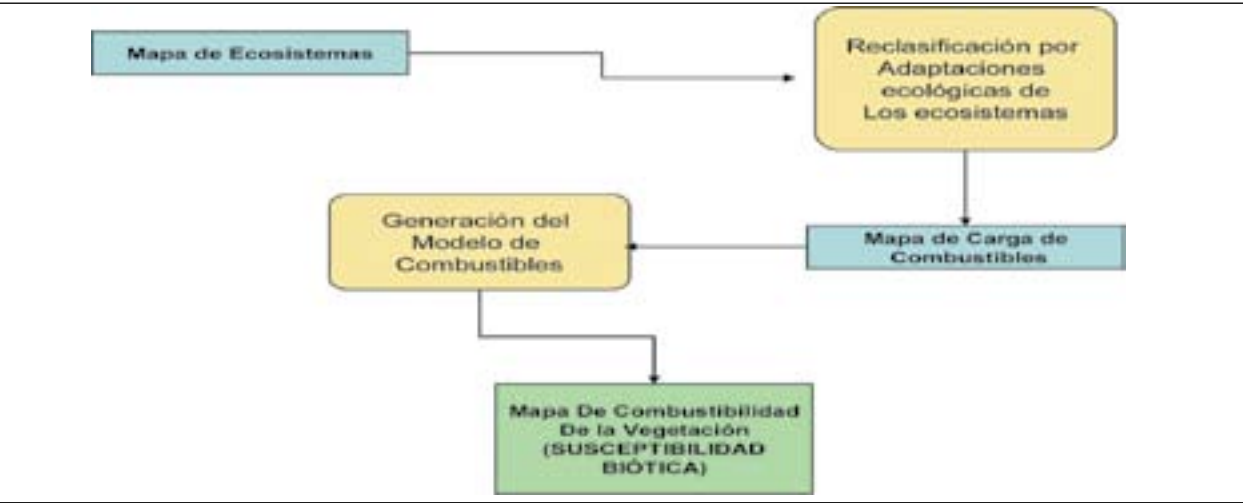
Posteriormente cada uno de los grupos de combustibles se caracterizó por la duración y carga total. La Figura 14 muestra el flujo de procedimientos realizado en esta etapa.

Cuadro 5. Adaptaciones ecológicas de los ecosistemas y de la vegetación al fuego

Influencia de los ecosistemas al fuego	Grupo de combustibles
No combustible	No combustible
Independientes al fuego	Áreas urbanas, pastizal, herbazal, arbustal, bosque natural
Sensibles al fuego	Pastizal, herbazal, arbustal, bosque plantado, bosque natural
Dependientes del fuego	Pastizal y herbazal
Influidos por el fuego	Pastizal, herbazal, arbustal, bosque natural

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Diagrama de flujo de los procedimientos utilizados para la generación del mapa de combustibilidad de la vegetación



Fuente: elaboración propia.

Elaboración del mapa de susceptibilidad de la vegetación a incendios forestales y de la cobertura vegetal en Colombia

A partir de la elaboración del modelo de combustibles y del mapa de condición pirogénica de la vegetación se procedió a elaborar el mapa de susceptibilidad de la vegetación a incendios de la cobertura vegetal, para lo cual se reclasificó el mapa de condición pirogénica de la vegetación, según el grado de susceptibilidad a la ocurrencia de incendios.

Es importante aclarar que este mapa final corresponde a los valores medios mensuales anuales de cada una de las variables analizadas, para tener una aproximación al comportamiento de la vegetación frente a la amenaza de incendio y su vulnerabilidad a ellos, aplicable a cualquier época del año.

Caracterización de la condición pirogénica o inflamabilidad por tipo de coberturas vegetales de cada uno de los ecosistemas del país

Introducción

La caracterización de la condición pirogénica (combustibilidad o inflamabilidad) de las coberturas vegetales para cada uno de los ecosistemas del país se fundamentó en el conocimiento y la valoración cualitativa y cuantitativa del comportamiento de cada uno de los tipos principales de vegetación (combustibles vegetales) a la incidencia del fuego, o como factor generador de fuego por la facilidad que presente para iniciar la ignición.

Para tal caracterización se tuvieron en cuenta los principales factores (evaluables a la escala de trabajo de 1:500000) que hacen que un determinado tipo de vegetación posea mayor o menor grado de combustibilidad, es decir, se analizaron aspectos fundamentales como:

- Forma y tamaño del combustible.
- Distribución espacial de combustible.
- Duración de los combustibles.
- Carga total en toneladas por hectárea de cada grupo de combustibles.

Una vez obtenida la caracterización por estos factores se procedió a la evaluación de los diferentes papeles que el fuego desempeña sobre los distintos ecosistemas. Para ello se clasificaron los biomas y ecosistemas del país reportados en el mapa de ecosistemas de Colombia en las cuatro categorías propuestas por *The Nature Conservancy*: dependientes del fuego, sensibles al fuego, independientes del fuego e influidos por el fuego; se adicionaron a éstas las áreas que por sus características propias de humedad muy alta durante todo el año o por no tener vegetación se consideran como no combustibles.

Posteriormente se convirtieron las unidades de vegetación en modelos de combustibles vegetales mediante el análisis del comportamiento del fuego para cada tipo de ecosistema clasificado según la influencia del fuego, y en cada uno de ellos las unidades vegetales representativas que contienen. Los parámetros considerados por su intervención en la propagación e intensidad de las llamas son los siguientes: combustibilidad e inflamabilidad de las especies; carga, altura, estructura vertical y distribución horizontal o cobertura

de la vegetación. De esta manera, la condición pirogénica se expresa en términos del tipo de combustible dominante por cada ecosistema (biotipo o forma de vida dominante), de la duración de cada uno de ellos como combustible y de la carga total de combustible; este último aspecto, a su vez, es calificado por la cantidad de biomasa por unidad de área que eventualmente pudiera ser quemada.

Modelo de combustibles

Diferentes estudios sobre el análisis del territorio a distintos niveles han sido cartografiados usando para ello modelos tradicionales de combustibles, en muchos casos desconocidos o dudosos.

Teniendo en cuenta lo anterior, y en vista de la gran complejidad y diversidad de la vegetación colombiana, fue necesario elaborar una propuesta de modelo de combustibles que reflejara de la mejor manera posible dichas características de diversidad y que a su vez fuese adaptable a nuestra realidad.

Los modelos de combustibles representan los diferentes comportamientos de la vegetación frente al fuego y viceversa. Esto permite categorizar las áreas en clases de comportamiento potencial del fuego, relacionadas básicamente con la carga de combustibles y su distribución entre los rangos de tamaño de las partículas de combustibles. De igual manera, la duración del combustible (referida al tiempo necesario para que el contenido de humedad de un combustible se equilibre con la humedad del aire que lo rodea y pueda mantener su ignición) permite clasificarlos como de una hora, diez horas y cien horas. La duración real

depende de propiedades del combustible tales como su tamaño y difusividad.

La asignación del modelo que mejor represente las condiciones de combustibles de un área dada ha sido uno de los retos más complicados que han enfrentado los investigadores en incendios forestales y de la cobertura vegetal. Aunque las técnicas de geomática (GIS, sensores remotos, GPS y geoestadística) han mostrado buenos resultados en el mapeo de suelos, vegetación, agua, hábitat de fauna silvestre, bosques, clima y contaminación, estas solo recientemente están siendo usadas en el mapeo de modelos de combustibles, razón por la cual se realiza la presente propuesta, sustentada en el uso analítico y sistemático de estas herramientas de inferencia y modelación espacial y geográfica.

Como una innovación se espera que la distribución espacial de los modelos de combustibles, permita una estimación más precisa del comportamiento del fuego, al considerar los cambios espaciales de la distribución de las cargas de combustibles (en un área calificada como un modelo de combustible), la colocación espacial del combustible como tal y la duración de ellos, enmarcados en los grandes grupos conformados por la influencia que genera el fuego sobre los diversos biomas y ecosistemas colombianos.

En este proyecto la propuesta de asignación de modelos de combustibles se basó en un análisis multicriterio, con el propósito de reducir la subjetividad que entrañan los modelos basados en criterios cualitativos. Algunas de las ventajas del uso del análisis multicriterio son, de manera general, la disminución del sesgo del análisis al

considerar diferentes clasificadores sin requerir necesariamente la orientación de expertos, y de manera específica, la asignación de valores reales de cargas de combustibles (valores de biomasa obtenidos en estudios detallados de campo por diversos investigadores), y no sólo en la estructura y composición de la vegetación, como se ha utilizado comúnmente, ya que éstos podrían representar más de una carga específica de combustibles.

La obtención de cartografía temática para establecer con solidez las herramientas de planificación requeridas en el diagnóstico de la variabilidad espacial de la problemática de los incendios forestales y de la cobertura vegetal en un territorio requiere disponer de un conjunto de capas informativas con las cuales sustentar modelos diversos, útiles en la toma de decisiones. En este sentido, la disponibilidad de cartografía digital de modelos de combustibles vegetales que recojan el conjunto de variables que identifican de forma diferenciada la progresión y emisión energética del fuego es una necesidad de carácter fundamental para establecer las estrategias de defensa de los ecosistemas.

La utilización de la cartografía digital de la vegetación, ligada a una base de datos práctica y coherente del territorio objeto de defensa, es la base para el desarrollo del mapa de modelos de combustibles (caracterización de combustibles y su distribución espacial) requerido para simular el comportamiento del fuego. El mapa de modelos de combustible que aquí se presenta corresponde a la cartografía de las

estructuras de vegetación desde el punto de vista del comportamiento del fuego en caso de ser afectadas por un incendio.

Estructura del modelo de combustibles

El modelo de combustibles desarrollado se estructuró con base en una clasificación jerárquica conformada por los siguientes grupos temáticos:

- Primer nivel de jerarquía, Influencia del fuego sobre los ecosistemas: Regímenes del fuego (papel que ejerce el fuego) a los cuales se encuentran sometidos los biomas y ecosistemas colombianos.
- Segundo nivel de jerarquía, Biomas y ecosistemas: categorizados según la influencia del fuego sobre ellos.
- Tercer nivel de jerarquía, Tipo de combustible vegetal predominante por bioma y ecosistema: tipo de cobertura vegetal y biotipo dominante.
- Cuarto nivel de jerarquía, Duración del tipo de combustible dominante: duración en horas de cada tipo de combustible, definidas en horas de ignición (una hora, diez horas, cien horas).
- Quinto nivel de jerarquía, Carga total de combustibles: caracterización cualitativa dependiente de la correlación de la altura en metros, de la cobertura en valores porcentuales, de la biomasa aérea en Ton/ha y de la humedad media de la vegetación obtenida a través de una distribución cualitativa de los rangos obtenidos a partir del índice de vegetación NDII.¹

Este último nivel define el modelo de combustible para una determinada unidad de vegetación.

Influencia del fuego sobre los ecosistemas

Comprender los regímenes del fuego es esencial para determinar, desde una perspectiva ecológica, si la influencia de un incendio, de origen natural o antrópico, puede ser beneficiosa, benigna o dañina y de qué manera lo son. Los ecosistemas pueden ser descritos en términos de regímenes de fuego típicos, que operan dentro de un rango conocido o esperado de variación de los atributos o características clave de los regímenes del fuego. Los atributos incluyen la frecuencia (incluida la ausencia del fuego), la severidad, la intensidad, la escala espacial, la estacionalidad y la fuente predominante de ignición (tipo y carga de combustible). Por lo general, los ecosistemas y los principales tipos de hábitat pueden clasificarse como pertenecientes a categorías amplias de regímenes de fuego: dependientes del fuego, influidos por el fuego, sensibles al fuego o independientes del fuego, o como no combustibles (ver Figura 15).

El mapa de ecosistemas de Colombia presenta como una de sus principales categorías de calificación la subdivisión del territorio por biomas, caracterizados por los aspectos climáticos y geopedológicos predominantes; éstos a su vez son subdivididos en unidades de vegetación según criterios fisionómicos, las cuales corresponden a los ecosistemas.

Ecosistemas no influidos por el fuego o no combustibles

En este grupo de ecosistemas se clasificaron aquellas coberturas correspondientes a diferentes biomas en los cuales no se presentan incendios debido a la falta de vegetación o de fuentes de combustión. De acuerdo con esto, las áreas en las cuales predomina la humedad, ya sea ambiental o edáfica, durante todo el año (biomas hidrofíticos) y las áreas muy alteradas y desprovistas de vegetación (ecosistemas acuáticos y glaciares) corresponden a esta categoría. En el Cuadro 6 se presentan los ecosistemas clasificados como no combustibles.

Ecosistemas independientes del fuego

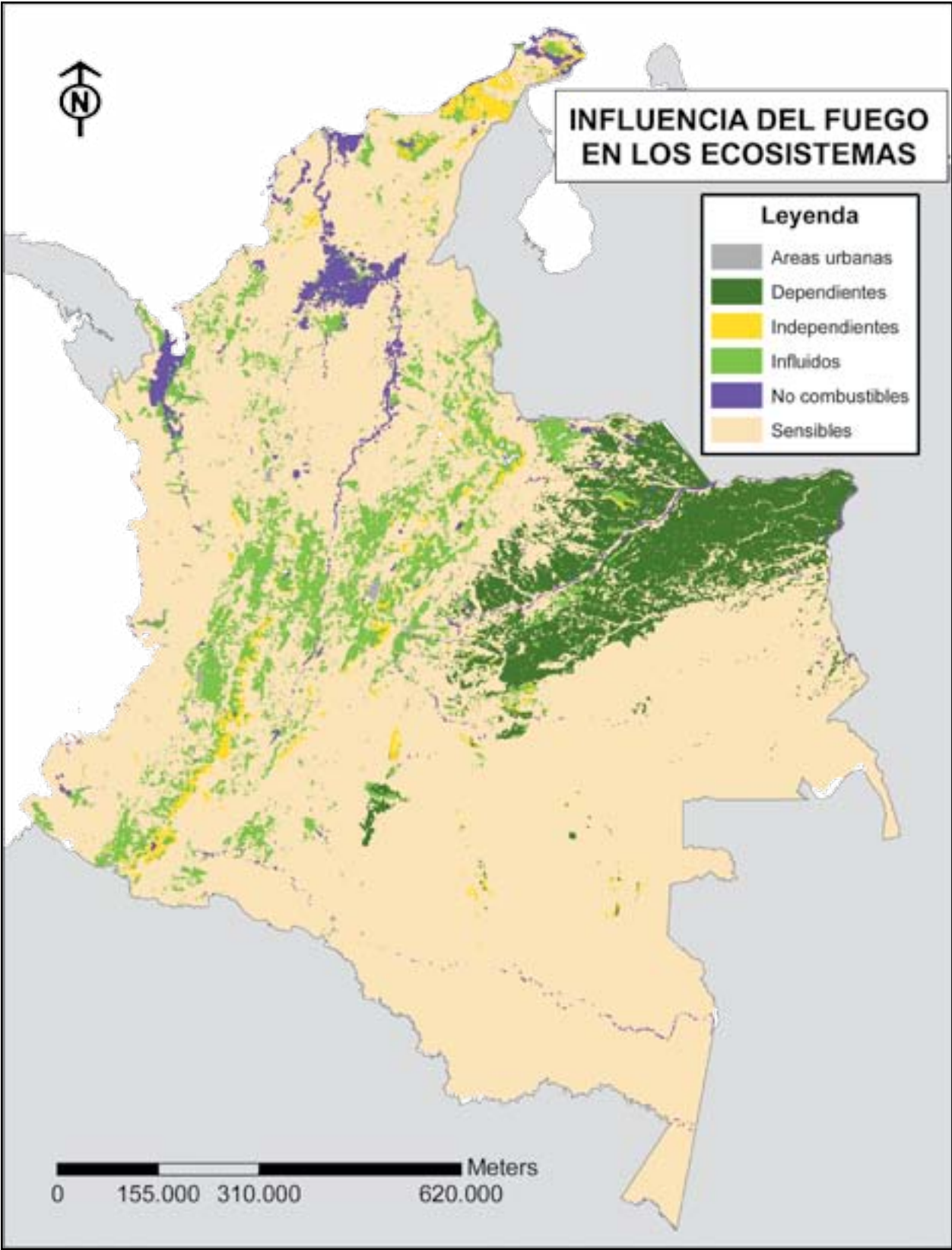
Estos ecosistemas se caracterizan porque el fuego juega un papel muy pequeño en la dinámica del ecosistema, es decir, son ecosistemas en los cuales no se requiere del fuego como un factor detonante para que se generen los mecanismos propios de sucesión. Esto hace de los ecosistemas independientes del fuego áreas especialmente sensibles a los incendios forestales, ya que por las características anotadas no poseen mecanismos de resiliencia ni resistencia adecuados para absorber los efectos del fuego.

En este tipo de ecosistemas la generación de fuego está comúnmente relacionada con factores de índole antrópico o con anomalías climáticas extremas. Habitualmente, estos ecosistemas son bastante fríos, húmedos o demasiado secos, y una vegetación con adaptaciones xeromorfas.*

¹ Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

* Xerofitia, vegetación de páramo y alto andina

Figura 15. Influencia del fuego en los ecosistemas.



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 6. Ecosistemas no combustibles

Influencia	Bioma	Cobertura
No combustible / sin influencia	Halobioma Caribe	Aguas continentales naturales
		Hidrofitia continental
		Lagunas costeras y estuarios
		Zonas desnudas
	Halobioma Pacífico	Aguas continentales superficiales
		Lagunas costeras y estuarios
	Helobioma Amazonia – Orinoquia	Afloramientos rocosos
		Aguas continentales naturales
	Helobiomas Andinos	Hidrofitia continental
		Aguas continentales naturales
	Helobioma Guajiro	Aguas continentales naturales
		Zonas desnudas
	Helobioma Magdalena – Caribe	Aguas continentales naturales
		Hidrofitia continental
		Lagunas costeras y estuarios
		Zonas desnudas
	Helobioma Pacífico – Atrato	Aguas continentales naturales
		Hidrofitia continental
	Helobioma Río Zulia	Lagunas costeras y estuarios
		Aguas continentales naturales
	Helobioma Valle del Cauca	Aguas continentales naturales
		Afloramientos rocosos
	Litobioma Amazonia – Orinoquia	Aguas continentales naturales
		Aguas continentales superficiales
	Orobioma Alto Andes	Aguas continentales naturales
		Glaciares y nieves
		Zonas desnudas
		Aguas continentales naturales
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	Glaciares y nieves
		Zonas desnudas
		Aguas continentales artificiales
	Orobioma Bajo Andes	Aguas continentales naturales
		Zonas desnudas
	Orobioma Baudó – Darién	Aguas continentales naturales
		Hidrofitia continental
	Orobioma Medio Andes	Aguas continentales artificiales
		Aguas continentales naturales
		Hidrofitia continental
	Orobioma San Lucas	Hidrofitia continental
	Orobioma Subandino Santa Marta – Macuira	Aguas continentales naturales
		Zonas desnudas
	Orobioma Azonal – Cúcuta	Aguas continentales naturales
		Zonas desnudas
	Orobioma Azonal Valle del Patía	Aguas continentales naturales
		Zonas desnudas
	Peinobioma Amazonia – Orinoquia	Afloramientos rocosos
		Hidrofitia continental
		Zonas desnudas
	Zonobioma Alternohigrico / Subxerofitico Tropical Alto Magdalena	Aguas continentales artificiales
		Aguas continentales naturales
	Zonobioma Alternohigrico / Subxerofitico Tropical Valle del Cauca	Aguas continentales naturales
		Hidrofitia continental
	Zonobioma Desierto Tropical Guajira – Santa Marta	Zonas desnudas
		Hidrofitia continental
	Zonobioma Húmedo Tropical Amazonia– Orinoquia	Zonas desnudas
		Aguas continentales naturales
	Zonobioma Húmedo Tropical Catatumbo	Aguas continentales naturales
	Zonobioma Húmedo Tropical Magdalena – Caribe	Hidrofitia continental
		Zonas desnudas
	Zonobioma Húmedo Tropical Pacífico – Atrato	Hidrofitia continental
		Hidrofitia continental
	Zonobioma Seco Tropical Caribe	Hidrofitia continental
		Zonas desnudas

Fuente: elaboración propia.

El Cuadro 7, muestra los biomas colombianos clasificados en esta categoría. En ella se incluyen las áreas urbanas, las cuales, aunque pueden poseer vegetación con otro tipo de influencia al fuego, por razón de su alta densidad poblacional es sumamente

peligroso cuando se presenta en ellas. Adicionalmente, es necesario aclarar que por la escala de trabajo utilizada esta vegetación no se disgrega de los polígonos de las áreas habitadas y se presentan como el área urbana total.

Cuadro 7. Ecosistemas Independientes del fuego

Influencia	Bioma	Cobertura
Independientes del fuego	Halobioma Caribe	Áreas urbanas
		Bosques naturales
		Herbáceas y arbustivas costeras
	Halobioma Pacífico	Áreas urbanas
	Helobioma Amazonia – Orinoquia	Bosques naturales
	Helobioma Guajiro	Áreas urbanas
	Helobioma Magdalena – Caribe	Arbustales
		Áreas mayormente alteradas
	Helobioma Pacífico Atrato	Áreas urbanas
	Helobioma Valle del Cauca	Áreas urbanas
	Litobioma Amazonia – Orinoquia	Áreas urbanas
	Orobiomaj Altos Andes	Áreas mayormente alteradas
		Áreas urbanas
		Arbustales
	Orobioma Alto Andino Santa Marta	Herbazales
		Arbustales
		Bosques naturales
		Herbazales
	Orobioma Bajo Andes	Pastos
		Áreas Mayormente alteradas
	Orobioma Medio Andes	Áreas urbanas
		Áreas Mayormente alteradas
	Orobioma Subandino Santa Marta – Macuira	Áreas urbanas
		Áreas Mayormente alteradas
	Orobioma Azonal Cucuta	Áreas urbanas
	Orobioma Azonal Río Dagua	Herbazales
	Orobioma Azonal Río Sogamoso	Herbazales
	Peinobioma Amazonia – Orinoquia	Herbazales
	Zonobioma Alternohídrico / Subxerofítico Tropical Alto Magdalena	Áreas urbanas
		Áreas mayormente alteradas
	Zonobioma Alternohidrico / Subxerofítico Tropical Valle del Cauca	Áreas urbanas
		Áreas urbanas
		Arbustales
		Herbazales
		Herbáceas y arbustivas costeras
	Zonobioma Desierto Tropical Guajira Santa Marta	Vegetación Secundaria
		Áreas urbanas
		Áreas urbanas
		Áreas urbanas
		Áreas urbanas
	Zonobioma Húmedo Tropical Amazonia – Orinoquia	Áreas urbanas
	Zonobioma Húmedo Tropical Catatumbo	Áreas urbanas
	Zonobioma Húmedo Tropical Magdalena – Caribe	Áreas urbanas
	Zonobioma Húmedo Tropical Pacífico – Atrato	Áreas urbanas
	Zonobioma Sub Tropical Caribe	Áreas urbanas
		Arbustales
		Herbazales
		Herbáceas y arbustivas costeras

Fuente: elaboración propia.

Ecosistemas sensibles al fuego

Corresponden a esta categoría aquellos ecosistemas que no se han desarrollado con intervención del fuego como un proceso natural. Son altamente sensibles al fuego, ya que no están adaptados para resistir las quemas, pero son más resistentes que los independientes del fuego. Por lo tanto, la acción de los incendios sobre ellos causa grandes perturbaciones en sus ciclos naturales y afecta de manera muy importante la flora y fauna allí presentes. La presencia de fuego en estos ecosistemas se debe a factores antrópicos, como incendios provocados o por negligencia. Los efectos de la fragmentación sobre estos ecosistemas generalmente coadyuvan a que los incendios se conviertan en un problema grave en estas áreas debido a que se alteran los patrones de distribución de los combustibles vegetales, la ignición aumenta y la velocidad de propagación por la quema es mayor.

En Colombia corresponden a esta categoría los ecosistemas de bosque, matorral, herbazal y pastizal, de tipo natural o secundario, presentes en los pisos ecuatorial, subandino y andino. El Cuadro 8 muestra los ecosistemas pertenecientes a esta categoría.

Ecosistemas influidos por el fuego

Estos ecosistemas se encuentran frecuentemente en la zona de transición entre los ecosistemas dependientes del fuego, los sensibles al fuego o los independientes del fuego. Los incendios en estos ecosistemas generalmente se originan en la vegetación adyacente dependiente del fuego y se propagan en grado e intervalos variables hacia

la vegetación influida por los incendios. Normalmente la quema tradicional con fines agrícolas es la fuente endógena de ignición.

Para el presente estudio se clasificaron los agroecosistemas en esta categoría teniendo en cuenta la causa principal de los incendios en los ecosistemas: el arraigo a las prácticas culturales de tala y quema o roza y quema, ampliamente difundidas en nuestro medio. El Cuadro 9 muestra los ecosistemas clasificados en esta categoría.

Ecosistemas dependientes del fuego

En estos ecosistemas el fuego es un proceso absolutamente esencial. En ellos las especies han desarrollado adaptaciones para responder positivamente al fuego y para facilitar su propagación, configurando regímenes que varían en frecuencia, intensidad e impacto.

En el país se reconoce como ecosistema dependiente del fuego las sabanas de la Orinoquia, conformadas principalmente por coberturas de tipo pastizal y herbazal (ver Cuadro 9).

Tipo de combustible predominante

Dado que los combustibles vegetales son cualquier material vegetal vivo o muerto que puede entrar en combustión al aplicársele calor y que según su tamaño pueden ejercer mayor o menor resistencia a la combustión ya que por su contenido de humedad, su composición química, etc., pueden tener diferentes grados de condición calórica y de velocidad de encendido, en el presente trabajo se consideró necesario evaluar este aspecto.

Cuadro 8. Ecosistemas sensibles al fuego

Influencia	Bioma	Cobertura
Sensibles al fuego	Halobioma Caribe	Arbustales
		Bosques naturales
		Herbazales
		Pastos
		Vegetación secundaria
	Halobioma Pacífico	Bosques naturales
		Herbáceas y arbustivas costeras
		Vegetación secundaria
	Helobioma Amazonia – Orinoquia	Arbustales
		Bosques naturales
		Bosques plantados
		Vegetación secundaria
	Helobiomias Andinos	Bosques plantados
		Cultivos semipermanentes y permanentes
		Pastos
	Helobioma Guajiro	Vegetación secundaria
		Áreas agrícolas heterogéneas
		Bosques naturales
	Helobioma Magdalena - Caribe	Herbazales
		Áreas agrícolas heterogéneas
		Arbustales
		Bosques naturales
		Bosques plantados
	Helobioma Pacífico – Atrato	Herbáceas y arbustivas costeras
		Pastos
		Vegetación secundaria
		Bosques naturales
		Pastos
	Helobioma Río Zulia	Bosques plantados
		Pastos
		Vegetación secundaria
	Helobioma Valle del Cauca	Arbustales
		Bosques naturales
		Vegetación secundaria
	Litobioma Amazonia – Orinoquia	Arbustales
		Bosques naturales
		Vegetación secundaria
	Orobioma Alto Andes	Bosques naturales
		Bosques plantados
		Pastos
		Vegetación secundaria
	Orobioma Alto Andino Santa Marta	Vegetación secundaria
		Arbustales
	Orobioma Andino Santa Marta	Bosques naturales
		Herbazales
		Pastos
		Vegetación secundaria
	Orobioma Bajo Andes	Bosques naturales
		Bosques plantados
		Pastos
		Vegetación secundaria
	Orobioma Baudó Darien	Arbustales
		Bosques naturales
		Vegetación secundaria
	Orobioma Macarena	Arbustales
		Bosques naturales
		Herbazales
	Orobioma Medio Andes	Pastos
		Arbustales
		Bosques naturales
		Bosques plantados
		Herbazales
	Orobioma San Lucas	Pastos
		Vegetación secundaria
		Bosques naturales
		Herbazales
		Pastos

Cuadro 8. Ecosistemas Sensibles al fuego (Continuación).

Influencia	Bioma	Cobertura
Sensibles al fuego	Orobioma Subandino Santa Marta – Macuira	Arbustales
		Bosques naturales
		Herbazales
		Pastos
		Vegetación secundaria
	Orobioma Azonal Cúcuta	Arbustales
		Bosques naturales
		Herbazales
		Pastos
		Vegetación secundaria
	Orobiomaima Azonal río Sogamoso	Arbustales
		Bosques naturales
		Pastos
		Vegetación secundaria
	Orobioma Azonal Valle del Patia	Arbustales
		Bosques naturales
		Herbazales
		Pastos
	Peinobioma Amazonia – Orinoquia	Vegetación secundaria
		Arbustales
		Bosques naturales
	Zonobioma Alternohigríco / Subxerofítico Tropical Alto Magdalena	Bosques plantados
		Arbustales
		Bosques naturales
		Herbazales
	Zonobioma Alternohigríco / Subxerofítico Tropical Valle del Cauca	Pastos
		Bosques plantados
		Vegetación secundaria
	Zonobioma Desierto Tropical Guajira – Santa Marta	Áreas agrícolas heterogéneas
		Bosques naturales
	Zonobioma Húmedo Tropical Amazonia – Orinoquia	Pastos
		Arbustales
	Zonobioma Húmedo Tropical Catatumbo	Bosques naturales
		Pastos
		Vegetación secundaria
	Zonobioma Húmedo Tropical Magdalena – Caribe	Arbustales
		Bosques naturales
		Bosques plantados
		Herbazales
	Zonobioma Húmedo Tropical Pacífico – Atrato	Herbáceas y arbustuvas costeras
		Bosques naturales
		Herbáceas y arbustivas costeras
		Pastos
	Bosque Seco Tropical Caribe	Vegetación secundaria
		Bosques plantados
		Pastos

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 9. Ecosistemas influidos y dependientes del fuego

Influencia	Bioma	Cobertura
Influidos por el fuego	Halobioma Caribe	Áreas agrícolas heterogéneas
		Cultivos anuales o transitorios
		Cultivos semipermanentes y permanentes
	Halobioma Pacífico	Áreas agrícolas heterogéneas
		Cultivos semipermanentes y permanentes
	Helobioma Amazonia – Orinoquia	Áreas agrícolas heterogéneas
		Cultivos anuales o transitorios
		Cultivos semipermanentes y permanentes
	Helobiomias Andinos	Áreas agrícolas heterogéneas
		Cultivos anuales o transitorios
	Helobioma Magdalena- Caribe	Cultivos anuales o transitorios
		Cultivos semipermanentes y permanentes
		Herbazales

Cuadro 9. Ecosistemas influidos y dependientes del fuego (Continuación)

Influencia	Bioma	Cobertura
	Helobioma Pacífico – Atrato	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos anuales o transitorios Cultivos semipermanentes y permanentes
	Helobioma río Zulia	Áreas agrícolas heterogéneas
	Helobioma Valle del Cauca	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos anuales o transitorios
		Cultivos semipermanentes y permanentes
		Áreas agrícolas heterogéneas
	Orobioma Alto Andes	Cultivos anuales o transitorios Cultivos semipermanentes y permanentes
	Orobioma Altoandino Santa Marta	Áreas agrícolas heterogéneas
	Orobioma Andino Santa Marta	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos semipermanentes y permanentes
	Orobioma Bajo Andes	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos anuales o transitorios Cultivos semipermanentes y permanentes
Influidos por el fuego	Orobioma Baudó Darién	Áreas agrícolas heterogéneas Herbáceas y arbustivas costeras
	Orobioma Medio Andes	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos anuales o transitorios
		Cultivos semipermanentes y permanentes
	Orobioma San Lucas	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos anuales o transitorios
	Orobioma Subandino Santa Marta Macuira	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos anuales o transitorios
	Orobioma Azonal Cúcuta	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos anuales o transitorios
	Orobioma Azonal río Sogamoso	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos anuales o transitorios
	Orobioma Azonal Valle del Patia	Áreas agrícolas heterogéneas
	Peinobioma Amazonia – Orinoquia	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos anuales o transitorios Cultivos semipermanentes y permanentes
		Vegetación secundaria
		Áreas agrícolas heterogéneas
	Zonobioma Alternohígrico / Subxerofítico Tropical Alto Magdalena	Cultivos anuales o transitorios Cultivos semipermanentes y permanentes
		Áreas agrícolas heterogéneas
		Cultivos anuales o transitorios
	Zonobioma Alternohígrico / Subxerofítico Tropical Valle del Cauca	Cultivos semipermanentes y permanentes Pastos
		Áreas agrícolas heterogéneas
		Cultivos anuales o transitorios
	Zonobioma Desierto Tropical Guajira – Santa Marta	Áreas mayormente alteradas
	Zonobioma Húmedo Tropical Amazonia – Orinoquia	Áreas agrícolas heterogéneas Cultivos anuales o transitorias Cultivos semipermanentes y permanentes
		Vegetación secundaria
		Áreas agrícolas heterogéneas
	Zonobioma Húmedo Tropical Catatumbo	Cultivos anuales o transitorias
		Cultivos semipermanentes y permanentes
		Pastos
	Zonobioma Húmedo Tropical Magdalena -Caribe	Vegetación secundaria
		Áreas agrícolas heterogéneas
		Cultivos semipermanentes y permanentes
	Zonobioma Húmedo Tropical Pacífico – Atrato	Pastos
		Vegetación secundaria
		Áreas agrícolas heterogéneas
	Zonobima Seco Tropical Caribe	Cultivos semipermanentes y permanentes
		Áreas mayormente alteradas
		Bosques naturales
	Helobioma Amazonia–Orinoquia	Cultivos anuales o transitorias Cultivos semipermanentes y permanentes
		Herbazales
		Pastos
	Litobioma Amazonia– Orinoquia	Herbazales
		Pastos
	Peinobioma Amazonia– Orinoquia	Herbazales Pastos

Fuente: elaboración propia.

Para la definición de los tipos de combustible predominantes por bioma y ecosistema se tomaron los biotipos o formas de vida que, con un porcentaje mayor del setenta y cinco por ciento son los predominantes en cada una de las coberturas consideradas en el mapa de ecosistemas de Colombia (ver Figura 16). De esta manera, se definieron los siguientes grupos de combustibles:

Combustibles pesados
- Árboles. - Codominancia de árboles y arbustos. - Arbustos.
Combustibles livianos
- Hierbas. - Codominancia de hierbas - Pastos.

Teniendo en cuenta la escala de trabajo a nivel nacional y la poca información específica sobre la cantidad de material vegetal muerto en los ecosistemas (troncos caídos,

hojarasca, pasto seco, ramas secas, etc.), en esta investigación no se consideraron los combustibles muertos. No obstante, es necesario aclarar que éstos juegan un importante papel en la probable generación de incendios, razón por la cual este aspecto no debe pasar inadvertido al hacer evaluaciones de la combustibilidad de la vegetación a escalas mayores (regionales o locales).

El Cuadro 10 muestra el área en kilómetros cuadrados ocupada por cada uno de los grupos de combustibles mencionados anteriormente por tipo de ecosistema (clasificados previamente por la influencia que el fuego ejerce sobre ellos) y la duración de combustibles dominantes.

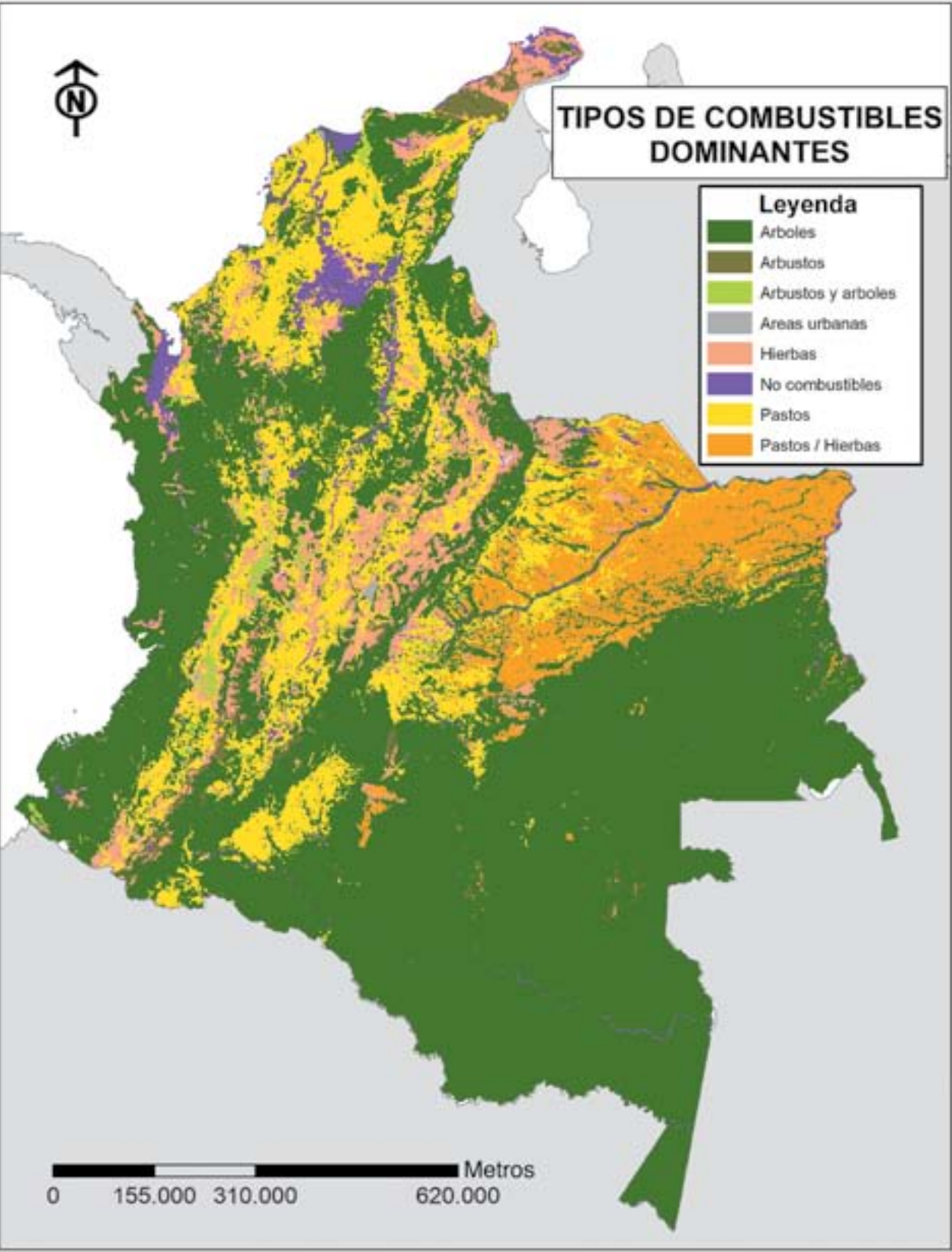
Como se puede apreciar en la Figura 17, con respecto al total nacional el mayor porcentaje de área lo ocupan los combustibles

Cuadro 10. Área en kilómetros cuadrados ocupada por cada uno de los grupos de combustibles

Influencia del fuego sobre los ecosistemas	Combustible vivo predominante	Área (km²)	Porcentaje del área cubierta por tipo de combustible (%)
No combustibles	No combustibles	27.958.391	2.45
Total no combustibles		27.958.391	
Independientes	Arbustos	15.136.908	1.33
	Hierbas	5.838.714	0.51
Total independiente		20.975.622	
Áreas urbanas		2.155.208	0.19
Influidos	Arbustos	982.526	0.09
	Arbustos y árboles	7.782.271	0.68
	Hierbas	65.598.517	5.75
	Pastos	18.611.037	1.63
Total influidos		92.974.351	
Sensibles	Árboles	727.149.404	63.78
	Arbustos	487.705	0.04
	Hierbas	6.245.336	0.55
	Pastos	18.611.037	1.63
Total sensibles		901.735.091	
Dependientes	Pastos / Hierbas	94.280.593	8.27
Total dependientes		94.280.593	
TOTAL INTEGRAL		1.140.079.256	100.00

Fuente: elaboración propia.

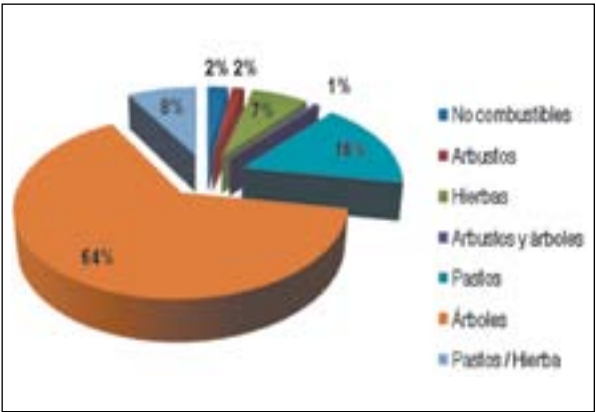
Figura 16. Tipos de combustibles dominantes



Fuente: elaboración propia.

pesados tipo árboles, seguido por combustibles ligeros tipo pastos, representativos en los ecosistemas de la Amazonia y Orinoquia, respectivamente. De igual manera, la menor área ocupada está conformada por la consociación arbustos-árboles y por materiales no combustibles, los cuales corresponden a áreas de bosques secundarios; matorrales para los primeros y biomas hidrofiticos para los segundos.

Figura 17. Distribución relativa de cada grupo de combustibles con respecto al área nacional



Fuente: elaboración propia.

Es importante aclarar que los combustibles ligeros y de rápida ignición (arbustos y hierbas), aunque no tengan un porcentaje representativo a nivel nacional, en los tipos de ecosistemas independientes del fuego influidos por el fuego y sensibles al fuego, unidos con los pastos, sí ocupan relativamente grandes áreas, lo que hace a estos grupos de ecosistemas y biomas más vulnerables al fuego. De igual manera, para los biomas y ecosistemas influidos (los cuales tienen mayor impacto negativo por el fuego) están dominados principalmente por estos tipos de combustibles, lo cual hace mayor su susceptibilidad a incendios.

Duración de los tipos de combustible dominantes

La siguiente categoría en el modelo de combustibles desarrollado es su clasificación por la duración del proceso de ignición, factor de alta importancia para entender la capacidad pirogénica de la vegetación, ya que la duración del combustible expresa de una forma indirecta qué tan peligroso puede ser un incendio.

Con combustibles de rápida ignición el control del fuego es más difícil ya que la cobertura se quema muy rápido y el impacto en términos de áreas afectadas es mayor. Con combustibles de larga duración el control es más fácil, y en cuanto al área, con las medidas adecuadas de control el impacto puede ser menor. Respecto a los bienes y servicios ambientales que prestan los ecosistemas, el efecto ambiental del fuego es independiente de la duración y depende de otros factores (biodiversidad, fragilidad, resistencia, resiliencia, etc.).

Según la duración, los combustibles se clasifican en:

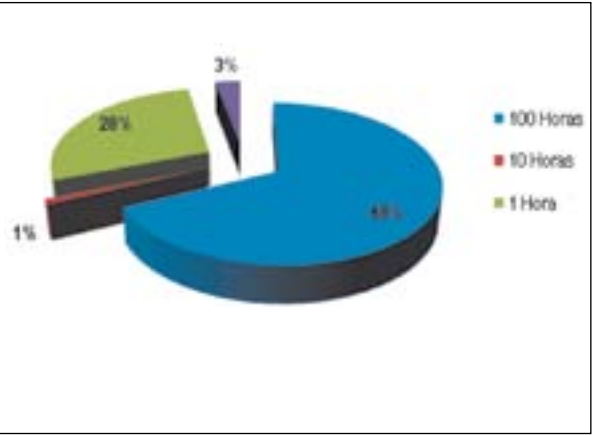
Combustibles de una hora de duración: son los que pueden quemarse en una hora o menos debido a su bajo contenido de humedad, poca área foliar y porcentajes de material fibroso (lignina) altos en sus tejidos. En esta categoría se incluyen los pastos y las hierbas, así como los arbustos presentes en matorrales abiertos de bajo porte.

Combustibles de diez horas de duración: son los arbustos presentes en formaciones de matorral y arbustal, y la consociación arbustos-árboles presente tanto en formaciones secundarias como en ecosistemas de bosques secundarios y arbustales arbolados.

Combustibles de cien horas de duración: la duración de combustión es de cien horas o más debido a la alta humedad intersticial de los tejidos, la alta área foliar y por estar generalmente localizados en zonas con alta humedad ambiental y del suelo. En ellos se catalogaron los árboles pertenecientes a los diferentes biomas, ecosistemas selváticos y boscosos del país.

En la Figura 18 se observa que los combustibles de cien horas son los que ocupan la mayor extensión relativa, seguidos por los de una hora y con menor porcentaje de participación los de diez horas. Es importante aclarar que aunque el área ocupada por los combustibles de una hora no es la mayor en el país, sí representa un porcentaje alto (28%, correspondientes a 305.400 km², aproximadamente), lo cual, aunado a que este tipo de combustible está presente en los ecosistemas de menor resistencia y capacidad de resiliencia a los efectos del fuego (Ecosistemas independientes e influidos por el fuego), aumenta la susceptibilidad de estas áreas a los incendios forestales.

Figura 18. Área relativa de cada grupo de combustibles según su duración



Fuente: elaboración propia.

El Cuadro 11 muestra las áreas por tipo de combustible en el territorio nacional, y la Figura 19, su distribución espacial.

Cuadro 11. Área en kilómetros cuadrados ocupada por cada uno de los grupos de combustibles según su duración

Tipo de combustible predominante	Duración (horas)	Área (Km2)
Árboles	100 horas	727149.404
Arbustos	1 hora	1468.231
Arbustos y árboles	10 horas	972.781
	100 horas	9809.49
Hierbas	1 hora	23187.846
No combustibles	No combustibles	27958.391
Pastos	1 hora	186463.683
Pastos / Hierbas	1 hora	94280.593
TOTAL GENERAL		1.140.079,26

Fuente: elaboración propia

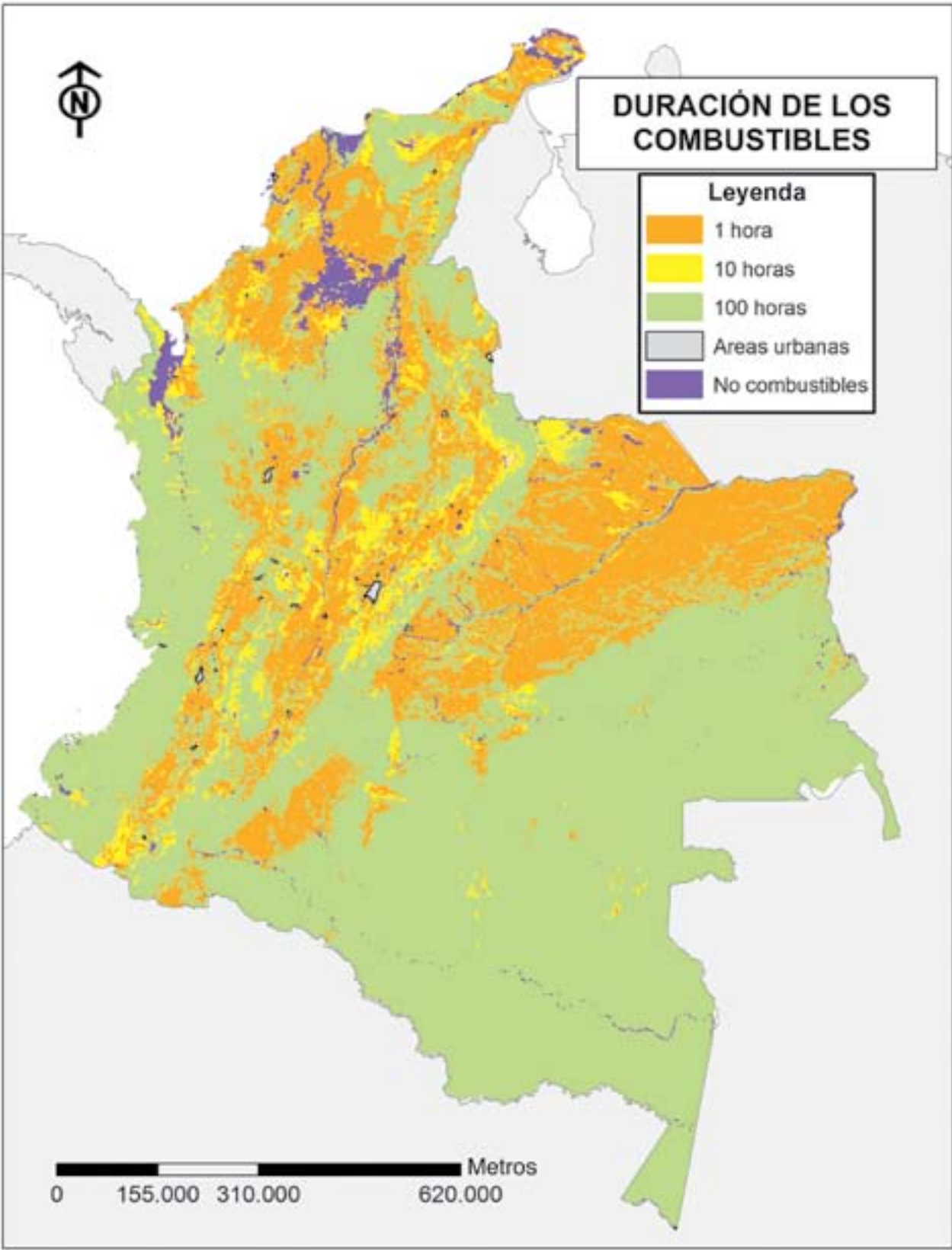
Carga total de combustibles

La carga total de combustibles se expresó en el presente modelo en términos de los valores obtenidos a partir de la suma del peso ponderado de cuatro factores fundamentales que definen la combustibilidad de la vegetación: altura, cobertura (proyección de la vegetación sobre el suelo), biomasa aérea total y humedad de la vegetación.

Altura de la vegetación

La altura de la vegetación se evaluó en rangos expresados en metros (>0.5, 0.5-2, 2-5, 5-10, 10-30 y < de 30), datos inferidos a partir de la información descriptiva del mapa de ecosistemas de Colombia, los cuales se incorporaron como atributos de las imágenes de satélite interpretadas para este trabajo, para así obtener el mapa de distribución espacial de la altura de la vegetación del país.

Figura 19. Duración de los combustibles



Fuente: elaboración propia.

La importancia de considerar la altura de la vegetación en el desarrollo del modelo de carga total de combustible radica en que a partir de ella es posible inferir tanto la continuidad espacial en el plano vertical como la forma de los combustibles, factores que, como se ha mencionado, son fundamentales en la definición del grado de pirogenicidad de la vegetación. La Figura 20 muestra la distribución espacial de la altura de vegetación para Colombia.

Cobertura de la vegetación

Entendiendo como cobertura el área proyectada por la vegetación sobre el suelo, se determinó este factor como referencia fundamental para la evaluación de la continuidad espacial en el plano horizontal de los combustibles. Esta se categorizó, según los rangos propuestos por Braun-Blanquet, en valores de porcentaje de proyección del follaje sobre el suelo, y se representó espacialmente mediante un mapa generado a partir de la imagen VCF de Modis, previamente corregida geográfica y espectralmente, e interpretada. La Figura 20 presenta la clasificación de los tipos de cobertura en porcentaje, según la escala de Braun-Blanquet para el país.

Con los factores hasta ahora evaluados en la carga total de combustible se pretendió hacer una aproximación al grado de compactación y continuidad espacial de los combustibles en el país, entendida la compactación como el rango de separación entre las partículas combustibles (plantas o grupos de plantas individuales), y como continuidad la proximidad en los planos vertical y horizontal de toda la mancha de vegetación.

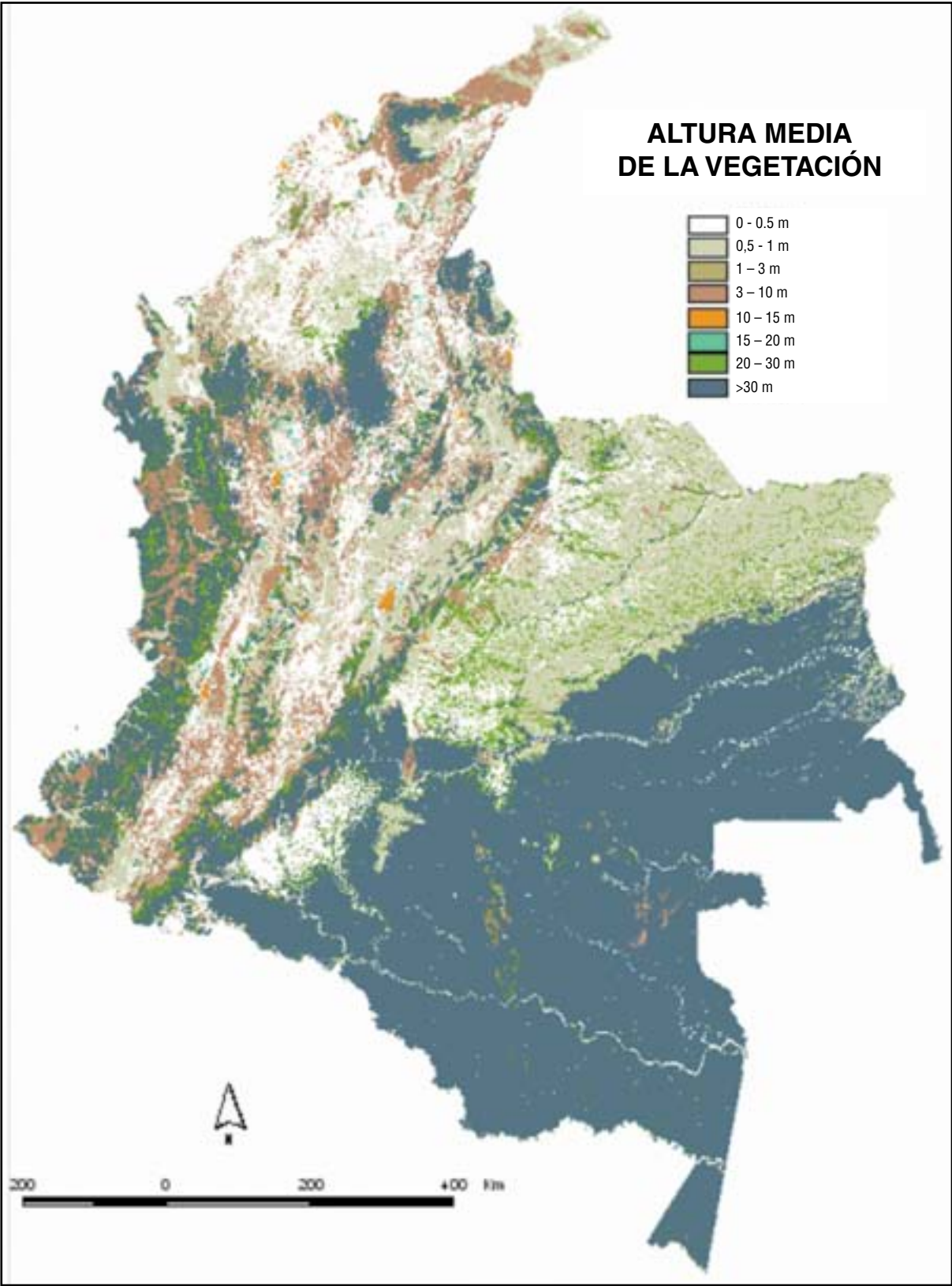
Biomasa aérea total (carga)

A partir de la estimación de la biomasa aérea total de la vegetación de Colombia se definió la cantidad total de combustible (expresada en Toneladas / Hectárea) que posiblemente se queme en un eventual incendio en un lugar determinado del país.

La estimación de la biomasa y el mapa resultante (ver Figura 21, Cuadro 12) se realizaron mediante los siguientes pasos:

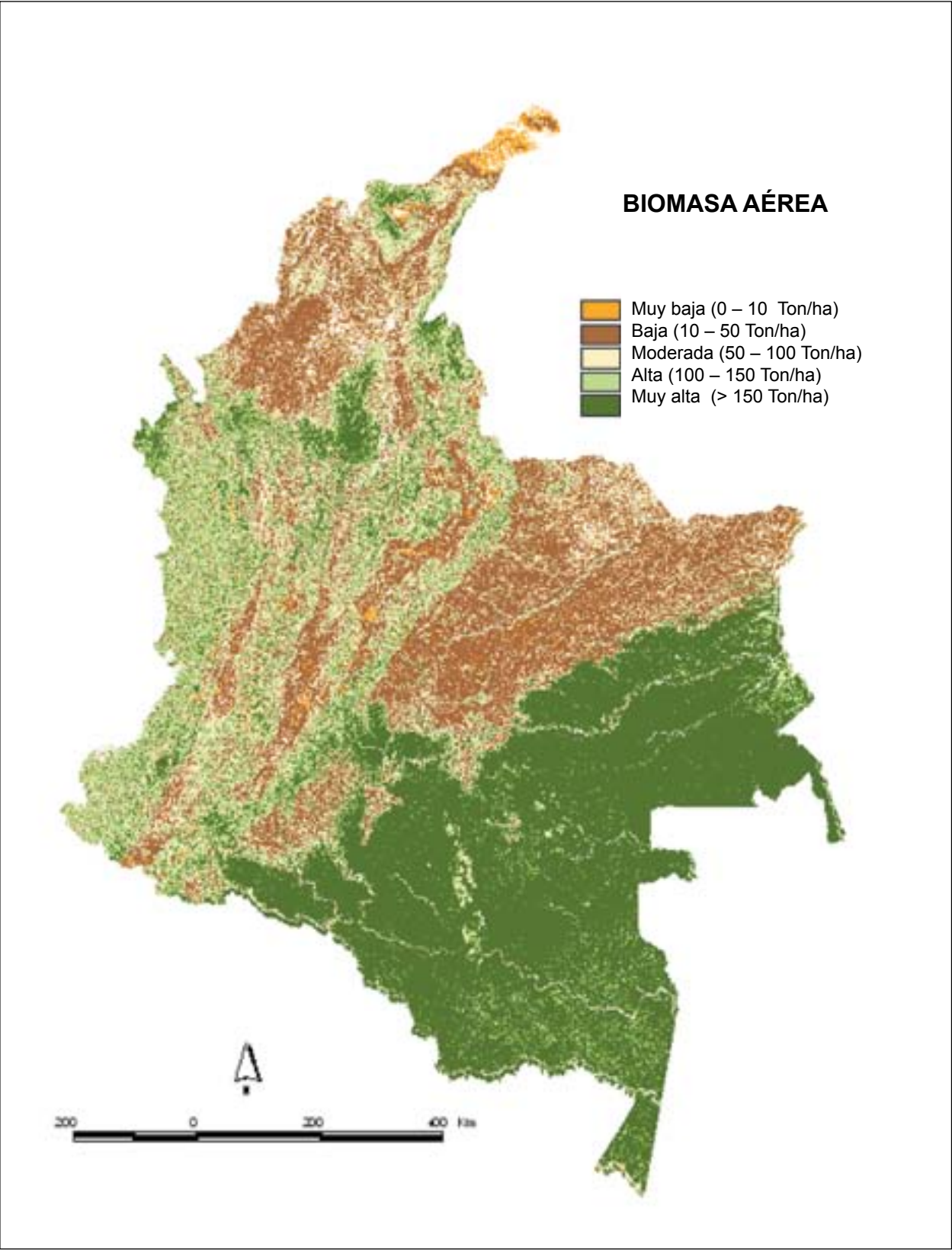
- Consecución de datos de estimación de biomasa para diferentes tipos de vegetación del país realizados por diversos autores.
- Interpretación de la imagen Modis del infrarrojo medio e inversión de sus valores radiométricos (banda que mejor muestra la cantidad de biomasa).
- Normalización de los valores radiométricos de la imagen obtenida mediante la transformación de los datos a través de la raíz cuadrada.
- Realización de un modelo de regresión utilizando los valores radiométricos transformados y normalizados de la banda MIR como variable independiente, además de los valores de biomasa reportados y estimados en el campo por diferentes autores como variable dependiente.
- Aplicación de la ecuación de regresión y extrapolación de datos a la imagen MIR procesada para la obtención del mapa de biomasa.
- Clasificación de los valores de biomasa en rangos cualitativos (muy baja, baja, moderada, alta y muy alta) a partir de una distribución de frecuencias.

Figura 20. Altura media de la vegetación



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Biomasa aérea.



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 12. Estimación de biomasa para diferentes tipos de vegetación del país realizados por diversos autores

Tipo de vegetación	Biomasa total estimada (Tn/ha)	Fuente
Bosque natural (Pacífico)	73.06	Cayado y Niño, 1986
Bosque plantado de Latifoliadas	210	Del Valle, 1985
Bosque plantado de Latifoliadas	109	Lozano y Arévalo, 1972
Bosque plantado de Latifoliadas	125.31	Lozano y Arévalo, 1972
Bosque natural (Caquetá)	60.65	Posada y Guerrero, 1975
Bosque ecuatorial (Tolima)	126	Gutiérrez, 1972
Bosque natural (Carare Opón)	74	Del Valle, 1981
Bosque natural (Bajo Calima)	180	Del Valle, 1981
Bosque natural (Bajo Calima)	120	Del Valle, 1981
Guandal	36.33	Posada, et al, 1973
Canguaral	42.48	Posada, et al, 1973
Bosque mixto	32.59	Posada, et al, 1973
Bosque natural (Carare Opón)	182	De las Salas, 1978
Bosque secundario (Pacífico)	173	Rodríguez, 1980
Manglar (Pacífico)	143	Inderena, 1984
Catival	182	Muñoz, 1966
Bosques de colinas bajas (Pacífico)	152.3	Rojas, 1974
Bosques de colinas bajas (Pacífico)	127.9	Ladrach, 1985
Bosques de colinas bajas (Pacífico)	108.0	Mazuera, 1979
Bosques de colinas bajas (Pacífico)	127.9	Rodríguez, 1987
Bosques de colinas bajas (Pacífico)	120	Inderena, 1985

Fuente: elaboración propia.

Humedad de la vegetación

A partir de la estimación cualitativa del contenido de humedad de la vegetación se pretendió establecer la cantidad de agua de la humedad atmosférica, del suelo y de las precipitaciones absorbida o captada por los combustibles, lo cual aunado a los factores anteriormente anotados, conforma la carga total (cantidad disponible) de combustibles. Para estimar el contenido de humedad se utilizó el NDII (Índice Normalizado del Infrarrojo) obtenido a partir de las bandas MIR (infrarrojo medio) y NIR (infrarrojo cercano) que se consiguieron con la interpretación y generación de imágenes de trabajo; posteriormente, los valores del NDII se agruparon cualitativamente en rangos de humedad de la vegetación muy baja, baja, moderada, alta y muy alta (ver Figura 22).

Carga total

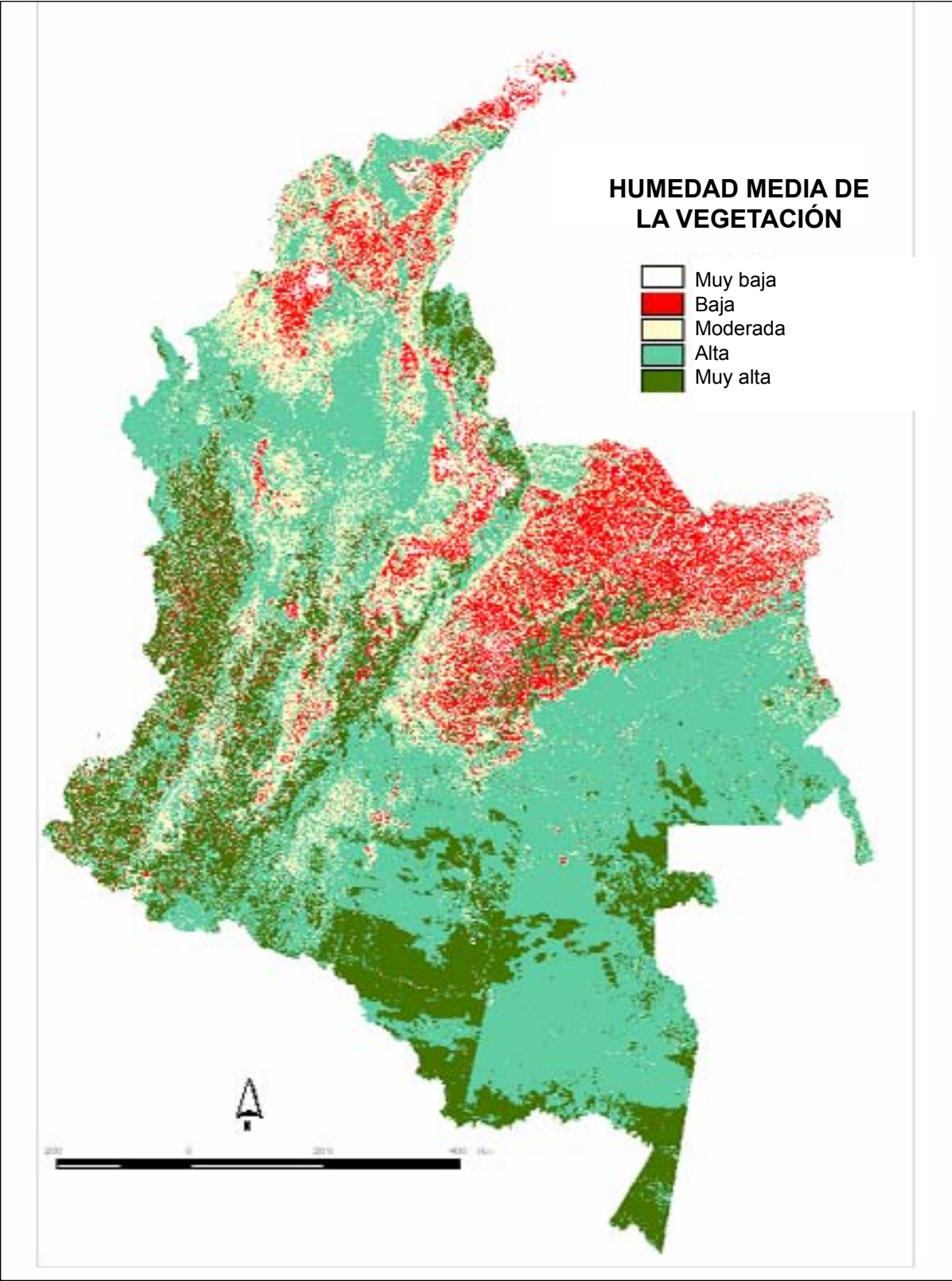
Con la información obtenida de altura, cobertura, biomasa y humedad de la vegetación se procedió a generar un modelo de estimación de la carga total de combustibles mediante la aplicación de un análisis multicriterio.

El análisis multicriterio utilizado permitió, al disminuir la carga de subjetividad, dar valores a cada una de las variables para obtener una suma ponderada de ellas y un valor de carga total.

Los valores de ponderación hallados para cada variable, con una consistencia aceptable matemáticamente y un error del 0.08%, fueron los siguientes:

- Altura: 0.3235.
- Cobertura: 0.1452.
- Biomasa: 0.2137.
- Humedad: 0.10 74.

Figura 22. Humedad Media de la Vegetación



Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, la ecuación empleada fue la siguiente:

Carga total combustibles =

$$\sum [(Altura \times 0.3235) + (Cobertura \times 0.1452) + (Biomasa \times 0.2137) + (Humedad \times 0.1074)]$$

Dichos valores se aplicaron a la imagen MIR transformada y se obtuvo el mapa de carga total de combustibles; posteriormente éste se reclasificó en rangos cualitativos de carga baja, moderada y alta (ver Figura 23).

Condición pirogénica de la vegetación

Con la información recopilada y mediante una clasificación jerárquica estructurada como se referencia al inicio del presente capítulo se obtuvo el modelo general de combustibles que se muestra en el Cuadro 13.

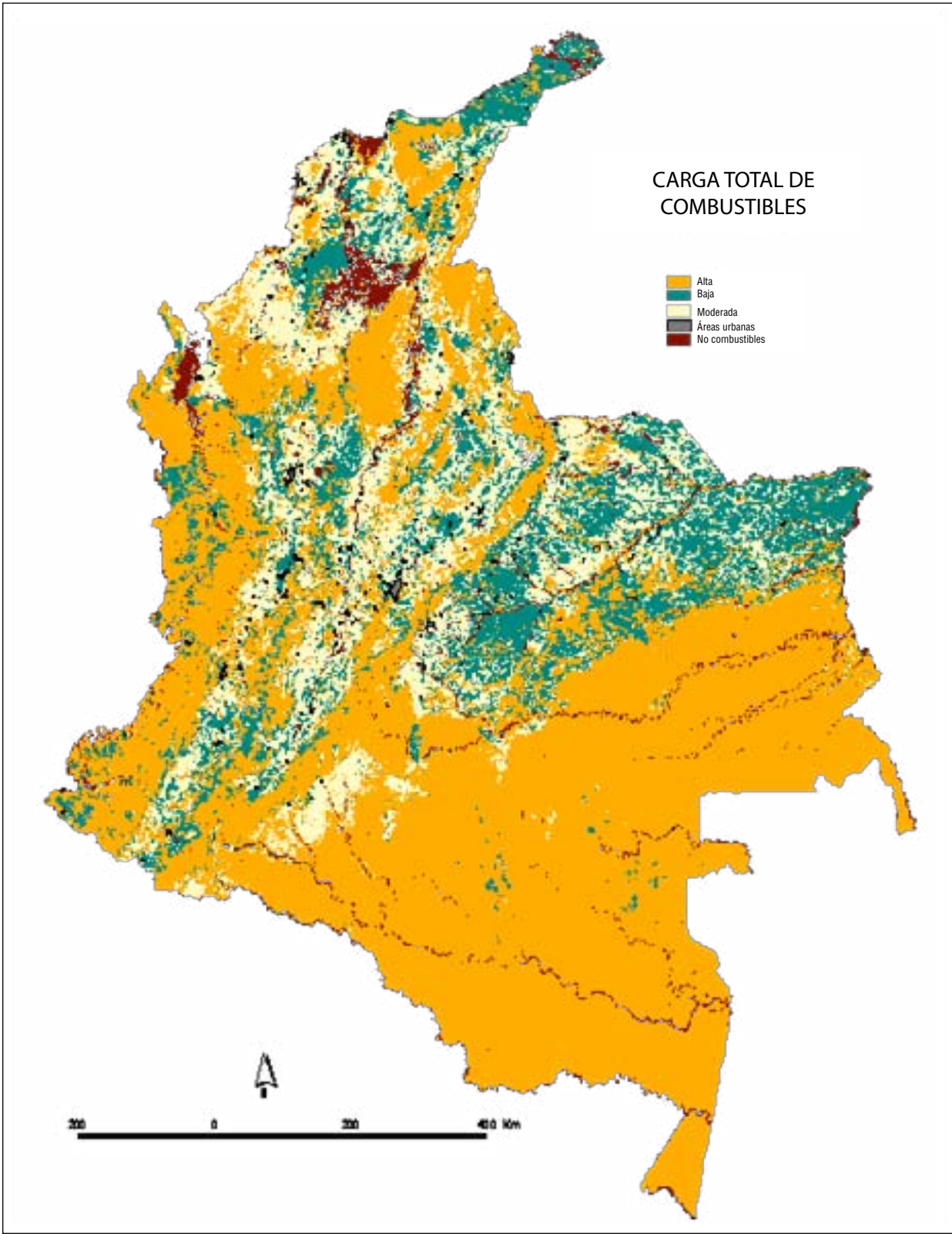
El modelo de combustibles obtenido y especializado de esta manera representa la condición pirogénica de la vegetación colombiana, aspecto clave tanto para determinar el comportamiento de nuestros ecosistemas frente al fuego, como para poder modelar el comportamiento del fuego en ellos. De igual forma, este modelo y su

Cuadro 13. Modelo de combustibles (condición pirogénica de la vegetación colombiana)

Influencia del fuego sobre los ecosistemas	Combustible dominante	Duración combustible (horas)	Carga total combustible
Áreas urbanas	Áreas urbanas	Áreas urbanas	Moderada
Dependientes	Pastos / hierbas	1 hora	Alta
			Baja
			Moderada
Independientes	Arbustos	10 horas	Alta
		100 horas	Baja
	Hierbas	10 horas	Moderada
	Arbustos y árboles	10 horas	Alta
Influidos			Baja
			Moderada
		100 horas	Alta
			Baja
			Moderada
	Hierbas	1 hora	Alta
			Moderada
		10 horas	Alta
			Moderada
	Pastos	1 Hora	Alta
	Árboles	100 horas	Alta
			Baja
Sensibles			Moderada
	Arbustos	1 hora	Alta
	Hierbas	1 hora	Baja
	Pastos	1 hora	Baja
			Baja
			Moderada

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Carga total de combustibles.



Fuente: elaboración propia.

mapa respectivo permiten conocer la susceptibilidad de la vegetación a incendios de la cobertura vegetal, cuando se correlaciona, se analiza y se reclasifica esta información con los factores climáticos de mayor incidencia en la combustibilidad (temperaturas ambientales, precipitación, humedad del suelo); factores que a pesar de ser externos a la vegetación inciden de una manera directa en ella al propiciar variaciones fisiológicas y fenológicas en su estado, las cuales modifican la condición intrínseca de la vegetación y por ende generan variabilidad espacial, temporal y estacional de los combustibles vegetales.

Susceptibilidad de las coberturas vegetales de Colombia a la ocurrencia de incendios

Generalidades

La susceptibilidad de las coberturas vegetales son las características intrínsecas de la vegetación y de los ecosistemas, dadas principalmente por la cantidad de combustible disponible, su distribución y el grado de combustibilidad que posee, que le brindan cierto grado de probabilidad tanto de sufrir daños como de resistir y de recuperarse ante un evento particular (incendio).

La clasificación y la posterior calificación de la susceptibilidad de la vegetación o de la cobertura vegetal a incendios forestales se realizaron a partir de la información obtenida del análisis de la condición pirogénica de la vegetación colombiana. Para ello, se llevó a cabo una calificación de los factores de mayor relevancia que caracterizaron la condición pirogénica, las cuales tienen una

alta importancia en el establecimiento de la susceptibilidad.

Los factores incluidos en este procedimiento fueron calificados en un rango de 1 a 5, y se otorgó los mayores valores a aquellos factores que inducen a que exista una mayor susceptibilidad, como se presenta a continuación:

a) Influencia del fuego sobre los ecosistemas.		b) Tipo de combustibles	
No combustibles	1	Árboles	2
Áreas Urbanas	1	Árboles y arbustos	3
Independientes	2	Arbustos	4
Sensibles	3	Hierbas	5
Influidos	4	Pastos / hierbas	6
Dependientes	5	Pastos	7
		No combustibles	1
		Áreas urbanas	1
c) Duración de los combustibles		d) Carga total de combustible	
No combustibles	1	No combustibles	1
Áreas urbanas	1	Áreas urbanas	1
100 horas	2	Baja	2
10 horas	3	Moderada	3
1 hora	4	Muy Alta	4

Una vez asignada la respectiva calificación se calculó el producto entre cada una de ellas. El resultado se agrupó en cinco categorías, mediante una distribución de frecuencias, y posteriormente a cada grupo se le asignó una calificación que varía entre susceptibilidad muy baja a susceptibilidad muy alta, con base en la siguiente ecuación:

$SUSC = CAL(if) * CAL(tc) * CAL(dc) * CAL(ct)$

Donde:

SUSC: susceptibilidad de la vegetación (susceptibilidad bruta).

CAL(if): calificación por influencia del fuego sobre los ecosistemas.

$CAL(tc)$: calificación por tipo de combustible.

$CAL(dc)$: calificación de la duración de los combustibles.

$CAL(ct)$: calificación de la carga total de combustibles.

Teniendo en cuenta que la susceptibilidad bruta de la vegetación se ve afectada por factores externos de tipo climático íntimamente ligados a ella y que producen variaciones intrínsecas de sus cualidades, principalmente en lo que hace referencia a la humedad contenida en los tejidos vegetales (influida directamente por la precipitación, la humedad del suelo y la temperatura ambiental), se consideró necesario generar una calificación de la susceptibilidad con las condiciones normales de precipitación y temperatura imperantes en el país. Para ello se efectuó un procedimiento similar al de la calificación de la susceptibilidad bruta, a la que se adicionaron los factores de precipitación y temperatura, con los cuales se caracterizaron climáticamente los ecosistemas colombianos (Ideam, 2007), de la siguiente manera:

a) Precipitación		b) Temperatura	
Árido	1	Nival	1
Pluvial	1	Extremadamente frío	2
Muy húmedo	2	Muy frío	3
Húmedo	3	Frío	4
Seco	4	Templado	5
Muy seco	5	Cálido	6

De esta manera la susceptibilidad en condiciones normales de precipitación y temperatura se calificó utilizando la siguiente ecuación, y posteriormente se agrupó en rangos de frecuencia de la misma forma utilizada para la susceptibilidad bruta:

$$SUSC = CAL(if) * CAL(tc) * CAL(dc) * CAL(ct) * CAL(ppt) * CAL(t)$$

Donde:

SUSC: susceptibilidad de la vegetación (susceptibilidad bruta).

$CAL(if)$: calificación por influencia del fuego sobre los ecosistemas.

$CAL(tc)$: calificación por tipo de combustible.

$CAL(dc)$: calificación de la duración de los combustibles.

$CAL(ct)$: calificación de la carga total de combustibles.

$CAL(ppt)$: calificación de la precipitación.

$CAL(t)$: calificación de la temperatura.

Como es bien conocido, el clima imperante en Colombia presenta ciertas anomalías a través del tiempo. Entre dichas anomalías el Fenómeno de El Niño es el que mayor incidencia tiene en la generación de incendios de la cobertura vegetal en ciertas zonas del país. Por esta razón, fue conveniente analizar la susceptibilidad teniendo en cuenta las variaciones espaciales de precipitación y temperatura que esta anomalía climática genera en el territorio colombiano.

Para este análisis se tomó la información producida por el Ideam (2005) y se calificó la susceptibilidad mediante el empleo de la matriz cruzada (ver Cuadro 14).

Susceptibilidad de los ecosistemas según la influencia que el fuego juega sobre ellos

Excluyendo las coberturas clasificadas como no combustibles y áreas urbanas (las

Cuadro 14. Variaciones en la precipitación bajo el fenómeno de “El Niño”

Susceptibilidad Bruta	Variaciones en la PPT bajo el Fenómeno de El Niño				
	Déficit severo	Déficit	Normal	Exceso	Exceso severo
Muy baja	Moderada	Moderada	Muy baja	Muy baja	Muy baja
Baja	Baja	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja
Moderada	Alta	Alta	Moderada	Baja	Baja
Alta	Muy alta	Muy alta	Alta	Moderada	Baja
Muy alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Alta	Moderada

Fuente: elaboración propia.

cuales tienen un extensión aproximada de 22.472 km², 1.97% de la superficie del país), las áreas con susceptibilidad baja son las de mayor extensión, pues ocupan un área de 668.938 km² (58.99%); las siguen las de susceptibilidad alta, con 210.494 km² (18.44%). Las categorías muy alta, moderada y muy baja, con áreas de 57.625 km², 79.676 km² y 75.582 km², respectivamente, son las que tienen una menor extensión en el país (ver Cuadro 15).

Es importante anotar que las áreas con muy altas susceptibilidades brutas corresponden -como era de esperarse- a los ecosistemas dependientes del fuego conformados principalmente por las áreas de pastizales y herbazales de la Orinoquia y la Amazonia colombiana. No obstante, llama la atención que el aporte a las altas y moderadas susceptibilidades en áreas de los ecosistemas influidos por el fuego es bastante representativa, por lo que son necesarios el control y la prevención constantes en estos ecosistemas, los cuales conforman las zonas de producción agropecuaria del país. Adicionalmente, con las prácticas culturales de roza y quema, estos ecosistemas son altamente vulnerables a los incendios de la cobertura vegetal (ver Figura 24).

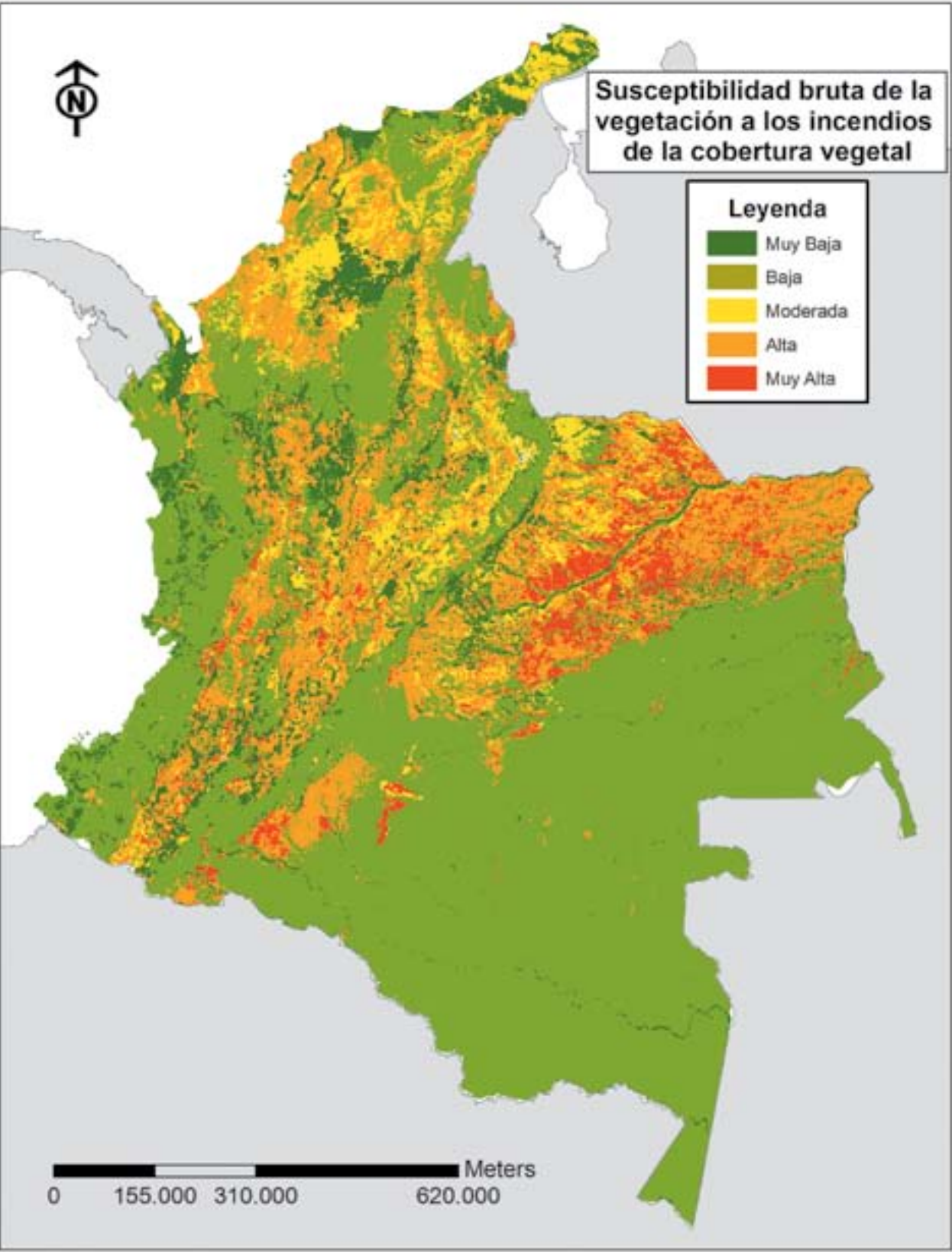
Cuadro 15. Susceptibilidad por tipo de ecosistemas según la influencia por el fuego

Susceptibilidad	Tipo de ecosistemas según influencia	Área (km²)
Muy Alta	Dependientes Influidos	39623.208 18001.807
Total muy alta		57625.015
Alta	Dependientes Influidos Sensibles	54305.41 31333.332 124855.618
Total alta		210494.36
Moderada	Influidos Sensibles	33724.806 45952.086
Total moderada		79676.892
Baja	Independientes Influidos Sensibles	11181.479 7422.677 650334.235
Total baja		668938.391
Muy baja	Independientes Sensibles	9466.197 66116.535
Total muy baja		75582.732
Total general		1092317.39

Fuente: elaboración propia.

Al considerar el régimen normal de precipitación y de temperatura imperante en el país (medias multianuales) y a pesar de ser estos factores externos a la vegetación, se puede determinar que ellos tienen una incidencia directa sobre las condiciones intrínsecas de la cobertura vegetal, lo cual genera variaciones en la probabilidad de que sufra daños o que sea más o menos resistente a los incendios.

Figura 24. Susceptibilidad bruta de la vegetación a los incendios de la cobertura vegetal.



Fuente: elaboración propia.

En el Cuadro 16 se puede observar, con respecto a la susceptibilidad bruta, que hay una gran variación tanto en el área de cada grupo de susceptibilidades como en el área de los tipos de ecosistemas según la influencia del fuego que se engloban en las diferentes categorías de susceptibilidad. Así, las áreas de susceptibilidades bajas y muy bajas aumentan considerablemente su extensión frente a las demás; adicionalmente, se aprecia que, teniendo en cuenta los efectos de la distribución espacial de la lluvia y la temperatura, no se agrupan de una manera coherente los ecosistemas por la influencia del fuego, sino que algunos típicamente influidos bajan en parte su grado de susceptibilidad, así como otros que no son influidos directamente (ecosistemas sensibles al fuego e independientes del fuego) aumentan o disminuyen de susceptibilidad (ver Figura 25)

Es bien sabido que durante las épocas en las cuales se presenta la anomalía climática del fenómeno de El Niño la susceptibilidad de la vegetación en ciertas áreas del país, como en la región Andina, aumenta considerablemente por efecto de las sequías prolongadas y por el incremento de la temperatura e insolación (ver Cuadro 17 y Figura 26).

Al realizar el análisis de la susceptibilidad en estas condiciones se aprecia que en el mundo el comportamiento tiene pequeñas variaciones frente al régimen normal de lluvias y temperaturas. Aunque la variación en el área de las diferentes categorías de susceptibilidad no es significativa, sí lo es en la distribución espacial. Este hecho se evidencia en que muchas de las áreas que en un régimen

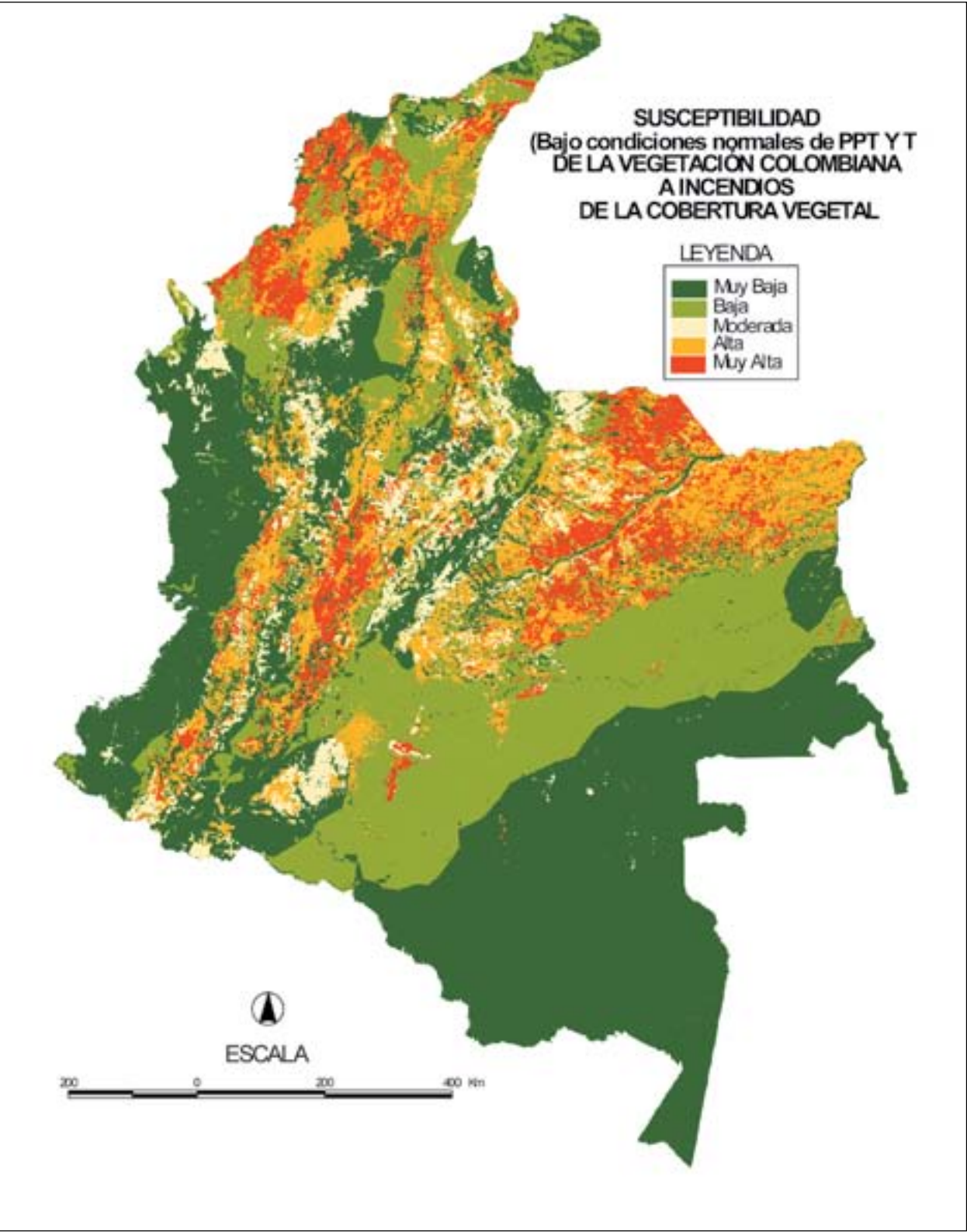
Cuadro 16. Susceptibilidad en condiciones normales de Precipitación (PPT) y Temperatura (T) por tipo de ecosistemas según la influencia por el fuego

Susceptibilidad en condiciones normales de PPT y T	Tipo de ecosistemas según influencia	Área (km²)
Muy alta	Dependientes	42.768.277
	Independientes	249.162
	Influidos	20.179.887
	Sensibles	37.589.432
Total muy alta		100.786.758
Alta	Dependientes	50.764.723
	Influidos	24.899.889
	Sensibles	83.686.741
Total alta		159.351.353
Moderada	Dependientes	395.618
	Independientes	233.032
	Influidos	35.138.578
	Sensibles	44.919.622
Total moderada		80.686.85
Baja	Independientes	9.280.751
	Influidos	9.464.229
	Sensibles	266.384.952
Total baja		285.129.932
Muy baja	Independientes	10.884.731
	Influidos	800.039
	Sensibles	454.677.727
Total muy baja		466.362.497
Total general		1.092.317.39

Fuente: elaboración propia.

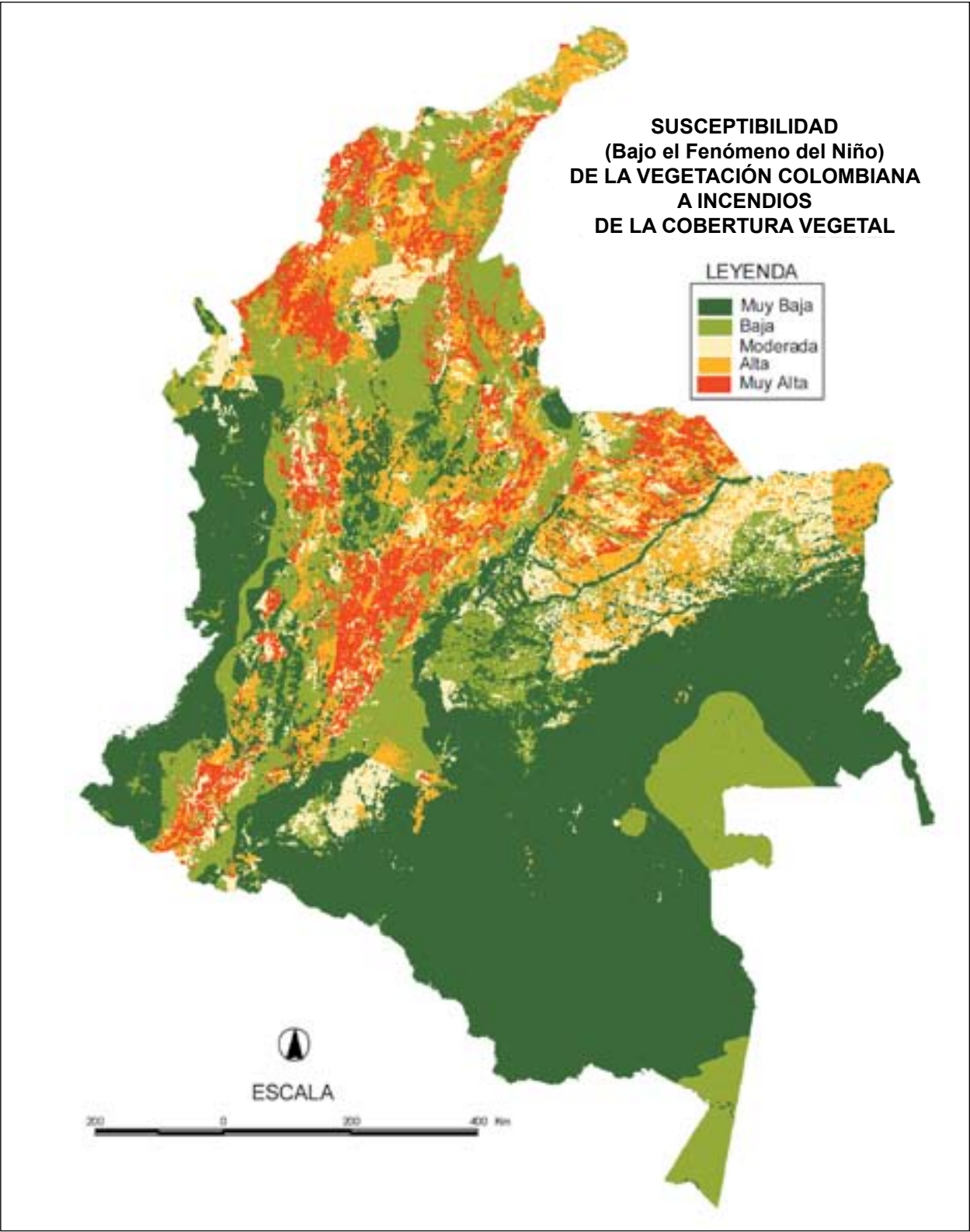
normal o al considerar la susceptibilidad bruta presentan susceptibilidades altas pasan a las categorías bajas y viceversa; esto se debe a la variabilidad especial que el fenómeno de El Niño induce en la distribución de las lluvias y de las temperaturas en el país (ver Figura 27).

Figura 25. Susceptibilidad en condiciones normales de precipitación (PPT) y temperatura (T) de la vegetación a los incendios de la cobertura vegetal



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Susceptibilidad por el fenómeno de El Niño de la vegetación a los incendios de la cobertura vegetal



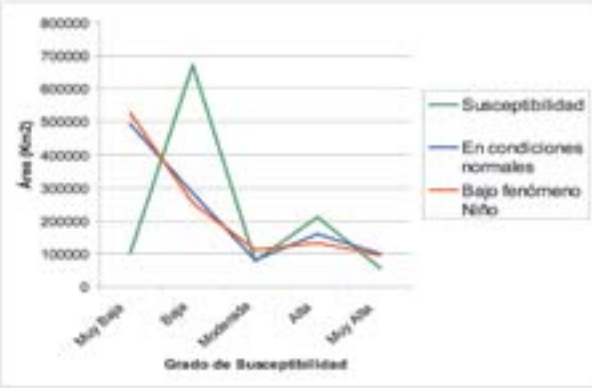
Fuente: elaboración propia.

Cuadro 17. Susceptibilidad por el fenómeno de El Niño por tipo de ecosistemas según la influencia por el fuego

Susceptibilidad en condiciones de anomalía climática (Fenómeno El Niño)	Tipo de ecosistemas según influencia	Área (km²)
Muy alta	Dependientes	12424.733
	Influidos	24049.937
	Sensibles	59299.637
Total muy alta		95774.307
Alta	Dependientes	38861.895
	Influidos	31726.156
	Sensibles	63341.202
Total alta		133929.253
Moderada	Dependientes	34744.144
	Independientes	5576.767
	Influidos	17994.645
	Sensibles	39957.82
Total moderada		98273.376
Baja	Dependientes	7897.846
	Independientes	8413.618
	Influidos	14144.454
	Sensibles	219204.843
Total baja		249660.761
Muy baja	Independientes	6657.291
	Influidos	2567.43
	Sensibles	505454.972
Total muy baja		514679.693
Total general		1092317.39

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Susceptibilidad comparativa de los ecosistemas según la influencia por el fuego



Grado de susceptibilidad de los biomas colombianos a los incendios de la cobertura vegetal

Susceptibilidad muy alta

Al realizar un análisis por el grado de susceptibilidad de los biomas colombianos se encontró que áreas representativas de los biomas amazónicos y de la Orinoquia (peinobioma, helobioma y zonobioma húmedo tropical de la Amazonia-Orinoquia) son las que presentan, en superficie, los valores más altos. Otros biomas del país categorizados en este rango de alto aporte al área de muy alta susceptibilidad son los orobiomas bajo y alto de los Andes (ver Cuadro 18).

Como se mencionó, los biomas amazónicos afectados en esta categoría de susceptibilidad corresponden a las extensas zonas de herbazales y pastizales que conforman las sabanas de los Llanos Orientales y las áreas sin predominio de cobertura selvática de la Amazonia. En cuanto a los orobiomas de la zona andina, estas áreas se ven altamente representadas por los diferentes agroecosistemas del cinturón subandino, al igual que los del cinturón altoandino; se incluyen en este último las áreas de herbazales, pajonales, pastizales y bosques bajos de las zonas altoandinas y de páramo del territorio nacional.

Al considerar como factor determinante de la susceptibilidad las condiciones brindadas por un régimen normal de lluvias y temperatura se observa que existe un aumento de 420.000 km² en el área total de los biomas incorporados en la categoría muy alta (ver Cuadro 19).

El aumento de área en esta clase de susceptibilidad se debe a que en ciertas zonas las condiciones normales del clima (medias mul-

Cuadro 18. Susceptibilidad muy alta por bioma

Susceptibilidad	Bioma	Área (km²)
Muy Alta	Halobioma Caribe	22.848
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	9397.344
	Helobioma Andinos	2.484
	Helobioma Magdalena-Caribe	158.19
	Helobioma R. Zulia	34.927
	Helobioma Valle del Cauca	75.928
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	950.595
	Orobioma Alto Andes	1141.258
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	2.35
	Orobioma Andes Santa Marta	2.5
	Orobioma Bajo Andes	5677.084
	Orobioma Macarena	14.455
	Orobioma Medio Andes	3298.6
	Orobioma San Lucas	47.759
	Orobioma Sub Andes Santa Marta-Macuire	11.217
	OrobiomaAz Cúcuta	95.619
	OrobiomaAz R. Dagua	12.372
	OrobiomaAz R. Sogamoso	3.83
	OrobiomaAz Valle del Patía	132.188
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	31593.415
	ZAST Alto Magdalena	833.653
	ZAST Valle del Cauca	312.58
	ZHT Amazonia-Orinoquia	3337.806
	ZHT Catatumbo	156.533
	ZHT Magdalena-Caribe	189.312
	ZHT Pacífico-Atrato	54.238
	ZST Caribe	65.93
TOTAL GENERAL		57625.015

Fuente: elaboración propia.

tianuales) se ven afectadas tanto por déficit de precipitación como por estar sometidas a temperaturas medias anuales altas.

Adicionalmente, el incremento en el área total de la categoría se da por la incorporación de sectores de otros biomas que según la consideración de la susceptibilidad bruta no se agrupan en esta clase. Los biomas que ingresan en esta categoría son los siguientes:

- Áreas de los helobiomas de la Guajira y el Pacífico-Atrato.
- Áreas de los orobiomas del Baudó-Darién y medio de los Andes.

Cuadro 19. Susceptibilidad muy alta por bioma en condiciones normales de precipitación (PPT) y temperatura (T)

Susceptibilidad en condiciones normales de PPT y T	Tipo de ecosistemas según influencia	Área (km²)
Muy Alta	Halobioma Caribe	425.666
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	10842.98
	Helobioma Andinos	28.037
	Helobioma Guajira	8.834
	Helobioma Magdalena-Caribe	4648.503
	Helobioma Pacífico-Atrato	0.5
	Helobioma R. Zulia	34.927
	Helobioma Valle del Cauca	161.713
	Litobioma Amazoniaia Orinoquia	759.674
	Orobioma Alto Andes	493.18
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	2.193
	Orobioma Andes Santa Marta	41.899
	Orobioma Bajo Andes	14166.128
	Orobioma Baudó-Darién	5.639
	Orobioma Macarena	11.134
	Orobioma Medio Andes	3175.102
	Orobioma San Lucas	268.264
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuire	716.939
	OrobiomaAz Cúcuta	329.75
	OrobiomaAz R. Dagua	26.285
	OrobiomaAz R. Sogamoso	29.832
	OrobiomaAz Valle del Patía	558.069
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	34261.437
	ZAST Alto Magdalena	5257.776
	ZAST Valle del Cauca	633.243
	ZDT Guajira-Santa Marta	54.535
	ZHT Amazonia -Orinoquia	1223.867
	ZHT Catatumbo	154.287
	ZHT Magdalena-Caribe	257.734
	ZHT Pacífico-Atrato	0.304
	ZST Caribe	22208.327
TOTAL GENERAL		100786.758

Fuente: elaboración propia.

- Algunas áreas del zonobioma de desierto tropical de la Guajira y Santa Marta.

Al incorporar en el análisis los efectos de una anomalía climática como la del Fenómeno de El Niño se observa que en el país el área clasificada como de muy alta susceptibilidad a los incendios permanece aproximadamente constante (con una leve reducción). Sin embargo, es de alta importancia anotar que biomas que por sus

características intrínsecas (susceptibilidad bruta) o con un régimen normal de PPT y T no presentaban valores significativos en lo que se refiere al área afectada por la clase, con las condiciones del fenómeno de El Niño adquieren alta significancia.

Como se observa en el Cuadro 20 los biomas que se ven mayormente afectados en estas condiciones son los siguientes:

- Orobiomas andinos (alto, medio y bajo).
- Zonobioma seco tropical del Caribe.

Cuadro 20. Susceptibilidad muy alta

Susceptibilidad en condiciones de anomalía climática (fenómeno deEl Niño)	Bioma	Área (km²)
Muy Alta	Halobioma Caribe	457.591
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	5.046.797
	Helobioma Andinos	212.966
	Helobioma Guajira	26.833
	Helobioma Magdalena-Caribe	5.870.54
	Helobioma Pacífico-Atrato	12.077
	Helobioma R. Zulia	34.927
	Helobioma Valle del Cauca	128.552
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	248.069
	Orobioma Alto Andes	6.599.099
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	144.377
	Orobioma Andes Santa Marta	235.378
	Orobioma Bajo Andes	20.652.654
	Orobioma Baudó-Darién	11.493
	Orobioma Medio Andes	14.428.274
	Orobioma San Lucas	628.956
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuirá	1.202.327
	OrobiomaAz Cúcuta	216.351
	OrobiomaAz R. Sogamoso	69.938
	OrobiomaAz Valle del Patía	594.196
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	8.685.684
	ZAST Alto Magdalena	4.641.686
	ZAST Valle del Cauca	410.041
	ZDT Guajira-Santa Marta	264.779
	ZHT Amazonia-Orinoquia	664.53
	ZHT Catatumbo	260.228
	ZHT Magdalena-Caribe	3.320.372
	ZHT Pacífico-Atrato	16.925
	ZST Caribe	20.688.667
	TOTAL MUY ALTA	95.774.307

Fuente: elaboración propia.

Susceptibilidad alta

Las áreas agrupadas en el rango de susceptibilidad alta para la vegetación tienen el segundo lugar en cuanto a la superficie ocupada del país, después de las de susceptibilidad baja. En esta categoría sobresalen aquellos biomas dependientes del fuego y los influidos por él. De tal manera, los ecosistemas herbáceos y de pastizales pertenecientes a los biomas correspondientes a las regiones de la Orinoquia y la Amazonia presentan las mayores extensiones. Por otra parte, los agroecosistemas del bioma andino bajo ocupan el segundo valor en importancia para la categoría (ver Cuadro 21).

Cuadro 21. Susceptibilidad alta por bioma

Susceptibilidad	Bioma	Área (km²)
Alta	Halobioma Caribe	435.278
	Halobioma Pacífico	71.363
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	25046.442
	Helobioma Andinos	210.482
	Helobioma Guajira	26.833
	Helobioma Magdalena-Caribe	8350.018
	Helobioma Pacífico-Atrato	1107.185
	Helobioma R. Zulia	62.003
	Helobioma Valle del Cauca	765.39
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	2052.309
	Orobioma Alto Andes	9358.867
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	171.514
	Orobioma And Santa Marta	237.088
	Orobioma Bajo Andes	34166.304
	Orobioma Baudó-Darién	368.495
	Orobioma Macarena	151.325
	Orobioma Medio Andes	17817.426
	Orobioma San Lucas	589.747
	Orobioma SubAnd Santa Marta-Macuirá	1231.579
	OrobiomaAz Cúcuta	250.38
	OrobiomaAz R. Dagua	28.437
	OrobiomaAz R. Sogamoso	69.777
	OrobiomaAz Valle del Patía	679.296
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	48877.55
	ZAST Alto Magdalena	5636.943
	ZAST Valle del Cauca	2721.538
	ZDT Guajira-Santa Marta	264.779
	ZHT Amazonia-Orinoquia	13719.116
	ZHT Catatumbo	583.088
	ZHT Magdalena-Caribe	12276.909
	ZHT Pacífico-Atrato	1380.407
	ZST Caribe	21786.492
	TOTAL GENERAL	210494.36

Fuente: elaboración propia.

Considerando un régimen normal de precipitación y temperatura anual, algunas zonas de los biomas clasificados en la categoría de susceptibilidad alta, a excepción del halobioma del Pacífico, se mantienen en esta clase. No obstante, se nota una disminución en el área total ocupada, ya que existe una disminución leve pero importante de las áreas de los biomas amazónicos y orinocenses representadas (ver Cuadro 22).

Bajo la influencia del fenómeno de El Niño las áreas ocupadas por los biomas colombianos clasificados en la categoría alta presentan un comportamiento similar a las categorizadas como muy altas. Hay una leve disminución del área total por la reducción de áreas de algunos biomas, principalmente de los pertenecientes al gran bioma húmedo tropical, y un incremento significativo en todos y cada uno de los orobiomas andinos. (ver Cuadro 23).

Susceptibilidad moderada

Las áreas pertenecientes a los biomas de susceptibilidad moderada presentan algunas variaciones con respecto a las de susceptibilidad muy alta y alta (ver Cuadros 24, 25 y 26). En esta clase el área ocupada al considerar la susceptibilidad bruta es la mayor, con 133.929 km², pero desciende a 79.676 km² en condiciones normales de PPT y T, y con el fenómeno de El Niño tiene un ascenso superficial, a 110.453 km².

Estas variaciones se deben al aumento del área ocupada, en condiciones normales de PPT y T con respecto a la susceptibilidad bruta, por los siguientes biomas:

Cuadro 22. Susceptibilidad alta por bioma en condiciones normales de precipitación y temperatura. (PT y T)

Susceptibilidad en condiciones normales PPT y T	Tipo de ecosistemas según influencia	Área (km²)
Alta	Halobioma Caribe	128.251
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	22196.052
	Helobioma Andinos	210.184
	Helobioma Guajira	0.24
	Helobioma Magdalena-Caribe	7377.591
	Helobioma Pacífico-Atrato	0.639
	Helobioma R. Zulia	62.003
	Helobioma Valle del Cauca	706.729
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	1916.457
	Orobioma Alto Andes	3234.86
	Orobioma AltoAndes Santa Marta	6.464
	Orobioma Andes Santa Marta	188.769
	Orobioma Bajo Andes	23394.737
	Orobioma Baudó-Darién	141.176
	Orobioma Macarena	125.821
	Orobioma Medio Andes	11794.633
	Orobioma San Lucas	379.009
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuirá	704.151
	OrobiomaAz Cúcuta	146.361
	OrobiomaAz R. Dagua	26.272
	OrobiomaAz R. Sogamoso	96.293
	OrobiomaAz Valle del Patía	304.262
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	45171.311
	ZAST Alto Magdalena	2284.196
	ZAST Valle del Cauca	2470.561
	ZDT Guajira-Santa Marta	29.753
	ZHT Amazonia-Orinoquia	9550.232
	ZHT Catatumbo	365.493
	ZHT Magdalena-Caribe	9604.564
	ZHT Pacífico-Atrato	173.961
	ZST Caribe	16.560.328
	TOTAL GENERAL	159.351.353

Fuente: elaboración propia.

- Helobioma Amazonia – Orinoquia.
- Peinobioma Amazonia – Orinoquia.
- Orobiomas bajo y altoandinos.
- Zonobioma húmedo tropical amazónico.

Estas variaciones también se deben a la reducción considerable del área de los biomas:

Cuadro 23. Susceptibilidad alta por bioma por el fenómeno de El Niño

Susceptibilidad en condiciones de anomalía climática (fenómeno de El Niño)	Bioma	Área (km²)
Alta	Halobioma Caribe	157.757
	Halobioma Pacífico	1.07
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	14.973.553
	Helobioma Andinos	75.389
	Helobioma Guajira	369.82
	Helobioma Magdalena-Caribe	6.578.477
	Helobioma Pacífico-Atrato	60.616
	Helobioma R. Zulia	62.003
	Helobioma Valle del Cauca	141.298
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	1.821.107
	Orobioma Alto Andes	7568.03
	Orobioma AltoAndes Santa Marta	348.274
	Orobioma Andes Santa Marta	296.024
	Orobioma Bajo Andes	20.008.098
	Orobioma Baudó-Darién	119.027
	Orobioma Macarena	12.33
	Orobioma Medio Andes	10.994.865
	Orobioma San Lucas	20.464
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuire	1.526.174
	OrobiomaAz Cúcuta	163.112
	OrobiomaAz R. Sogamoso	115.396
	OrobiomaAz Valle del Patía	233.828
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	31.482.088
	ZAST Alto Magdalena	2.793.793
	ZAST Valle del Cauca	1.544.934
	ZDT Guajira-Santa Marta	3.012.898
	ZHT Amazonia-Orinoquia	2.653.46
	ZHT Catatumbo	481.617
	ZHT Magdalena-Caribe	8.067.835
	ZHT Pacífico-Atrato	492.084
	ZST Caribe	17.753.832
TOTAL ALTA		133.929.253

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 24. Susceptibilidad moderada por bioma

Susceptibilidad	Bioma	Área (km²)
Moderada	Halobioma Caribe	160.188
	Halobioma Pacífico	16.228
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	8022.182
	Helobioma Andinos	75.389
	Helobioma Guajira	369.82
	Helobioma Magdalena-Caribe	6231.219
	Helobioma Pacífico-Atrato	218.793
	Helobioma R. Zulia	17.308
	Helobioma Valle del Cauca	35.722
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	30.505
	Orobioma Alto Andes	7678.007
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	391.362
	Orobioma And Santa Marta	292.572
	Orobioma Bajo Andes	9715.021
	Orobioma Baudó-Darién	72.429
	Orobioma Macarena	72.122
	Orobioma Medio Andes	7174.79
	Orobioma San Lucas	51.76
	Orobioma Subandes Santa Marta-Mac	1535.901
	OrobiomaAz Cúcuta	135.412
	OrobiomaAz R. Dagua	14.795
	OrobiomaAz R. Sogamoso	133.167
	OrobiomaAz Valle del Patía	56.685
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	8177.315
	ZAST Alto Magdalena	1427.269
	ZAST Valle del Cauca	312.951
	ZDT Guajira-Santa Marta	3012.898
	ZHT Amazonia-Orinoquia	3398.724
	ZHT Catatumbo	148.328
	ZHT Magdalena-Caribe	2710.389
	ZHT Pacífico-Atrato	807.845
	ZST Caribe	17179.796
TOTAL GENERAL		79676.892

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 25. Susceptibilidad moderada por bioma con condiciones normales de Precipitación y Temperatura (PPT y T)

Susceptibilidad en condiciones normales de PPT y T	Bioma	Área (km²)
Moderada	Halobioma Caribe	47.224
	Halobioma Pacífico	20.392
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	9421.309
	Helobioma Andinos	50.134
	Helobioma Guajira	10.954
	Helobioma Magdalena-Caribe	2814.758
	Helobioma Pacífico-Atrato	1087.467
	Helobioma R. Zulia	17.308
	Helobioma Valle del Cauca	352.31
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	354.257
	Orobioma Alto Andes	11608.328
	Orobioma AltoAndes Santa Marta	330.679
	Orobioma Andes Santa Marta	269.286
	Orobioma Bajo Andes	11918.845
	Orobioma Baudó-Darién	294.109
	Orobioma Macarena	99.445
	Orobioma Medio Andes	13118.873
	Orobioma San Lucas	41.993
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuire	327.905
	OrobiomaAz Cúcuta	13.336
	OrobiomaAz R. Dagua	3.047
	OrobiomaAz R. Sogamoso	93.338
	OrobiomaAz Valle del Patía	5.838
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	9192.158
	ZAST Alto Magdalena	366.885
	ZAST Valle del Cauca	906.577
	ZDT Guajira-Santa Marta	22.083
	ZHT Amazonia-Orinoquia	9681.424
	ZHT Catatumbo	367.259
	ZHT Magdalena-Caribe	5317.614
	ZHT Pacífico-Atrato	1637.137
	ZST Caribe	894.578
TOTAL GENERAL		80686.85

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 26. Susceptibilidad moderada por bioma bajo Fenómeno de El Niño

Susceptibilidad en condiciones de anomalía climática (fenómeno de El Niño)	Bioma	Área (km²)
Moderada	Halobioma Caribe	1023.907
	Halobioma Pacífico	2.214
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	15965.419
	Helobioma Andinos	10.238
	Helobioma Guajira	117.868
	Helobioma Magdalena-Caribe	9448.763
	Helobioma Pacífico-Atrato	2284.415
	Helobioma R. Zulia	17.308
	Helobioma Valle del Cauca	212.869
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	821.27
	Orobioma Alto Andes	6222.744
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	298.093
	Orobioma Andes Santa Marta	43.189
	Orobioma Bajo Andes	11847.786
	Orobioma Baudó-Darién	246.455
	Orobioma Macarena	152.464
	Orobioma Medio Andes	6138.27
	Orobioma San Lucas	11.316
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuire	1457.782
	OrobiomaAz Cúcuta	230.572
	OrobiomaAz R. Dagua	12.372
	OrobiomaAz R. Sogamoso	67.576
	OrobiomaAz Valle del Patía	360.22
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	32365.825
	ZAST Alto Magdalena	1424.577
	ZAST Valle del Cauca	618.934
	ZDT Guajira-Santa Marta	1161.051
	ZHT Amazonia-Orinoquia	10546.731
	ZHT Catatumbo	170.156
	ZHT Magdalena-Caribe	2617.488
	ZHT Pacífico-Atrato	707.777
	ZST Caribe	3847.999
TOTAL GENERAL		110453.648

Fuente: elaboración propia.

- Halobioma Caribe.
- Helobiomos de la Guajira y Magdalena – Caribe.
- Zonobioma seco tropical del Caribe.

Al presentarse el fenómeno de El Niño la categoría de susceptibilidad moderada se incrementa considerablemente por el aumento significativo de superficie aportada por los siguientes biomas: halobioma Caribe, helobioma Amazonia – Orinoquia y Magdalena-Caribe, peinobioma de la Amazonia–Orinoquia, y orobiomas andinos.

Susceptibilidades baja y muy baja

Al considerar únicamente la susceptibilidad bruta, es decir, aquella dada por las características intrínsecas y propias de la vegetación, se observa que la categoría de susceptibilidad baja tiene el primer lugar en orden de importancia en la superficie ocupada, con una extensión de 668.938 km² y está representada en todos los biomas existentes.

Las susceptibilidades muy bajas ocupan el cuarto lugar en extensión e importancia en el país (102.544 km²), y están representadas por aquellos biomas que no presentan una alta pirogenicidad debida a factores fisionómicos, estructurales y de alta humedad contenida en la vegetación. Entre estos sobresalen los helobiomos y zonobiomos amazónicos y los biomas azonales de condición subxerófitica presentes en el territorio nacional (ver Cuadro 27).

Al hacer un análisis comparativo entre la susceptibilidad bruta y la evaluada bajo los regímenes climáticos anotados se observa que en condiciones normales, por el efecto

Cuadro 27. Susceptibilidad baja y muy baja por bioma bajo

Susceptibilidad	Bioma	Área (km²)
Baja	Halobioma Caribe	1053.886
	Halobioma Pacífico	2639.718
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	59799.473
	Helobioma Andinos	10.238
	Helobioma Guajira	117.868
	Helobioma Magdalena-Caribe	6628.831
	Helobioma Pacífico-Atrato	6144.569
	Helobioma R. Zulia	8.792
	Helobioma Valle del Cauca	491.953
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	67493.042
	Orobioma Alto Andes	12777.704
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	752.071
	Orobioma Andes Santa Marta	1182.951
	Orobioma Bajo Andes	67954.971
	Orobioma Baudó-Darién	9107.847
	Orobioma Macarena	2733.575
	Orobioma Medio Andes	37867.31
	Orobioma San Lucas	7863.976
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuiira	6221.084
	OrobiomaAz Cúcuta	125.33
	OrobiomaAz R. Dagua	2.371
	OrobiomaAz R. Sogamoso	113.338
	OrobiomaAz Valle del Patía	52.318
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	24058.212
	ZAST Alto Magdalena	328.051
	ZAST Valle del Cauca	1507.673
	ZDT Guajira-Santa Marta	1135.679
	ZHT Amazonia-Orinoquia	296217.186
	ZHT Catatumbo	1501.732
	ZHT Magdalena-Caribe	13983.883
	ZHT Pacífico-Atrato	26433.057
	ZST Caribe	12629.702
Muy Baja	Halobioma Caribe	1738.052
	Halobioma Pacífico	588.496
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	11281.459
	Helobioma Andinos	34.916
	Helobioma Guajira	378.366
	Helobioma Magdalena-Caribe	11714.739
	Helobioma Pacífico-Atrato	5187.787
	Helobioma R. Zulia	8.284
	Helobioma Valle del Cauca	32.646
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	723.593
	Orobioma Alto Andes	8181.729
	Orobioma AltoAnd Santa Marta	258.918
	Orobioma And Santa Marta	26.384
	Orobioma Bajo Andes	22120.853
	Orobioma Baudó-Darién	2568.879
	Orobioma Macarena	23.382
	Orobioma Medio Andes	8611.427
	Orobioma San Lucas	20.31
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuiira	899.71
	OrobiomaAz Cúcuta	438.702
	OrobiomaAz R. Dagua	1.674
	OrobiomaAz R. Sogamoso	48.858
	OrobiomaAz Valle del Patía	322.503
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	8535.247
	ZAST Alto Magdalena	1822.821
	ZAST Valle del Cauca	598.78
	ZDT Guajira-Santa Marta	1844.122
	ZHT Amazonia-Orinoquia	3490.914
	ZHT Catatumbo	69.448
	ZHT Magdalena-Caribe	2054.521
	ZHT Pacífico-Atrato	5310.226
	ZST Caribe	3603.425
TOTAL GENERAL		771479.562

Fuente: elaboración propia.

de la distribución espacial de las lluvias y la temperatura, disminuye considerablemente la susceptibilidad de los biomas, que pasa a cerca de 200.000 km², de susceptibilidad baja a muy baja. De igual manera, con el fenómeno de El Niño, debido a que sus efectos en

Cuadro 28. Susceptibilidad baja y muy baja por bioma bajo condiciones normales de precipitación y temperatura (PPT y T).

Susceptibilidad en condiciones normales de PPT y T	Bioma	Área (km²)
Baja	Halobioma Caribe	696.234
	Halobioma Pacífico	215.136
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	31417.612
	Helobioma Andinos	10.238
	Helobioma Guajira	472.659
	Helobioma Magdalena-Caribe	6060.602
	Helobioma Pacífico-Atrato	817.811
	Helobioma R. Zulia	8.792
	Helobioma Valle del Cauca	148.241
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	14507.119
	Orobioma Alto Andes	6456.742
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	463.959
	Orobioma Andes Santa Marta	810.558
	Orobioma Bajo Andes	29160.749
	Orobioma Baudó-Darién	764.519
	Orobioma Macarena	2150.208
	Orobioma Medio Andes	17694.854
	Orobioma San Lucas	5051.66
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuiira	6787.596
	OrobiomaAz Cúcuta	180.08
	OrobiomaAz R. Dagua	2.371
	OrobiomaAz R. Sogamoso	101.877
	OrobiomaAz Valle del Patía	52.318
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	16768.037
	ZAST Alto Magdalena	341.358
	ZAST Valle del Cauca	837.888
	ZDT Guajira-Santa Marta	3207.796
	ZHT Amazonia-Orinoquia	115690.16
	ZHT Catatumbo	281.482
	ZHT Magdalena-Caribe	8618.52
	ZHT Pacífico-Atrato	1140.115
	ZST Caribe	14212.641

ciertas zonas diferentes a la región Andina y Caribe se presentan de manera inversa, y aumenta la precipitación, en dichas áreas se observa también un sensible incremento en la superficie de los biomas en categoría muy baja (ver Cuadros 28 y 29).

Susceptibilidad en condiciones normales de PPT y T	Bioma	Área (km²)
Muy Baja	Halobioma Caribe	2112.877
	Halobioma Pacífico	3080.277
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	39668.947
	Helobioma Andinos	34.916
	Helobioma Guajira	400.2
	Helobioma Magdalena-Caribe	12181.543
	Helobioma Pacífico-Atrato	10751.917
	Helobioma R. Zulia	8.284
	Helobioma Valle del Cauca	32.646
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	53712.537
	Orobioma Alto Andes	17344.455
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	772.92
	Orobioma And Santa Marta	430.983
	Orobioma Bajo Andes	60993.774
	Orobioma Baudó-Darién	10912.207
	Orobioma Macarena	608.251
	Orobioma Medio Andes	28986.091
	Orobioma San Lucas	2832.626
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuiira	1362.9
	OrobiomaAz Cúcuta	375.916
	OrobiomaAz R. Dagua	1.674
	OrobiomaAz R. Sogamoso	47.63
	OrobiomaAz Valle del Patía	322.503
	PeinoB Amazonia-Orinoq	15848.796
	ZAST Alto Magdalena	1798.522
	ZAST Valle del Cauca	605.253
	ZDT Guajira-Santa Marta	2943.311
	ZHT Amazonia-Orinoquia	184018.063
	ZHT Catatumbo	1290.608
	ZHT Magdalena-Caribe	7416.582
	ZHT Pacífico-Atrato	31034.256
	ZST Caribe	1389.471
TOTAL GENERAL		778450.868

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 29. Susceptibilidad baja y muy baja por bioma por el fenómeno de El Niño

Susceptibilidad en condiciones de anomalía climática (fenómeno de El Niño)	Bioma	Área (km²)	Susceptibilidad en condiciones de anomalía climática (fenómeno de El Niño)	Bioma	Área (km²)
Baja	Halobioma Caribe	1716.558	Muy Baja	Halobioma Caribe	54.439
	Halobioma Pacífico	99.108		Halobioma Pacífico	3213.413
	Helobioma Amazonia-Orinoquia	18829.213		Helobioma Amazonia-Orinoquia	58731.918
	Helobioma Andinos	34.916		Helobioma Magdalena-Caribe	2752.897
	Helobioma Guajira	378.366		Helobioma Pacífico-Atrato	9394.041
	Helobioma Magdalena-Caribe	8432.32		Helobioma R. Zulia	8.284
	Helobioma Pacífico-Atrato	907.185		Helobioma Valle del Cauca	315.235
	Helobioma R. Zulia	8.792		Litobioma Amazonia-Orinoquia	54431.492
	Helobioma Valle del Cauca	603.685		Orobioma Alto Andes	6353.089
	Litobioma Amazonia-Orinoquia	13928.106		Orobioma Alto AndesSanta Marta	33.4
	Orobioma Alto Andes	12394.603		Orobioma And Santa Marta	1.625
	Orobioma Alto Andes Santa Marta	752.071		Orobioma Bajo Andes	39622.348
	Orobioma And Santa Marta	1165.279		Orobioma Baudó-Darién	9103.729
	Orobioma Bajo Andes	47503.347		Orobioma Macarena	2676.26
	Orobioma Baudó-Darién	2636.946		Orobioma Medio Andes	12054.885
	Orobioma Macarena	153.805		Orobioma San Lucas	754.723
	Orobioma Medio Andes	31153.259		Orobioma Subandes Santa Marta-Macuiira	146.211
	Orobioma San Lucas	7158.093		OrobiomaAz Cúcuta	310.078
	Orobioma Subandes Santa Marta-Macuiira	5566.997		OrobiomaAz R. Dagua	3.987
	OrobiomaAz Cúcuta	125.33		OrobiomaAz R. Sogamoso	2.722
	OrobiomaAz R. Dagua	43.29		OrobiomaAz Valle del Patía	2.428
	OrobiomaAz R. Sogamoso	113.338		PeinoB Amazonia-Orinoquia	28888.296
	OrobiomaAz Valle del Patía	52.318		ZAST Alto Magdalena	851.331
	PeinoB Amazonia-Orinoquia	19819.846		ZAST Valle del Cauca	1446.026
	ZAST Alto Magdalena	337.35		ZHT Amazonia-Orinoquia	260478.962
	ZAST Valle del Cauca	1433.587		ZHT Catatumbo	45.396
	ZDT Guajira-Santa Marta	1818.75		ZHT Magdalena-Caribe	2704.026
	ZHT Amazonia-Orinoquia	45820.063		ZHT Pacífico-Atrato	29581.936
	ZHT Catatumbo	1501.732		ZST Caribe	122.445
	ZHT Magdalena-Caribe	14505.293	TOTAL MUY BAJA		524085.622
	ZHT Pacífico-Atrato	3187.051	TOTAL GENERAL		779118.621
	ZST Caribe	12852.402			
TOTAL BAJA		255032.999			

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones y recomendaciones

Sobre la metodología empleada

- La metodología se elaboró a escala general aplicable en todo el país (escalas 1:500000 o menores) y se fundamenta en la utilización de imágenes de sensores

remotos de moderada resolución espacial. No obstante, se prevé su utilización a escalas más reducidas (regional o localmente) mediante la incorporación de nuevas variables de análisis y la utilización de imágenes de alta y muy alta resolución. Se empleó un *software* especializado (Sis-

temas de Información Geográfico Idrisi Andes y Arc View versión 3.2) para el procesamiento digital de imágenes de sensores remotos, la estructuración de bases de datos espaciales, el modelamiento espacial y la realización de la cartografía temática.

- La propuesta metodológica elaborada se fundamentó conceptualmente en un enfoque sistémico como principal herramienta heurística de aproximación y se aplica con un esquema ecléctico.
- Dado que los estudios y trabajos sobre zonificación y caracterización de la susceptibilidad y vulnerabilidad de las coberturas vegetales a los incendios, se han realizado casi en su totalidad en países con características climáticas y de vegetación muy diferentes a las de Colombia, principalmente en latitudes de zonas templadas, el conocimiento que se tiene sobre las realidades propias de países ecuatoriales es muy limitado o está aún en ciernes.

El desarrollo metodológico que se propuso es el siguiente:

- a) El cual se ajustará a las realidades del país tanto en los aspectos climáticos y meteorológicos que inciden en Colombia como en su gran diversidad de ecosistemas, la cobertura vegetal y de flora, en nuestras particulares condiciones socioeconómicas y culturales que pueden ser detonantes, en un momento dado, de los incendios forestales y de la cobertura vegetal.

- b) Que fuera escalable, es decir, que si bien se realizó a una escala general para el ámbito nacional (1:500000 o menor), pudiera ser fácilmente replicable a escalas regionales (1:250000) o locales (1:100000 o 1:50000), mediante la incorporación de variables que le agreguen especificidad y mayor resolución pero con la misma estructura de la escala nacional.
- c) Actualizable, para adaptarlo periódicamente (cada cinco años en lo posible) a las características de susceptibilidad de la vegetación a estos eventos.
- d) Que los resultados pudieran ser incorporados a los modelos de alerta temprana de incendios forestales que desarrolla y lleva a cabo el Ideam.
- e) El modelo y la zonificación de susceptibilidad de la vegetación a incendios sirvieran para apoyar y planificar integralmente actividades de prevención y mitigación de desastres llevadas a cabo por la Dirección Nacional de Prevención y Atención de Desastres, la Comisión Nacional de Incendios Forestales y los organismos relacionados, tales como las autoridades ambientales (CAR, Dagma, Secretarías de Ambiente, Parques Nacionales), y las autoridades de mitigación y atención de emergencias (Bomberos, Defensa Civil, Policía Nacional, Ejército, Socorro Nacional, etc).

- En este proyecto la propuesta de asignación de modelos de combustibles se basó en un análisis multicriterio, para reducir

la subjetividad que entrañan los modelos basados en criterios cualitativos.

- El modelo de combustibles desarrollado se estructuró mediante una clasificación jerárquica conformada por los siguientes grupos temáticos:
 - a) Primer nivel de jerarquía, influencia del fuego sobre los ecosistemas: regímenes del fuego (papel que ejerce el fuego) a los que se encuentran totalmente sometidos los biomas y ecosistemas colombianos.
 - b) Segundo nivel de jerarquía, biomas y ecosistemas: categorizados según la influencia del fuego sobre ellos.
 - c) Tercer nivel de jerarquía, tipo de combustible vegetal predominante por bioma y ecosistemas: tipo de cobertura vegetal y biotipo dominante.
 - d) Cuarto nivel de jerarquía, duración del tipo de combustible dominante: duración en horas de cada tipo de combustible, definidos en horas de ignición (1 hora, 10 horas, 100 horas).
 - e) Quinto nivel de jerarquía, carga total de combustibles: caracterización cualitativa dependiente de la correlación de la altura en metros, cobertura en valores porcentuales, biomasa aérea en ton/ha y humedad media de la vegetación, obtenida a través de una distribución cualitativa de los rangos obtenidos a partir del índice de vegetación NDII. Este último nivel define el modelo de combustible para una determinada unidad de vegetación.

- El modelo de combustibles obtenido y especializado representa la condición pirogénica de la vegetación colombiana, aspecto clave para comprender el comportamiento de nuestros ecosistemas frente al fuego, en caso de que se presenten eventos de esta índole. Igualmente, este modelo y su mapa respectivo permiten conocer la susceptibilidad de la vegetación a incendios de la cobertura vegetal, al correlacionar, analizar y reclasificar esta información con los factores climáticos de mayor incidencia en la combustibilidad (temperaturas ambientales, precipitación, humedad del suelo), factores que a pesar de ser externos a la vegetación inciden directamente en ella al provocar variaciones fisiológicas y fenológicas en su estado, los cuales modifican la condición intrínseca de la vegetación, y por ende generan variabilidad espacial, temporal y estacional de los combustibles vegetales.

Sobre los resultados obtenidos

- Generalmente, en nuestro país las coberturas vegetales más afectadas son aquellas sometidas a quemaduras para obtener terrenos que se destinarán a fines agrícolas. Los incendios causantes de deforestación (más comunes en los bosques alterados) pueden ser de intensidad variable e incluso quemar completamente el bosque, y dejar el suelo totalmente desnudo.
- La sustitución de zonas extensas de bosque por herbáceas inflamables es uno de los efectos ecológicos más negativos de los incendios en los bosques pluviales tropicales. Pero los incendios son poco

corrientes en la mayoría de estos bosques pluviales y la vegetación andina (bosques andinos, altoandinos y páramos), debido al microclima húmedo, la humedad del combustible, la escasa velocidad del viento y las elevadas precipitaciones.

- Existe una directa correlación entre el tipo de cobertura más afectada en esta área y la disponibilidad y pirogenia e inflamabilidad del combustible. Las sabanas y pastizales, por ser vegetación dependiente del fuego en su ciclo vital; los rastrojos, por poseer combustibles de rápida ignición y de fácil generación de calor; los bosques plantados, por poseer una carga considerable de material combustible (biomasa), con alta presencia de resinas y aceites esenciales que incrementan la capacidad combustible de ellos, y por último los bosques naturales densos, los cuales aunque no tienen alta combustibilidad sí muestran marcada continuidad espacial en la estructura horizontal y vertical de sus formaciones, de tal forma que al estar sometidos a períodos fuertes de sequía y con la influencia de actividades humanas adversas (quemaduras, fogatas, etc.), son potenciales combustibles de larga duración y de ignición lenta.
- Excluyendo las coberturas clasificadas como no combustibles y las áreas urbanas, las cuales tienen una extensión aproximada de 22472 km² (1.97% de la superficie del país), las áreas con susceptibilidad baja son las de mayor extensión pues ocupan un área de 668.938 km² (58.99%), seguidas por las de susceptibilidad alta con 210.494 km² (18.44%). Las categorías de muy alta, moderada y muy baja, con áreas de 57.625

km², 79.676 km² y 75.582 km², respectivamente, representan una menor extensión en el país.

- Al considerar el régimen normal de precipitación y temperatura imperante en el país (medias multianuales), y a pesar de ser estos factores externos a la vegetación, se puede determinar que ellos tienen una incidencia directa sobre las condiciones intrínsecas de la cobertura vegetal, lo cual genera variaciones en la probabilidad de sufrir daños o de ser más o menos resistente a los incendios.
- Se pudo observar, con respecto a la susceptibilidad bruta, que se presenta una gran variación tanto en el área de cada grupo de susceptibilidades, como en los tipos de ecosistemas según la influencia del fuego, que se engloban en las diferentes categorías de susceptibilidad. Así, las áreas con susceptibilidades bajas y muy bajas son considerablemente más extensas que las demás. Se aprecia adicionalmente, teniendo en cuenta los efectos de la distribución espacial de la lluvia y la temperatura, que no se agrupan de una manera coherente los ecosistemas por la influencia del fuego, sino que algunos típicamente influidos bajan en parte su grado de susceptibilidad, así como otros que no son influidos directamente por el fuego (ecosistemas sensibles e independientes al fuego) aumentan o disminuyen de susceptibilidad.
- Durante las épocas en las cuales se presenta la anomalía climática del fenómeno de El Niño, es bien sabido que la susceptibilidad de la vegetación en ciertas áreas del país, como en la región Andina, aumenta

considerablemente por efecto de las sequías prolongadas y por el incremento de la temperatura y la insolación.

- Al realizar el análisis de la susceptibilidad en las condiciones dadas por el fenómeno de El Niño, se apreció que el comportamiento global presenta pequeñas variaciones frente al régimen normal de lluvias y temperaturas. No obstante, aunque la variación en el área de las diferentes categorías de susceptibilidad no es significativa, sí lo es en la distribución espacial. Este hecho se ve representado en que muchas de las áreas que en un régimen normal o al considerar la susceptibilidad bruta presentan susceptibilidades altas pasan a las categorías bajas y viceversa, debido a la variabilidad especial que el fenómeno de El Niño induce en la distribución de las lluvias y de las temperaturas en el país.
- Al realizar un análisis por el grado de susceptibilidad que poseen los biomas colombianos, se encontró que áreas representativas de los biomas amazónicos y de la Orinoquia (peinobioma, Helobioma y zonobioma húmedo tropical de la Amazonia-Orinoquia), son las que presentan en superficie los valores más altos. Otros biomas categorizados en este rango de alto aporte al área de muy alta susceptibilidad a nivel nacional, son los orobiomas bajo y alto de los Andes.

Bibliografía

Andrews, P.I.; Bevins, C.D.; Seli, R.C. (2003). *Behave Plus FIRE modeling system*,

version 2.0: User's Guide. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 132.

Arancibia, S.; E. Contreras, S. Mella, P. Torres y I. Villablanca. (2005). *Evaluación Multicriterio: aplicación para la formulación de proyectos de infraestructura deportiva*.

Burgan, R.E., y Rothermel, R.C. (1984). *Behave. Fire behaviour prediction and fuel modeling system –Fuel subsystem*. Gen. Tech. Rep. INT-167. USDA, Forest Service.

Calderón, C. A.; Fernandez, J, Cuenca y Martínez M. (2004). *Técnicas multivariantes para la estimación del riesgo*. Universidad San Pablo.

Cardona, O. (2001). *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*. Tesis de Grado. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de ingeniería del terreno cartográfica i geofísica. http://www.tdx.cbuc.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0416102-075520/.

Chuvieco, E.; Coceroa, D; Riaño, D; Martínez, P; Martínez, J; de la Riva, J. y Pérez, F. (2004). "Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating". *Remote Sensing of environment* 92 (2004) 322–331.

Chuvieco, E., Salas, F. J., Aguado, I., Cocero, D. y Riaño, D. (2001): "Estimación del estado hídrico de la vegetación a partir

de sensores de alta y baja resolución", *GeoFocus* (Artículos), 1, 1-16.

Cortés Ortiz, A. y Chuvieco Salinero, E. (2005). "Cartografía de tipos de combustible en una región del Durango, México, mediante imágenes de satélite". *GeoFocus* 5, 5, 129-155.

Ferraz, S.F.B., Vettorazzi, C.A. (1998). *Mapeamento de risco de incêndios*.

Finney, M. A., (1998), "Farsite: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation". In: *USDA Forest Service, Intermountain Fire Sciences Laboratory*. Missoula, MT. <http://www.montana.com/sem>.

Forestry Canada FIRE Danger Group, (1992).

Fournier, d'Albe E. M. (1985). "The Quantification of Seismic Hazard for the Purposes of Risk Assessment". *International Conference on Reconstruction, Restauration and Urban Planning of Towns and Regions in Seismic Prone Areas*, Skopje.

IDEAM, IAvH, IGAC, IIAP, INVEMAR, SINCHI. (2007). "Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia. Mapa y Memoria Técnica". *En prensa*.

Matthew G. Rollins, Robert E. Keane y Russell A. Parsons. (2004). "Mapping fuels and fire regimes using remote sensing, ecosystem simulation, and gradient modeling". *Ecological Applications*. 14(1), 2004, pp. 75–95 by the Ecological Society of America.

P.S. Roy* (2003) *Forest Fire And Degradation Assessment Using Satellite Remote Sensing And Geographic Information*

System, Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. 361-400.

Parisien, M.A.; Kafka, V.G.; Hirsch, K.G.; Todd, J.B.; Lavoie, S.G.; Maczek, P.D. 2005. *Mapping wildfire susceptibility with the BURN-P3 simulation model*. Nat. Resour. Can., Can. For. Serv., North. For. Cent., Edmonton, Alberta. Inf. Rep. NOR-X-405.

Pivello, V.R., Norton, G.A., (1996), "FIRE-TOOL: an expert system for the use of prescribed fire in Brazilian savannas". *Journal of Applied Ecology*, 33, 348-356.

Rollins, Matthew G.; FRAME, Christine K., Tech. eds. (2006). *The LANDFIRE Prototype Project: nationally consistent and locally relevant geospatial data for wildland fire management*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-175. Fort Collins: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 416.

Rothermel, R.C. (1972). A mathematical model for predicting FIRE spread in wildland fuels. USDA Forest Service Research, Paper INT-115.

Schmidt, K.M.; Menakis, J.P.; Hardy, C.C.; Hann y W.J.; Bunnell, D.L. (2002). *Development of coarse-scale spatial data for wildland fire and fuel management*. Gen. Tech. Rep., RMRS-GTR- 87. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Scott, J.H.; Burgan, R.E. (2005). *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. For Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 72.

The Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS). (2004). *The Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System*. <http://www.for.gov.bc.ca/PROTECT/organization/Kamloops/Zones/Kamloops/FuelsManagement>.

Vázquez, E y B, Denore, (1999). "FOMFIS, un sistema para la cartografía de combustibles vegetales a partir de imágenes de satélite de alta resolución". *Revista de Teledetección*.

Los incendios de la cobertura vegetal en Colombia y su relación con la variabilidad climática y con el cambio climático

JOSÉ DANIEL PABÓN-CAICEDO¹

Resumen

Se hace una descripción de los patrones de distribución espacial y temporal de los incendios de la cobertura vegetal en el territorio colombiano y su relación con el clima regional. Se evidencia la relación de las fases extremas de la variabilidad climática interanual asociada a los fenómenos de El Niño y La Niña y la fluctuación interanual de la frecuencia de los incendios. Se plantean posibles cambios en la frecuencia de los incendios forestales en Colombia debido a diversos escenarios de cambio climático que se observarían en la segunda mitad del siglo XXI.

Palabras clave: clima e incendios forestales en Colombia; variabilidad climática

e incendios forestales; cambio climático e incendios forestales.

Abstract

Patterns of spatial and temporal distribution of vegetable covers fires in Colombian territory and their connection with the regional climate are described. The relationship between extreme phases of interannual climate variability related to the Nino and the Nina phenomena and the interannual fluctuations of forest fires occurrence is shown. Finally, possible changes in forest fires patterns caused by different scenarios of climate change that might be observed in the second half of 21st Century is presented.

¹ Ph.D en Meteorología del Instituto Meteorológico ODESSA, Ucrania. Profesor del Departamento de Geografía. Universidad Nacional de Colombia. jdpabonc@gmail.com.

Key words: climate and forest fires in Colombia; climate variability and forest fires; climate change and forest fires.

Introducción

La posibilidad de que la modificación de los factores climáticos induzca cambios drásticos en los patrones de ocurrencia de incendios de la cobertura vegetal (Dale *et al.*, 2001) en algunas regiones del planeta ha centrado la atención en la relación entre el clima y los incendios forestales. Esta relación es compleja e involucra diversas vías y condiciones a través de las cuales se concreta. Diversos autores (ver, por ejemplo, Viegas, 1998; Flannigan & Wotton, 2001; Schoennagel *et al.*, 2004) han señalado que para que se inicie y se propague un incendio de cobertura vegetal, se requiere una serie de elementos, entre los cuales se destacan el material combustible, las condiciones ambientales (tiempo atmosférico y clima), la topografía y el detonante o iniciador de la ignición.

Al iniciar este análisis es conveniente tomar en cuenta la diferencia entre tiempo atmosférico y clima, dos conceptos muy relacionados que comúnmente se confunden, los cuales intervienen en la generación y propagación de los incendios. *El tiempo atmosférico* (en adelante se referirá solo tiempo) es el estado de la atmósfera en un momento dado e incluye los fenómenos atmosféricos instantáneos, mientras que el *clima* es la condición predominante durante un período (meses, años); el clima propicia determinados fenómenos meteorológicos en una región o en una época del año (Pabón, 2009). De manera recurrente, tales patrones se alteran y generan

anomalías climáticas que pueden perdurar algunos meses e incluso más del año. La secuencia de condiciones climáticas anómalas se conoce como *variabilidad climática*. En el largo plazo las condiciones predominantes se modifican en ciclos de siglos, miles, cientos de miles de años, lo que se conoce como *cambio climático*.

El tiempo y el clima actúan sobre el material combustible, tanto en la ignición como en la propagación de los incendios forestales. Generalmente, el combustible (pasto, rastrojo, matorrales o bosques secos) arde o hace ignición según sus condiciones de humedad. Así, un rayo puede iniciar la ignición del material (Nash & Johnson, 1996; Latham & Williams, 2001); una lluvia, reducirlo; el viento contribuye a su propagación. Los climas con precipitaciones bajas propician el desarrollo de vegetación (bosques, matorrales) con bajo contenido de humedad o seca, lo que facilita la ignición.

Por otra parte, condiciones como altas temperaturas y escasez de lluvias predominantes durante largos períodos reducen la humedad del combustible y lo hacen apto para iniciar la ignición ante una acción detonante (impacto de un rayo o de chispas de fogata, o la quema cultural). Los períodos lluviosos tienen el efecto contrario: humedecen el combustible de tal manera que se reduce la probabilidad de que se inicie la ignición de la vegetación; aunque se debe tener en cuenta que un periodo muy lluvioso estimula el crecimiento del material combustible (hierba, matorral, rastrojo, bosque seco), lo cual en la estación seca generaría más incendios de lo usual.

Así, los patrones climáticos de una región controlan la distribución espacial y temporal de los incendios. Las anomalías climáticas asociadas a las fases extremas de la variabilidad del clima pueden aumentar o disminuir temporalmente la frecuencia de los eventos de incendios de la cobertura vegetal y el cambio climático podría generar nuevos patrones de comportamiento frente a este evento. En este artículo se hace una aproximación a la identificación de los patrones de distribución espacial de los incendios en Colombia asociados al clima y el efecto de las fases extremas de la variabilidad climática interanual en la frecuencia de los incendios forestales. Adicionalmente, se analiza la posible modificación de estos patrones por el cambio climático que está ocurriendo y el cual será cada vez más marcado a medida que avance el siglo XXI.

Datos y métodos de análisis

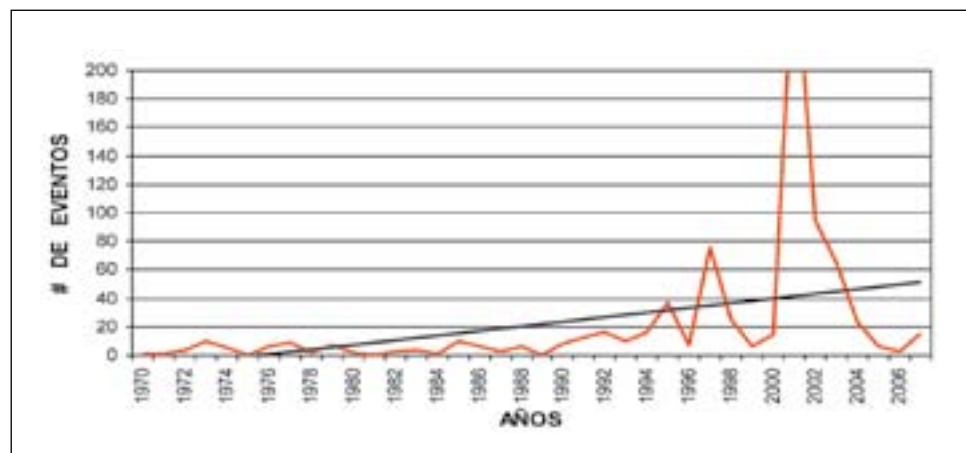
Para explorar la relación clima – incendios forestales en este trabajo se utiliza la precipitación y su variabilidad para representar el clima. Para el efecto se usa la distribución espacial de esta variable sobre el territorio colombiano y su ciclo anual, según la información publicada por el Ideam (2005). Para representar las fases extremas de la variabilidad climática se tomaron los mapas de anomalías de precipitación en años de El Niño y La Niña (Ideam, 1997; Ideam, 1998). Finalmente, para el análisis del potencial efecto del cambio climático en la frecuencia de los incendios forestales se tomó como base la información de tendencias actuales de la precipitación (Pabón, 2003) y los cambios que habría en la precipitación anual en los esce-

narios de cambio climático para Colombia (Pabón 2006, 2007; Ruiz, 2010); con base en estos últimos se establecieron las analogías entre las posibles condiciones futuras de clima y las observadas en fases extremas de variabilidad climática, para plantear escenarios futuros de la frecuencia de incendios en condiciones de cambio climático.

Otro de los componentes considerados es la vegetación, el material de ignición, de la cual se considera tanto el tipo, según la clasificación presentada por Márquez (2005), como el contenido de humedad inferido a partir del *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), que se obtiene de imágenes de satélite NOAA. Con el NDVI se contrastaron las condiciones de humedad en condiciones de El Niño y La Niña.

Los datos del número de incendios al mes fueron obtenidos de la base de datos de la red Corporación Osso, U. Eafit (2010) que tiene registros desde 1970 al 2007. La serie de número de incendios obtenida no es homogénea (ver Figura 1) y presenta una marcada tendencia, tal vez debido a la diferencia en la densidad de reportes a través de los años. En efecto, se nota un cambio a comienzos de los años noventa; igualmente se destaca un dato atípico (fuera de serie o *outlier*) para el año 2001, que para el análisis es necesario descartar. Esta serie, más que sobre número de incendios, se refiere a número de reportes sobre incendios forestales registrados en la base de datos mencionada. Dada esta situación, la serie original de la Figura 1 no se utiliza en este análisis para presentar los patrones de su distribución espacio-temporal y su relación

Figura 1. Serie original del número de incendios reportados para el período 1970-2007.



Fuente: inventario Histórico de Desastres en Colombia. Disponible en: (<http://online.desinventar.org/desinventar>) de Corporación OSSO, U. EAFIT, LA RED (2010). (NOTA: La tendencia se debe especialmente a una creciente mejora en el sistema de vigilancia e información, así como en la cobertura de los medios de comunicación, lo que fue estimulando y facilitando la notificación de los eventos).

con el clima. Se dio un tratamiento especial a los datos, el cual se describe a continuación.

Para representar el patrón espacial y el ciclo anual se utilizó el número de eventos acumulados en todo el período para cada mes (por ejemplo, el acumulado durante todos los eneros del período mencionado). En el ciclo anual se presenta el porcentaje de eventos de cada mes frente a todo el acumulado de todos los años. Para explorar la distribución de los incendios en el territorio colombiano se organizaron los datos del número de incendios registrados durante todo el período por departamento y por municipio y se calculó el porcentaje departamental en relación con el total nacional.

Para el análisis de la variabilidad interanual de la ocurrencia de incendios se organizó una serie homogénea a partir de un índice estandarizado que se calculó para dos períodos de la siguiente manera: la se-

rie original presenta tendencia tanto en el promedio como en la varianza, y se pueden identificar dos períodos, uno entre 1970-1992 y otro 1993-2007. Para cada uno de los períodos se estableció el promedio y la desviación estándar, con los que se calcularon los índices estandarizados:

$$IES_{i,j} = \frac{X_{i,j} - \overline{X_j}}{\sigma_j} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde $IES_{i,j}$ es el índice estandarizado del año i en el período j ($j=1,2$; es 1 para el período 1970-1992 y 2 para el período 1992-2007); $X_{i,j}$ es el número de eventos en el año i del período j ; $\overline{X_j}$ es el promedio para el período j ; σ_j es la desviación estándar del período j .

De esta manera se obtienen dos secuencias del índice estandarizado que al unir las conforman una serie homogénea.

La distribución espacial de la precipitación, de la vegetación y de los incendios de la cobertura vegetal en Colombia

La Figura 2a muestra la distribución de la precipitación anual sobre el territorio colombiano, y es posible a simple vista identificar zonas muy lluviosas (con acumulados anuales mayores de 4.000 mm en azul intenso y morado), lluviosas (1.500-4.000 en tonos de verde y celeste), secas (500-1.500 amarillo y anaranjado) y muy secas (precipitación anual menor de 1.000 mm en color rojo). Las condiciones muy secas se limitan a la península de la Guajira, mientras que las secas están en los valles del Magdalena y Cauca y en la región Caribe. Los sectores más lluviosos se localizan en la vertiente pacífica, en los piedemonte amazónico, llanero y del Catatumbo, así como al sur de los departamentos de Sucre y Bolívar.

La distribución de los diferentes tipos de vegetación (Figura 2b) muestra los denominados bosques secos en los valles del Magdalena y del Cauca, así como la región Caribe en los sectores donde las precipitaciones anuales son menores de 2000 mm: zona interandina, valles de Magdalena, Cauca y Patía, así como en la región Caribe.

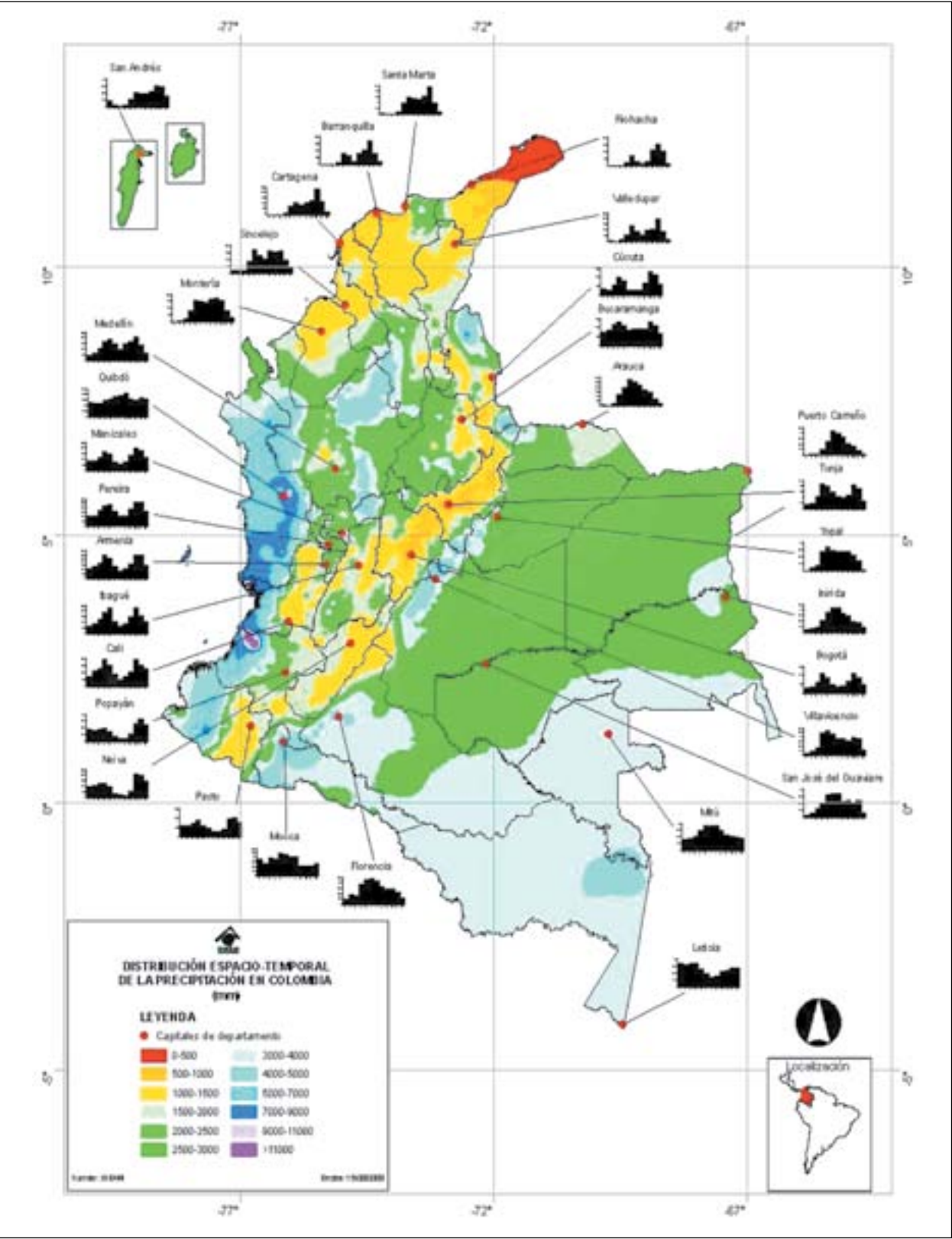
El porcentaje de incendios forestales por municipio en relación con el total nacional reportado para el período 1970-2007 se presenta en la Figura 3. El mayor porcentaje de los incendios corresponde a la región andina, particularmente a sectores de los departamentos del Cauca, Valle, Tolima, Cundinamarca y Boyacá. Se destaca especialmente el altiplano cundiboyacense. (Se debe tener en

cuenta que el mayor porcentaje de incendios reportados en estas regiones se puede asociar a la mayor concentración de población y de actividades, lo que en determinadas condiciones propiciarían los incendios más que en otras regiones, ya que son zonas en donde los incendios son más visibles y por ello se reportan con mayor facilidad). Se presentan incendios, pero en menor porcentaje, en la Orinoquia, en el piedemonte amazónico y en la región caribe. Los reportes sobre incendios son escasos para la vertiente pacífica y para la Amazonia.

La comparación de la Figura 1 con las Figuras 2a y 2b corrobora que las regiones con alto porcentaje de reportes de incendios son aquellas con vegetación tipo bosque seco o sabana, pero también se presentan incendios en zona de bosque premontano, montano, de alta montaña y páramo (Figura 2b) Por ello se puede afirmar que los incendios no ocurren en todas las regiones muy secas, sino en aquellas en donde puede haber suficiente masa combustible (bosques, matorral, rastrojo).

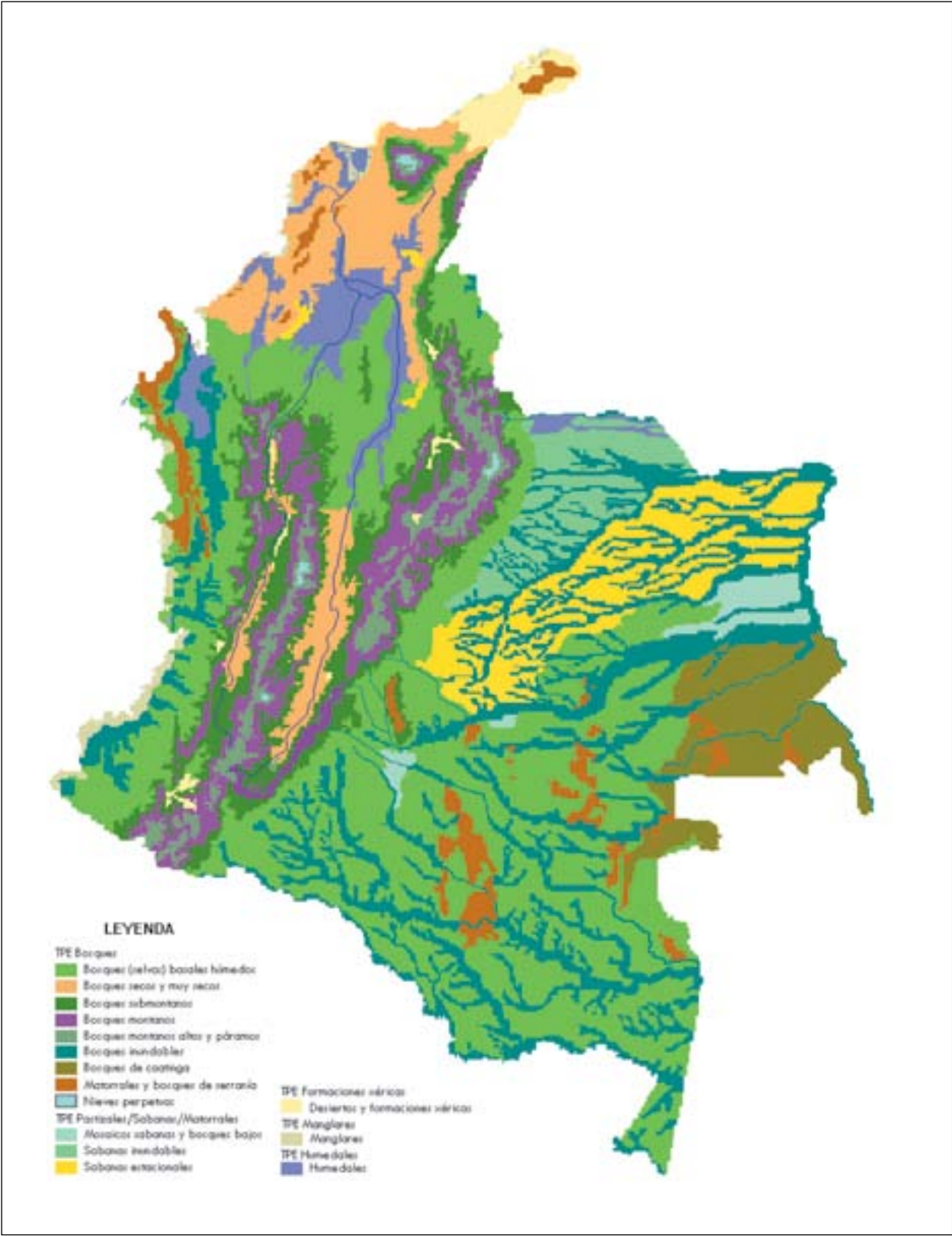
Lo anterior explicaría, parcialmente, por qué hay menos incendios en la península de la Guajira (menos población y actividades socioeconómicas, así como menos material combustible) en comparación con el altiplano cundiboyacense, en donde los volúmenes anuales de precipitación están entre 1000 - 1500 mm, y hay bosques (y mayor población) donde eventualmente se agudizan las condiciones secas y se convierten en un combustible con alta probabilidad de encenderse.

Figura 2a. Distribución espacial de la precipitación anual en Colombia y el ciclo anual de la precipitación, en diferentes regiones del país



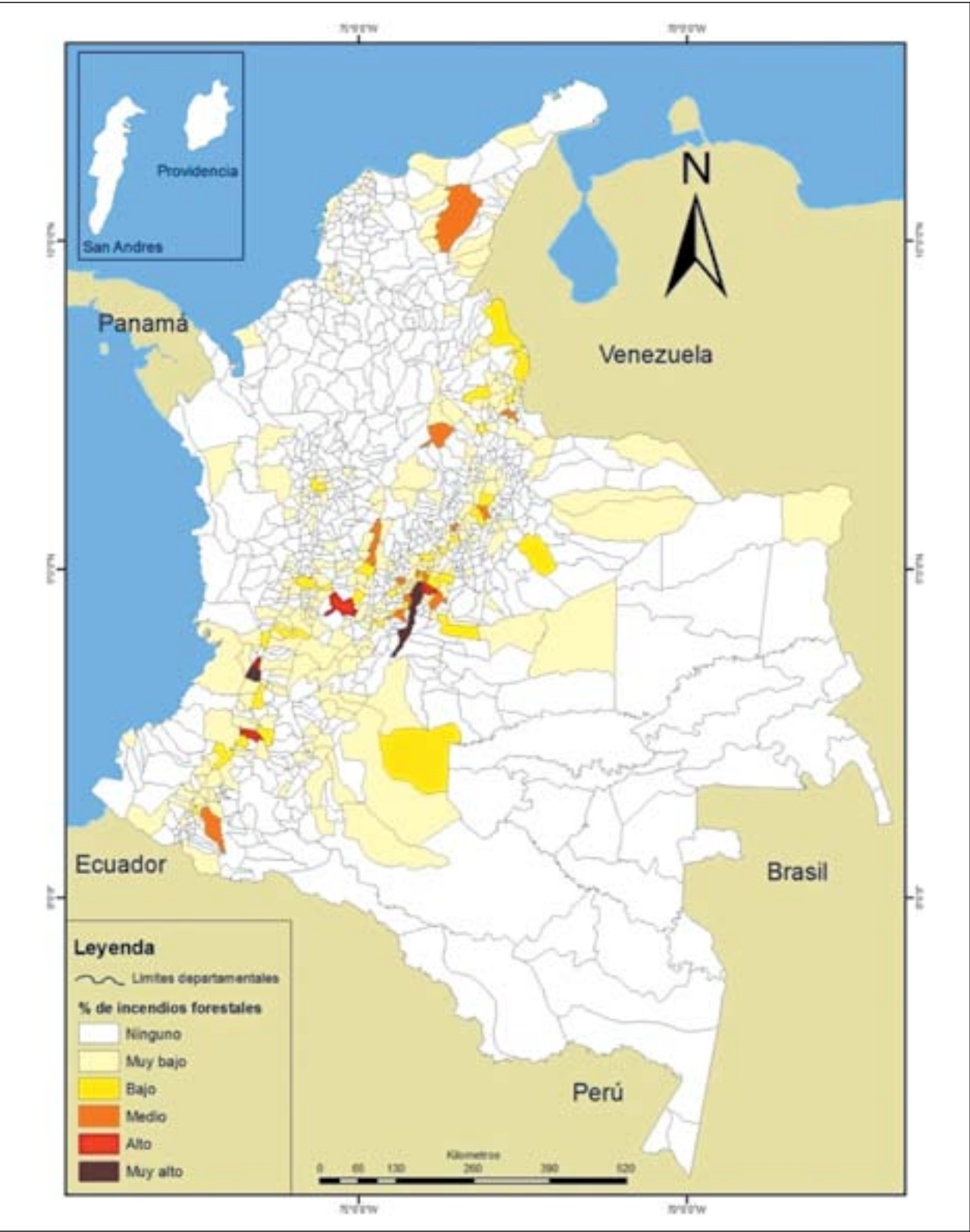
Fuente: IDEAM, 2005.

Figura 2b. Distribución de los diferentes tipos de vegetación sobre el territorio colombiano



Fuente: Márquez, 2000.

Figura 3. Distribución del porcentaje de incendios por municipio ocurridos en el período 1970-2007*



Fuente: elaboración propia.

* Con base en los datos disponibles para el período 1970-2007 en el Inventario Histórico de Desastres en Colombia. Disponible en: http://online.desinventar.org/desinventar/?r=COL-1250694506-colombia_inventario_historico_de_desastres&lang=spa.

El ciclo anual de la precipitación y de los incendios de la cobertura vegetal en Colombia

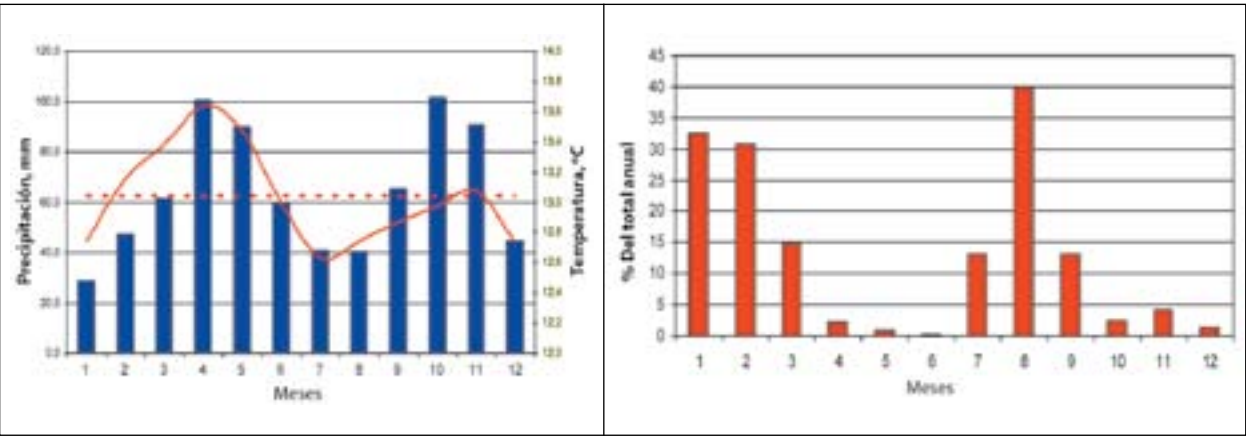
El ciclo anual de la precipitación para diferentes regiones del país se ilustra en los histogramas localizados alrededor del mapa de la Figura 2a. En general se presenta bimodalidad (dos temporadas lluviosas y dos secas) en la región andina; monomodalidad (una temporada lluviosa) en la Amazonia, en la Orinoquia, y en el Chocó, y cuasimonomodalidad (una temporada lluviosa con un período de ligero descenso de las lluvias) en la región caribe. Este comportamiento particular del ciclo anual de la precipitación en Colombia está determinado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y por la interacción de la circulación con la orografía.

Este ciclo anual de las lluvias genera estacionalidad de la humedad del suelo y de la vegetación. En la estación lluviosa el contenido

de humedad del suelo y la vegetación reduce el potencial de ignición de esta última. Eso hace que el ciclo anual de los incendios sea inversamente proporcional al ciclo de las lluvias.

En la Figura 4 se presenta tanto el ciclo anual de la precipitación en la región andina (izquierda) como el ciclo anual de los incendios forestales en Colombia (derecha). Se observa que los meses con más eventos de incendio son enero-febrero y julio-agosto. Esto coincide con las temporadas secas de la región caribe (su mayor expresión a comienzos de año) y de la región andina (enero-febrero y mediados de año). El ciclo anual de los incendios presentados aquí está más relacionado con el ciclo de lluvias de la región andina, según la información presentada, ya que ésta reporta la mayor proporción de los incendios en esta región. Solo los incendios correspondientes a diciembre-enero-febrero incluyen lo que ocurre en la región caribe.

Figura 4. Ciclo anual de la precipitación y de la temperatura en la región Andina (primera) y ciclo anual de los incendios en Colombia (segunda) en términos del porcentaje de cada mes frente al total anual nacional.*



Fuente: elaboración propia.

* (Cálculos basados en los datos disponibles para el período 1970-2007 en Corporación OSSO, U. EAFIT, LA RED (2010))

El patrón de distribución espacial de los incendios y el ciclo anual se ven alterados recurrentemente por condiciones climáticas anómalas que en algunos años reducen la frecuencia de los eventos de incendio y en otros la incrementan. Estas anomalías están asociadas a la variabilidad climática interanual.

Las fases extremas de la variabilidad climática y los incendios forestales en Colombia

El factor más marcado en la variabilidad climática interanual lo constituyen los fenómenos de El Niño y La Niña, lo que es ampliamente conocido como ciclo ENOS* (Philander, 1990). Estos fenómenos inducen anomalías climáticas en diferentes partes del mundo (Glantz, 1997; 1998, Ropelewski & Halpert, 1987) y en Colombia (Ideam, 1997, 1998; Poveda, 2004; Pabón & Torres, 2007; Puertas & Carvajal, 2008). Para el territorio colombiano El Niño genera condiciones especialmente aptas para la ocurrencia de incendios en la cobertura vegetal. En efecto, en la Figura 5a se presentan las anomalías que El Niño produce en la temperatura media del aire y en la Figura 5b la precipitación, según el Ideam (1997, 1998).

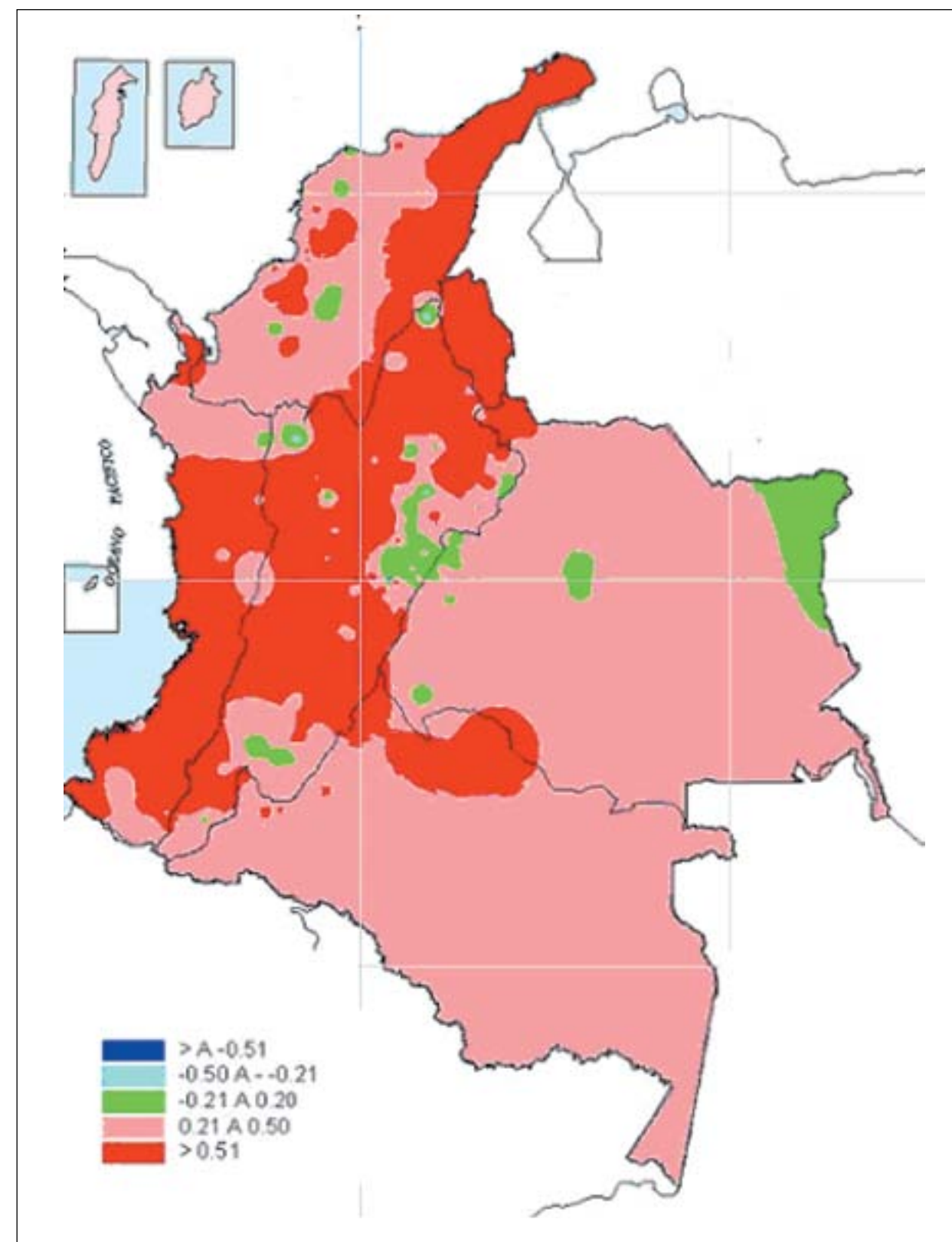
En términos generales este fenómeno propicia: un incremento de la temperatura media mensual del aire de aproximadamente 1°C en comparación con los promedios multianuales (en el suroccidente del territorio colombiano el aumento en algunos eventos de El Niño puede alcanzar los 2°C); reducción de los volúmenes de precipitación en la región in-

terandina y en la región caribe; aumento de los volúmenes de precipitación en la región pacífica, particularmente en el sector sur, así como en el piedemonte llanero y amazónico; alteraciones en los patrones de distribución de la nubosidad y del brillo solar propio de cada región.

La reducción de la precipitación en las regiones andina y caribe, junto con el aumento de la evapotranspiración, efectos propios de El Niño, propicia la disminución del agua que alimenta el suelo, lo que puede causar un grado de sequedad extrema del suelo y de la cobertura vegetal. Esta última, en muchos casos se seca, en otros desaparece y deja al descubierto la capa de suelo, la cual queda expuesta a la acción directa de las primeras lluvias que ocurren al retornar la normalidad. Esta condición, según la pendiente del terreno, facilita la erosión hídrica y la pérdida del suelo. De otra parte, en condiciones de La Niña, el incremento de la precipitación en el piedemonte llanero, el piedemonte amazónico y el sector centro y sur de la vertiente pacífica, conlleva la sobresaturación de los suelos, lo que facilita la remoción en masa en estos sectores.

Bajo los efectos de La Niña los suelos en la región andina, particularmente en los altiplanos (por la baja pendiente de los mismos) y de la región caribe permanecen saturados de humedad tal como ocurre en el norte de la región pacífica, lo que sobresatura los normalmente suelos húmedos de la región.

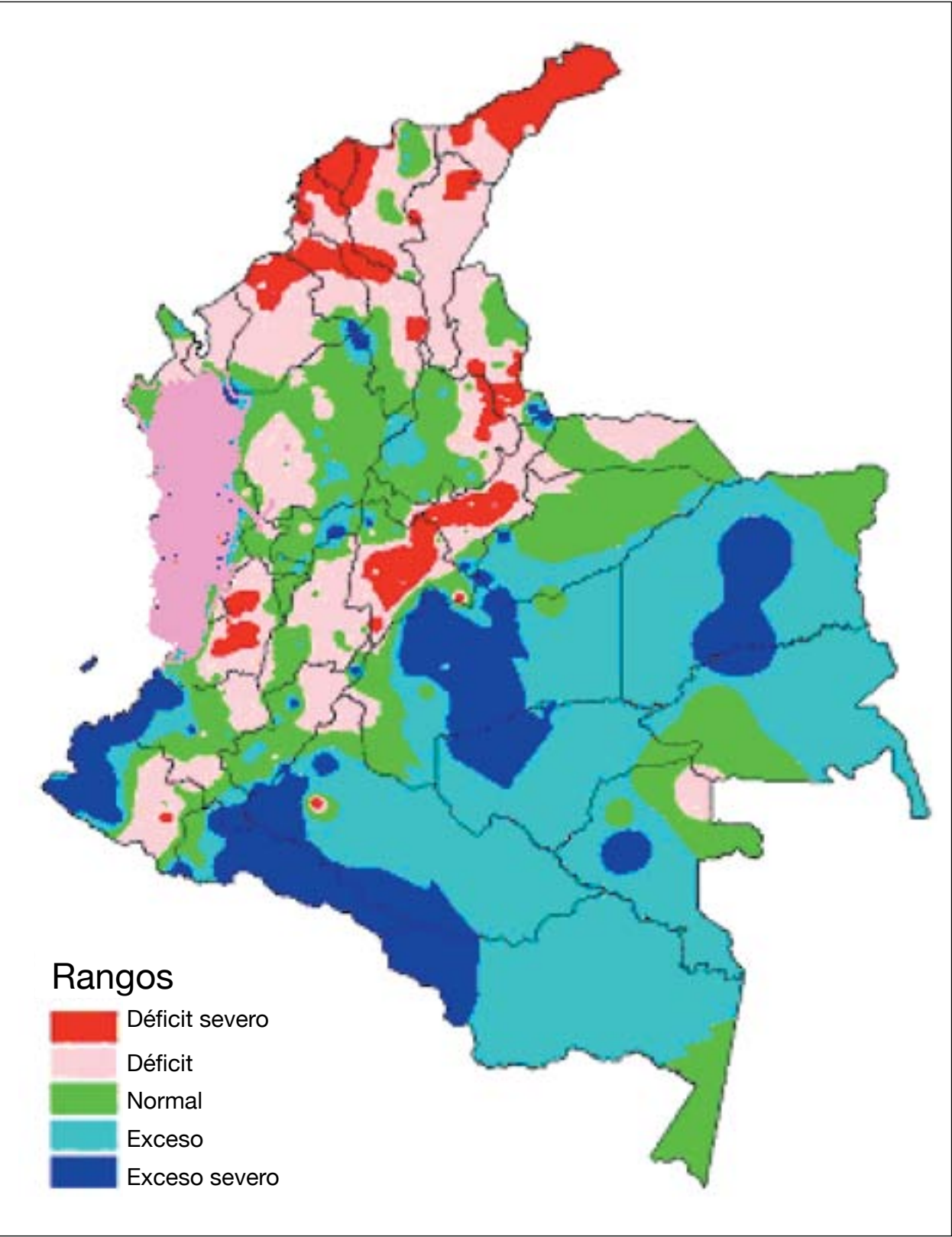
Figura 5a. Anomalías de la temperatura media del aire observada en el territorio de Colombia durante la ocurrencia de un fenómeno de El Niño típico



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Ideam, 1997; 1998).

* Fenómeno oceánico-atmosférico que consiste en la interacción de las aguas superficiales del océano Pacífico tropical con la atmósfera circundante y con la atmósfera global.

Figura 5b. Precipitación observada en el territorio de Colombia durante la ocurrencia de un fenómeno de El Niño típico

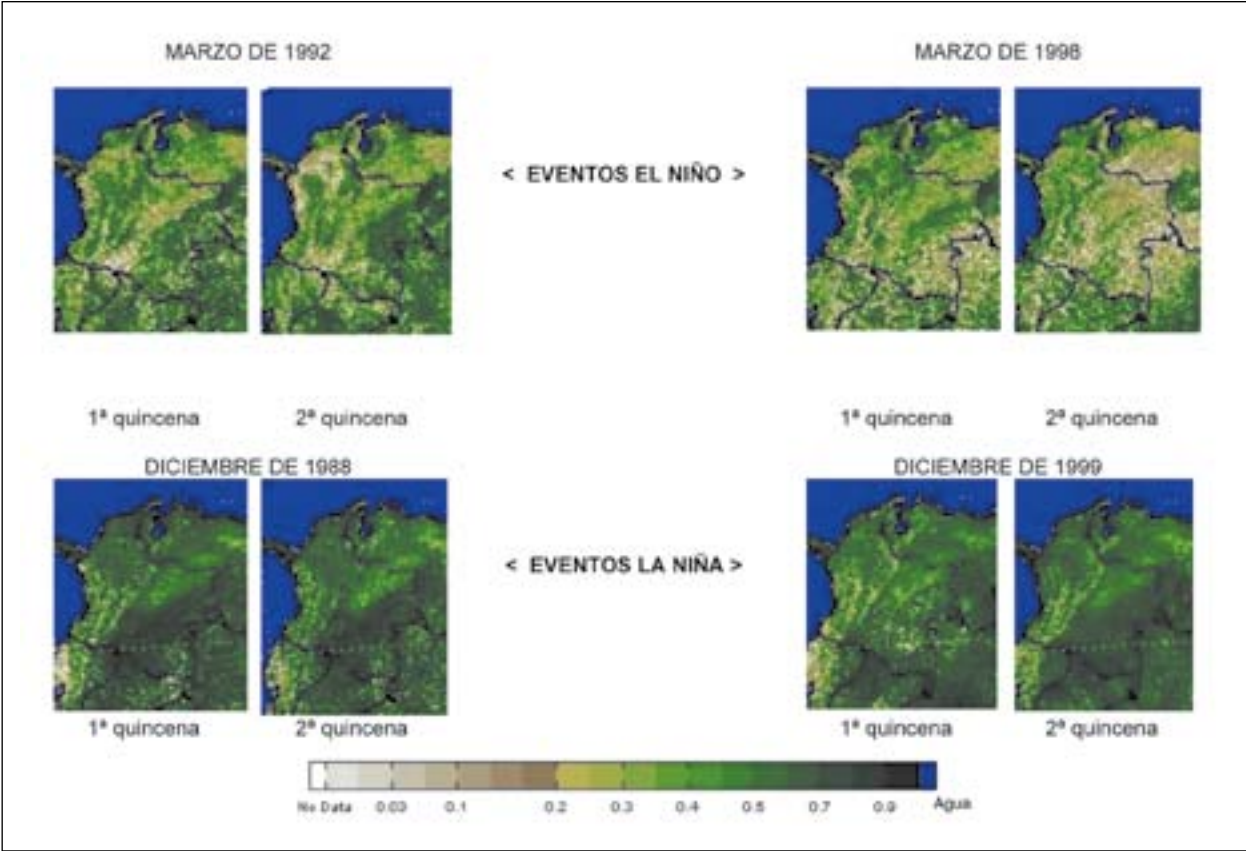


Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – Ideam, 1997; 1998).

Las variaciones interanuales de la humedad del suelo inciden en la cobertura vegetal que lo cubre. El Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada (NDVI) es un indicador del estado de la cobertura vegetal en diferentes regiones, en lo que se refiere al estrés hídrico. La Figura 6 presenta el NDVI sobre el territorio colombiano tal como se observaba en marzo del 1992 (al final del evento El Niño de 1991-1992), en marzo de

1998 (al final del evento El Niño 1997-1998), en diciembre de 1988 (en el medio del evento La Niña de 1988-1999) y en diciembre de 1999 (evento La Niña 1999-2001). En esta composición es fácil detectar a simple vista el efecto de las dos fases extremas sobre la vegetación del país en condiciones del fenómeno de El Niño hay mayor área con vegetación seca; bajo la influencia de La Niña se registra un notorio reverdecimiento de la cobertura vegetal.

Figura 6. Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada (NDVI) sobre el territorio colombiano para meses en los que existía la influencia de El Niño (arriba) o La Niña (abajo)*



Fuente: elaboración propia.

* Las diferentes tonalidades del color verde indican presencia de vegetación, en tanto que los colores café o beige indican vegetación seca. Extractado del Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS), set Suramérica disponible en http://satelite.cptec.inpe.br/ndvi/index_gimms.jsp. La base GIMMS (Tucker at al., 2005) ha sido construida mediante procesamiento de los registros generados por el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) emplazado en los satélites NOAA (NOAA-11 entre noviembre/1988 - agosto/1994 y NOAA-14 entre enero/1995 - octubre/2000).

En los dos eventos de El Niño mostrados el efecto sobre la vegetación fue más marcado en un sector de la región Caribe (departamentos Atlántico, Bolívar, Sucre y Córdoba) y en el norte de la región Pacífica, así como en sectores de la región Andina y una vasta área de la Orinoquía. Así, en las regiones Andina y Caribe, en condiciones de déficit de humedad en el suelo, la vegetación está sometida a estrés hídrico y en muchas áreas se seca completamente, lo que propicia los incendios de la cobertura vegetal; las condiciones de exceso de humedad, por el contrario, saturan los suelos y facilitan los fe-

nómenos de remoción en masa. Si se compara el mapa de la Figura 7 con las imágenes de NDVI registradas en marzo de 1998 (Figura 6, arriba derecha) es posible constatar que los municipios que reportaron incendios en el evento de 1997-1998 se encuentran en los sectores con vegetación seca.

Igualmente, se ha detectado una relación muy estrecha entre la ocurrencia de El Niño y las sequías que se presentan en el país (ver Hurtado, 1996; Hurtado & Cadena, 2001). Las condiciones secas del sistema suelo-cobertura vegetal facilitan la generación de incendios de bosques y matorrales; por ello,

las anomalías hidroclimáticas asociadas a El Niño, incrementan los eventos de incendios forestales. La Figura 7 muestra los municipios del país en los que se presentaron incendios forestales durante El Niño de 1997-1998.

El efecto de las fases extremas de la variabilidad climática sobre la frecuencia de los incendios forestales se ilustra en la Figura 8, donde se presenta el índice estandarizado de incendios en diferentes años del período 1970-2001. Se puede apreciar que hay notorios incrementos de este índice en los años 1972, 1977, 1979, 1982-1983, 1991-1992, 1997 y 2001, muchos de los cuales fueron años en los que predominaron condiciones de El Niño. También se observan valores bajos del índice en los años 1970-1972, 1975, 1980-1981, 1984, 1993-1994, 1996, 1999-2000, 2005-2006 gran parte de los cuales corresponden a años de La Niña (hay que tener en cuenta que en el

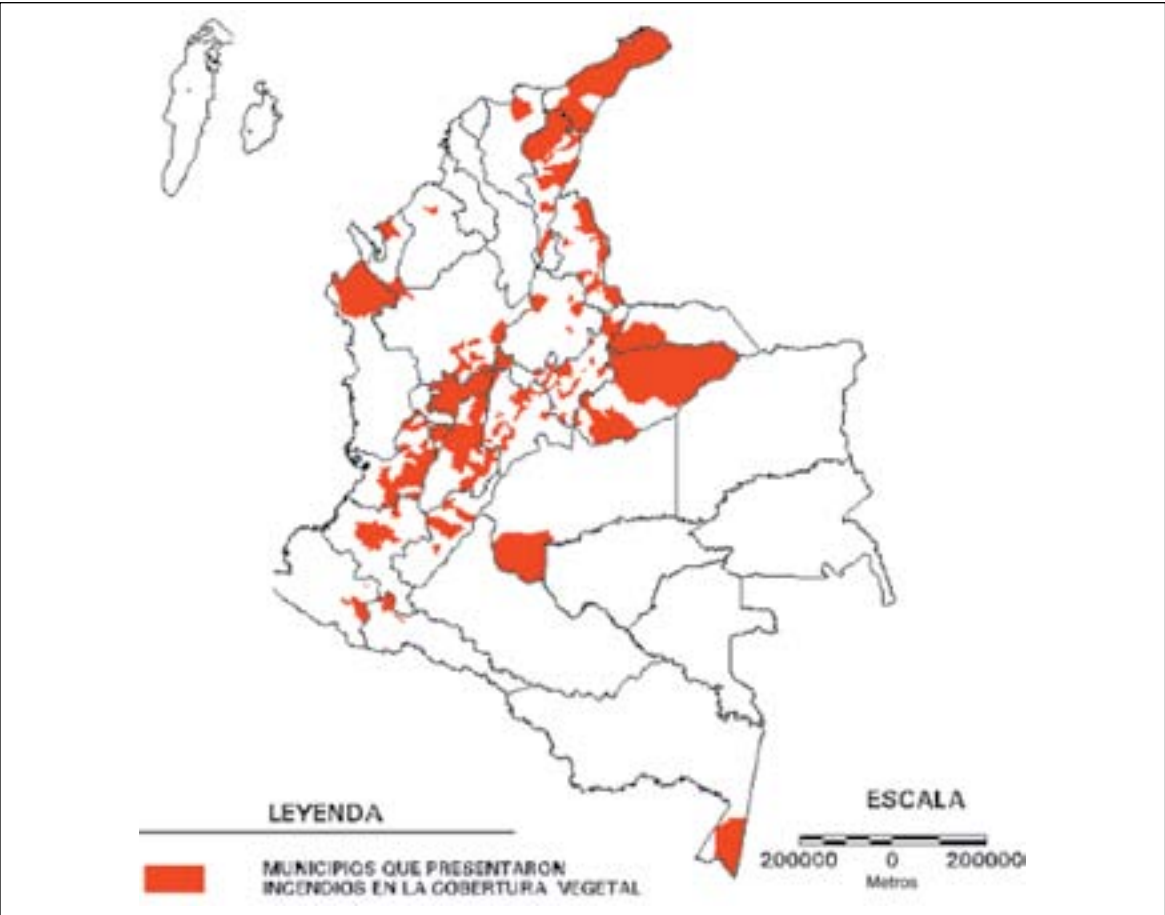
año 2002 hay un *outlier*, 287 incendios, el cual se descarta en el presente análisis).

De lo anterior es posible afirmar que en condiciones de El Niño los incendios forestales incrementan su frecuencia en las regiones Andina y Caribe en el territorio colombiano. Las condiciones de La Niña reducen la ocurrencia de los incendios.

Cambio climático y los incendios forestales en Colombia

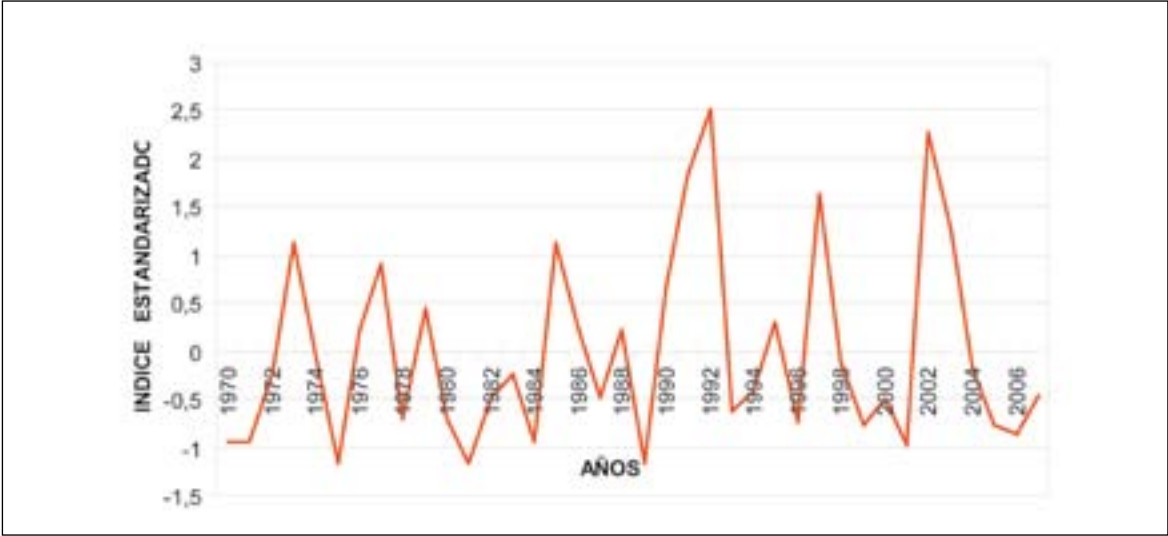
Aunque diferentes autores (Pabón, 2003) han señalado las tendencias que en el largo plazo están ocurriendo en la temperatura del aire y en la precipitación asociadas a la expresión del cambio climático en el territorio colombiano, no es posible identificar una tendencia en la frecuencia de incendios forestales. (Hay que recordar

Figura 7. Municipios del territorio colombiano afectados por incendios de la cobertura vegetal durante el período marzo de 1997 y marzo de 1998



Fuente: IDEAM - DPAD, 2002.

Figura 8. Variabilidad interanual del índice estandarizado de incendios forestales en Colombia*



Fuente: elaboración propia.

* Se presenta la serie del índice estandarizado, el número anual de incendios reportados y el valor que corresponde en ese año en la línea de tendencia

que la tendencia reportada en la Figura 1 se debe más a la evolución del sistema de seguimiento de los incendios que a una causa natural, que si la hubiera sería difícil detectarla en esa serie).

No obstante, las evidencias del aumento de la temperatura del aire y de disminución de la precipitación en la región Caribe y en un vasto sector de la región Andina en los últimos cincuenta años, permiten suponer que el número de incendios podría estar incrementándose; sin embargo, no hay datos con la calidad suficiente que permitan establecer esta tendencia con algún grado de certeza.

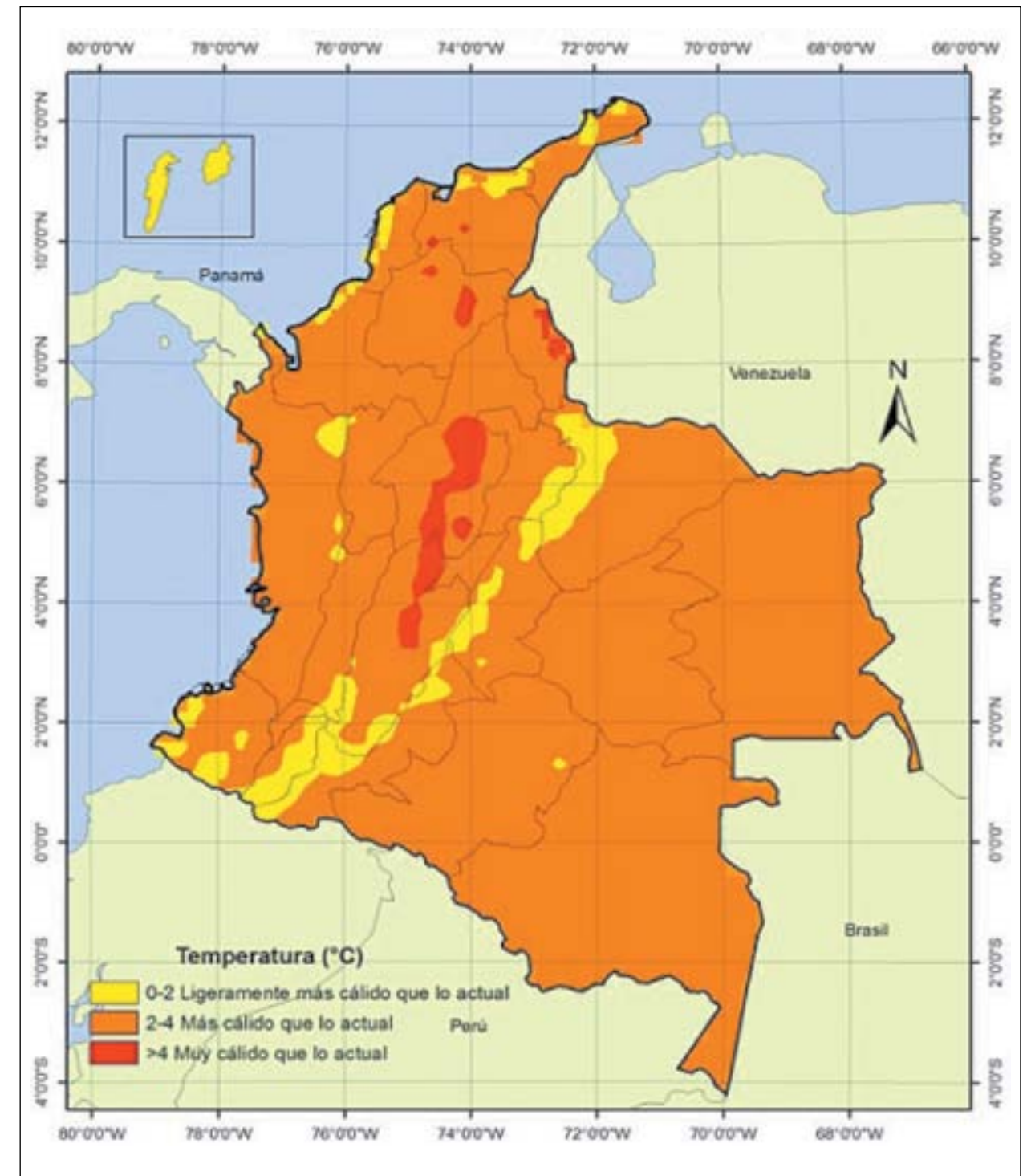
Para intentar prever el comportamiento de los incendios forestales en un clima cambiado hacia finales del siglo XXI es necesario analizar las condiciones climáticas posibles para esa época. En la Figura 9 se presentan los cambios que habría en la temperatura anual del aire y en la precipitación anual comparando el clima 1961-1990 (clima actual) y el clima del período 2070-2100, en uno de los escenarios del panel Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático (véase IPCC, 2000), planteado por Pabón (2008). En este escenario se registraría un calentamiento generalizado en el país del orden de 2-4°C, con sectores en donde tal calentamiento podría sobrepasar los 4°C. Gran parte de las regiones Andina y Caribe se tornarían más secas que lo actual, con reducciones

de la precipitación que en sectores amplios sobrepasarían el 30% de lo que llueve al año en nuestros días. En la Amazonia y la Orinoquia, los cambios de la precipitación no serían tan marcados, mientras que en sectores de la región Pacífica y un área localizada en el Magdalena Medio la precipitación aumentaría. Estos escenarios concuerdan con los presentados por Ruiz (2010).

Al buscar situaciones climáticas similares experimentadas en el territorio colombiano en fases extremas de la variabilidad climática encontramos que justamente las observadas bajo la influencia de El Niño servirían de análogo climático: los mapas de las Figuras 9a y 9b se asemejan bastante. En condiciones de El Niño la reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura del aire crean condiciones que facilitan la ocurrencia de los incendios forestales. El aumento de la temperatura media del aire (de cerca de 1°C) y la reducción de la precipitación (entre el 30% y el 50%) en la región andina durante El Niño y La Niña en 1991-1992 y en 1997-1998, incrementaron marcadamente (dos veces el promedio) el número de incendios.

El escenario de cambio climático presentado en las Figuras 9a y 9b significa que hacia el 2070-2100 habría un incremento significativo en el promedio del número de incendios, particularmente en las regiones Andina y Caribe.

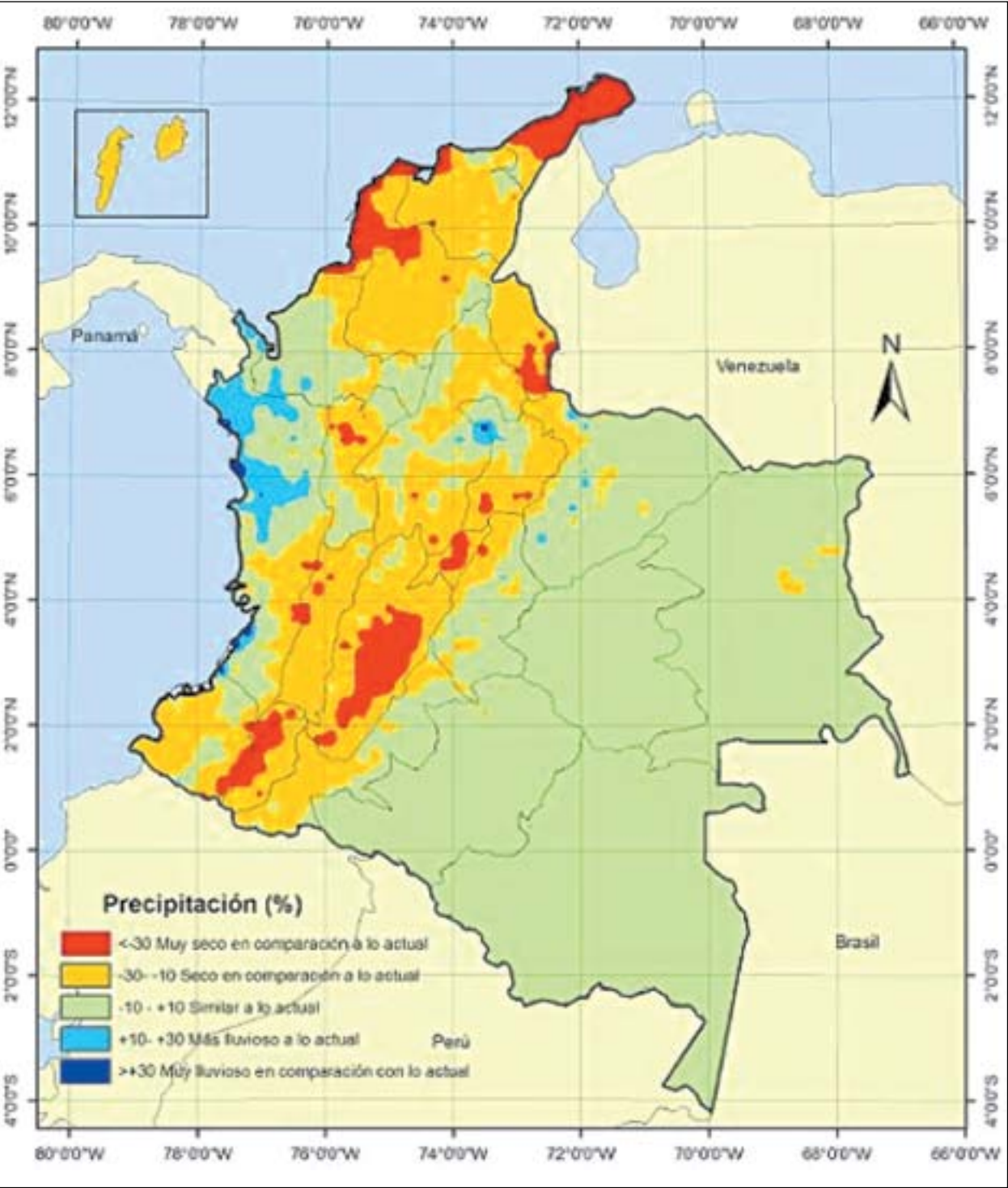
Figura 9a. Cambios de la temperatura media del aire hacia finales del siglo XXI en el escenario A2*



Fuente: Tomado de Pabón, 2008.

* Estos han sido calculados como la diferencia entre el promedio multianual del período 2070-2100 (escenario A2) y el del período 1961-1990. El color rojo en el mapa 9a, indica que habría un calentamiento mayor de 4°C en esas regiones.

Figura 9b. Cambios de la precipitación anual hacia finales del siglo XXI en el escenario A2*



Fuente: Tomado de Pabón, 2008.

* El color rojo en el mapa 9b, muestra reducción de precipitación de más del 30% del volumen anual 1961-1990; el color azul señala aumentos de precipitación de más del 30% del valor anual 1961-1990.

Conclusiones y recomendaciones

El análisis efectuado permite concluir lo siguiente:

- En la ocurrencia de los incendios forestales en Colombia hay una clara distribución espacial y estacional. Aunque los incendios se pueden registrar en cualquier sector del país, la región más amenazada por este tipo de eventos es la Andina (Valle del Cauca y del Magdalena, así como el altiplano cundi-boyacense), seguida por sectores de la Orinoquia y el Caribe. Durante el año, los períodos en los que más ocurren incendios de la cobertura vegetal son enero-febrero-marzo y julio-agosto-septiembre, que coinciden con las fases mínimas del ciclo de lluvias de diferentes regiones del país.
- Las anomalías climáticas (mayor temperatura media del aire y déficit de precipitación) asociadas a la influencia de El Niño incrementan notablemente (hasta en más de dos veces el promedio) el número de incendios que ocurren en el país.
- El cambio climático que se está presentando sobre el territorio colombiano generaría condiciones que conllevarían un incremento marcado en el número de incendios de la cobertura vegetal que ocurrirían en el país en el futuro.

El presente trabajo recomienda:

- En la gestión del riesgo asociado a los incendios de la cobertura vegetal en Colombia se debe prestar especial atención a las regiones Andina, Caribe y sectores de la Orinoquia.

- Buscar mecanismos que mejoren las bases de datos y el sistema de información relacionado con los incendios de la cobertura vegetal en el país.
- En la gestión del riesgo por incendios de la cobertura vegetal, intensificar las acciones preventivas, la vigilancia y el control en épocas de El Niño.
- Incorporar paulatinamente en la gestión de riesgos por incendios forestales medidas que, con base en el manejo del componente antropogénico, permitan controlar la tendencia creciente del número de eventos que ocurrirían por el cambio climático.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el marco de las líneas de investigación del grupo Tiempo, clima y sociedad adscrito al Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, de la Universidad Nacional de Colombia.

Bibliografía

- Corporación Osso, U. EAFIT, LA RED (2010): *Inventario histórico de desastres de Colombia 1914-2009*. Disponible en online.desinventar.org.
- Dale V.H., Joyce L.A., McNulty S., Neilson R.P., Ayres M.P., Flannigan M.D., Hanson P.J., Irland L.C., Lugo A.E., Peterson C.J., Simberloff D., Swanson F.J., Stocks B.J. y Wotton M., (2001). *Climate change and forest disturbances*. *BioScience*, 51 (9), 723-734.
- Flannigan M.D., Wotton B.M. (2001). "Climate, Weather, and Area Burned. In: Forest

- Fires, Behavior and ecological effects" (Johnson E.A., Miyanishi K., (Eds) 2001: *Forest Fires, Behavior and ecological effects*, Academic Press, USA), 351-374.
- Glantz M.H., (1997). *Currents of Change*. Cambridge University Press. Cambridge. UK, 194.
- Glantz M.H., (1998). *Full Summary of Review of the Causes and Consequences of Cold Events: A La Niña Summit*. 15-17 July / 1998, Boulder Colorado. Disponible en: <http://www.esig.ucar.edu/lanina>.
- Hurtado G., (1996). *Estadísticas de la sequía meteorológica en Colombia*. IV Congreso Colombiano de Meteorología. Bogotá, Marzo de 1996.
- Hurtado G., Cadena M.C., (2001). Aplicación de índices de sequía en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 5, 31-137.
- IDEAM, (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogota D.C., NN.
- IDEAM-DPAD, (2002). *Efectos naturales y socioeconómicos del fenómeno El Niño en Colombia*. Publicación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y de la Dirección para la Prevención y Atención de Desastres. Bogotá D.C., 52.
- IDEAM-MAVDT, (2010). *Segunda Comunicación Nacional de Colombia ante la Convención Marco de las naciones Unidas sobre Cambio Climático*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá D.C.
- IPCC, (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Edited by N. Nakicenovic and R. Swart. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NJ, USA.
- IPCC, (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policemakers*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Paris, February 2007.
- Latham D., Williams E., (2001). "Lighting and forest fires. In Behavior and ecological effects" (Johnson E.A., Miyanishi K., (Eds) 2001: *Forest Fires, Behavior and ecological effects*, Academic Press, USA), 376-415.
- Márquez G., (2000). *Sistemas Ecológicos y Sociedad en Colombia*. Disponible en: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/IDEA/2010615/html/profesor.html>.
- Nash C.H., Johnson E.A., (1996). "Synoptic climatology of lightning-caused forest fires in subalpine and boreal forests". *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 1859-1874.
- Pabón J.D., (2003). "El cambio climático global y su manifestación en Colombia". *Cuadernos de Geografía*, XII (1-2), 111-119.
- Pabón J.D., (2006). "Escenarios de cambio climático para Colombia". En: *Memorias del IV Encuentro de la Red de Universidades del Pacífico Sur* (RUPSUR), 8-10 de noviembre de 2006.
- Pabón J.D., (2007). "El cambio climático en Colombia. Tendencias actuales y proyecciones para el siglo XXI". En: *Memorias de la Primera Conferencia Internacional de Cambio Climático: Impacto en los Sistemas de Alta Montaña*. (IDEAM-Universidad de Zurich. Bogotá D.C., Zurich, 294), 31-48.
- Pabón J.D., (2008). *Escenarios de cambio climático para 24 regiones de Colombia*. Informe presentado en el marco del proyecto Integrated National Adaptation Pilot (INAP). Conservación Internacional – Departamento de Geografía (Universidad Nacional de Colombia). Bogotá D.C., 15.
- Pabón J.D., (2009). "Tendencias en el desarrollo conceptual de la climatología, sus avances en el siglo XX y su contribución al progreso de la geografía". En *Lecturas en Teoría de la Geografía*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Pabón J.D., y Torres G., (2007). "Impacto socioeconómico de los fenómenos El Niño y La Niña en la Sabana de Bogotá durante el siglo XX". *Cuadernos de Geografía*, 16, 81-94.
- Philander S.G.H., (1990), *El Niño, La Niña and Southern Oscillation*. Academic Press, 291.
- Poveda, G. (2004). "La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna". *Revista Academia Colombiana de Ciencias*, 28 (107), 201-222.
- Puertas O.L., y Carvajal Y., (2008). "Incidencia de El Niño Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia utilizando el Climate Explorer". *Ingeniería & Desarrollo*, 23, 104-118.
- Ropelewski C.F., Halpert M.S., (1987). "Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation". *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1606-1626.
- Ruiz F., (2010). *Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100)*. Nota Técnica de IDEAM, IDEAM-METEO/005-2010, Bogotá D.C., 91.
- Schoennagel, T., Veblen T.T., y Romme W.H., (2004). "The interaction of fire, fuels, and climate across Rocky Mountain forests". *BioScience*, 54, 661-676.
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D.A., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E.F., El Saleous, N. (2005). "An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data". *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4485-4498.
- Viegas, D.X. (1998). "Weather, fuel status and fire occurrence: predicting large fires". In: Moreno, J.M. (ed.). *Large forest fires*. Backhuys Publishers, The Netherlands. 31-48.

Incidencia de los incendios forestales sobre la cubierta del suelo en Colombia a partir de información derivada de imágenes Modis del período 2000-2009

DOLORS ARMENTERAS-PASCUAL¹
FEDERICO GONZÁLEZ-ALONSO²
MÓNICA MORALES RIVAS³

Resumen

Los incendios forestales inciden sobre la cubierta del suelo y son un factor importante sobre la dinámica de la vegetación y el uso del suelo. En este estudio se analiza la distribución en el tiempo y en el espacio del área quemada y las anomalías térmicas (focos de calor) detectadas por el sensor Modis para todo el territorio colombiano entre diciembre de 2000 y febrero de 2009. Se presenta un análisis de la dinámica interanual y la mensual de la superficie afectada por los incendios para distintas cubiertas del suelo y regiones naturales del país. La Orinoquia y los herbazales son la región y el tipo de

cubierta más afectados, pero los bosques en la Amazonia y los pastos en el Caribe deben recibir atención. Unas 3.609.750 hectáreas han sido afectadas entre diciembre de 2000 y diciembre de 2008, de las cuales un 57% por lo menos fueron dos veces quemadas en este periodo. Se presenta además el análisis de los resultados utilizando una combinación de productos relacionados como son los focos activos y el área quemada para el país con un buen nivel de coincidencia. La información proporcionada por este tipo de análisis puede ser de gran utilidad para la toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales en el país.

- 1 Ph.D en Geografía del King's College London, U.K. Profesora Asociada del Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia. darmenterasp@unal.edu.co.
- 2 Jefe del Laboratorio de Teledetección, CIFOR – INIA. España. alonso@inia.es.
- 3 Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia. mmoralesr@unal.edu.co.

Palabras clave: área quemada, foco activo, fuego, patrones, cubierta del suelo.

Abstract

Wildfires affect ground cover and are an important factor on the vegetation and land use dynamics of soils. In this study the burned area distribution is analysed in time and space and the thermal anomalies (hotspots), detected by the Modis sensor for the Colombian territory between December of 2000 and February of 2009. An analysis is undertaken of the inter-annual and monthly dynamics of the surface affected by fires for the different land covers and natural regions of the country. The Orinoquia and grasslands are the most affected type of cover, but the forests in the Amazonia and the grasslands in the Caribbean should also receive attention. About 3.609.750 hectares have been affected between December of 2000 and December of 2008, of which at least 57% were burned twice in that period. The analysis of the results using a combination of related phenomenon, such as hotspots and the burned area are presented for the country with a high level of coincidence. The information provided by this type of analysis can be very useful for the decision making in the management of natural resources in this country.

Key words: burned area, hotspot, fire, patterns, ground cover.

Introducción

Desde hace miles de años el fuego ha dejado de ser una fuerza natural que modifica el paisaje para convertirse, en la mayoría de

los casos, en una herramienta antrópica que permite adaptar el ambiente con rapidez y facilidad a las necesidades del hombre. Estos fuegos antropogénicos no sólo se han hecho más frecuentes y extensivos, sino que afectan cada vez más a los ecosistemas naturales y disminuyen su resiliencia (Roberts, 2000). Aunque el fenómeno del fuego afecta por igual a casi todas las regiones del planeta (con excepción de las áreas sin vegetación, como desiertos y polos), el énfasis en la investigación del fuego estuvo durante mucho tiempo en los ecosistemas subtropicales y templados, y sólo desde la última década ha comenzado a desarrollarse investigación en torno a los fuegos de las regiones tropicales, especialmente bosques y sabanas, y a su impacto sobre el uso y la cubierta del suelo (Roberts, 2000). El cambio de usos del territorio es reconocido como uno de los principales impactos globales sobre la biodiversidad, con el cambio climático, la fijación del nitrógeno y la introducción de especies exóticas. Tales procesos causan importantes alteraciones a todos los niveles en la diversidad biológica (desde la diversidad de ecosistemas hasta la diversidad genética intrapoblacional) y por consiguiente, son causa de serias alteraciones tanto en el funcionamiento de los ecosistemas como en su capacidad de proporcionar bienes y servicios a la humanidad. El retroceso de los ecosistemas naturales se ha visto acelerado por quemaduras frecuentes, en unos casos con la finalidad de renovar los pastizales y mejorar su palatabilidad para el ganado, y en otros, para facilitar la implantación de nuevas áreas de cultivo. Estas quemaduras de vegetación tienen a su vez fuertes impactos en las emisiones de

gases de efecto invernadero (Van der Werf *et al.*, 2006).

La aparición de nuevos sensores remotos, como Modis, Spot y ATSR-2, ha facilitado el estudio y seguimiento espacio-temporal de los incendios forestales. Este tipo de información ha permitido producir estadísticas globales de incidencia de incendios forestales a nivel global (Giglio *et al.*, 2005, Tansey *et al.* 2004, Simon *et al.*, 2004). Adicionalmente a los productos globales de área quemada, también se han generado productos regionales. Chuvieco *et al.*, (2008) generaron un producto de área quemada para Latinoamérica en el año 2004, denominado AQL2004, el cual estimó el área afectada para todo el continente latinoamericano en 153.215 km², de los cuales 19.449 km² correspondieron a Colombia (12,69% del área quemada en el continente en 2004).

La comparación de productos globales de área quemada es problemática, pues las cifras que se han obtenido en diferentes productos son, en algunos casos, muy diferentes. Chang y Song (2009) han comparado los productos globales de área quemada L3JRC (Tansey *et al.*, 2008) y MOD45 para el período 2000-2006 y han obtenido unas cifras medias globales de área quemada de 4.010.858 km² y 3.465.434 km² respectivamente. El valor promedio de esta área quemada para dicho período en el caso de Sudamérica, según las estimaciones de L3JRC, fue de 360.882 km², lo cual representa el 8,99% del total de área quemada mundial.

En el caso del producto MOD45 la cifra promedio de área quemada para el periodo

2000-2006 para Sudamérica fue de 176.601 km², lo cual representa el 5.09% del área quemada mundial según MOD45. Según las estimaciones de L3JRC cada año se quema en promedio el 2% de Sudamérica y según las estimaciones de MOD45 el 0,99% del continente. (Chang y Song, 2009). En el contexto latinoamericano Román-C. *et al.*, (2003), Cochrane & Schulze (1998) y Armenteras *et al.*, (2009) son algunos ejemplos de investigaciones recientes sobre el comportamiento temporal y espacial de los incendios forestales en México, Brasil y Colombia, respectivamente.

La estadística de los incendios forestales en Colombia no es muy bien conocida y no existen datos concordantes acerca de su magnitud. Así, el proyecto GLOBSCAR2000 evalúa esta cifra en 14,866 km² (Simon *et al.*, 2004), el proyecto GBA2000 cita 9.692 km² (Tansey *et al.*, 2004), el proyecto AQL2004 menciona 19.500 km² (Chuvieco *et al.*, 2008), y para el área concreta de los Llanos colombianos Armenteras *et al.* (2005) mencionan 4.882 km² para el año 2001. Según los datos de GLOBSCAR2000 (Simon *et al.*, 2004), Colombia ocupa el cuarto lugar en la relación entre área quemada y superficie total del país, en comparación con el resto de Latinoamérica. Por tanto, mejorar el conocimiento del fenómeno de los incendios forestales en Colombia y en general de las quemaduras de biomasa que ocurren es un asunto de una gran importancia para el país y para la región, en el contexto de la conservación de los recursos naturales, el desarrollo sostenible y la mitigación de los efectos causados por el calentamiento global.

En este estudio se plantea, primero, hacer un seguimiento interanual (comparando las

cifras de cada año entre enero y diciembre para el periodo 2001-2008) e intranual (mensualmente entre diciembre 2000 y marzo 2009) del área quemada y analizar su relación con las cubiertas del suelo y las regiones naturales del país. Adicionalmente se analiza la relación entre el área quemada reportada y el número de focos activos detectados en Colombia.

Material y métodos

Área de estudio y fuentes de información

El área de análisis corresponde a la totalidad del territorio terrestre continental de Colombia, que equivale a un poco más de 113 millones de hectáreas. Se utilizaron varias fuentes de información para el análisis de las áreas quemadas y de los focos activos de incendios: (i) serie temporal de área quemada, producto MOD 45, Área Quemada, confiabilidad 1. (Roy *et al.*, 2005; Boschetti *et al.*, 2009) para el período y (ii) una serie temporal de anomalías térmicas o focos de calor (i.e. *hotspot*) detectadas por el sensor Modis y procesadas en la Collection 4 Active Fire dataset (FIRMS, 2007), desde diciembre de 2000 a marzo de 2009.

La Agencia Espacial de los Estados Unidos de América (Nasa) dispone en sus satélites Terra y Aqua de un espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (Modis), el cual les ha permitido generar una serie de productos Modis globales, incluyendo el MOD45, denominado Área Quemada,

que posee una resolución de 500m. (Roy *et al.*, 2005). Para este estudio se recopilamos los conjuntos de datos mensuales de este producto Modis para el período diciembre de 2000 a marzo de 2009. Para los análisis de área quemada anuales sólo se consideró la información del período enero 2001 a diciembre 2008. Entre otros aspectos, este producto reporta la calidad del dato de área quemada a nivel del pixel (QA), en una escala que va de uno (más confiable) a cuatro (menos confiable); en el caso de este estudio sólo se seleccionaron aquellos pixeles de 500 m con QA igual a uno. Las imágenes recopiladas para el período de análisis y la totalidad del territorio terrestre colombiano (escenas h9-v9, h10-v7, h10-v8, h10-v9, h11-v7, h11-v8, h11-v9) fueron convertidas a formato GEO-TIFF, reproyectadas y fusionadas para crear un conjunto de información para cada uno de los meses analizados.

Los focos de calor o anomalías térmicas (*hotspots*) fueron adquiridos a través de FIRMS* (Archiving and Distributing Modis Active Fire Data, Collection 4; Davies *et al.*, 2009) en formato shapefile, con información sobre la ubicación geográfica, día y hora de la toma del dato y su nivel de confiabilidad (para el presente estudio se tomó una confiabilidad igual o mayor al 90%) y satélite con el cual se adquirió la información (Giglio *et al.*, 2003).

Las unidades de análisis de este estudio asociadas con el estado de la cubierta del suelo, resultaron de la integración de información cartográfica digital de regiones naturales y de

la propia cubierta del suelo. Las cinco regiones naturales fueron derivadas del Modelo de Elevación Digital (DEM), (Figura 1), (SRTM 2002), tomando como límites la cota 500 msnm y, en el caso de la Amazonia y la Orinoquia, el límite entre la sabana (Llanos Orientales) y el bosque. Formaciones montañosas aisladas como la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía del Baudó y demás, fueron integradas a la región natural correspondiente (Caribe y Pacífico, principalmente).

El segundo componente, la cubierta del suelo, corresponde a una recategorización de la cartografía de ecosistemas continentales,

costeros y marinos de Colombia (Ideam *et al.*, 2007) para el año 2000, escala 1:500.000. Esta fuente de información detalla 23 unidades de cubierta (clases) para todo el país, las cuales fueron integradas en siete unidades para los propósitos de este estudio: bosques, bosques secos, herbazales, áreas agrícolas, pastos, vegetación secundaria y otros. Los bosques, bosques secos y herbazales corresponden a cubiertas del suelo de origen natural, con hábitos arborescentes, en los dos primeros casos y herbáceos en el tercero. Las cuatro cubiertas restantes han sido objeto de algún tipo de transformación humana con fines esencialmente productivos.

Figura 1. Regiones naturales de Colombia



Fuente: dirección de ecosistemas MAVDT

* Fire Information for Resource Management System.

En el caso de este estudio resulta de particular importancia distinguir entre los herbazales y los pastos, ambos con hábitos herbáceos, pero con distintas dinámicas naturales y de uso humano. Los herbazales incluyen las sabanas de la Orinoquia y los páramos de los Andes, mientras que los pastos, de origen antrópico, se distribuyen en la totalidad del territorio colombiano. (Figura 2). De la integración de estas dos fuentes de información surgió la cartografía de unidades de cubierta/región (Figura 1), la que permite caracterizar el área de estudio en 27 diferentes unidades de análisis.

Análisis de datos

Para analizar los patrones de áreas quemadas, las anomalías térmicas y la cubierta del suelo, se preparó una base de datos integrada en un sistema de información geográfica. Para el producto de área quemada mensual se procedió a eliminar las posibles superposiciones de áreas quemadas entre meses contiguos (i.e. se removieron aquellos píxeles que aparecían como quemados en el mes anterior). Por medio de operaciones simples de intersección de mapas y extracción de áreas superpuestas se calculó mes a mes el área afectada por quemas y detectada como quemada con los diferentes tipos de cobertura. Estos datos se sintetizaron anualmente sumando la superficie quemada mes a mes durante todo el período analizado para cada una de las diferentes unidades de análisis. También se analizó la recurrencia de incendios a lo largo del periodo. Para verificar la consistencia de los datos se estudió la correlación entre el área quemada y el producto

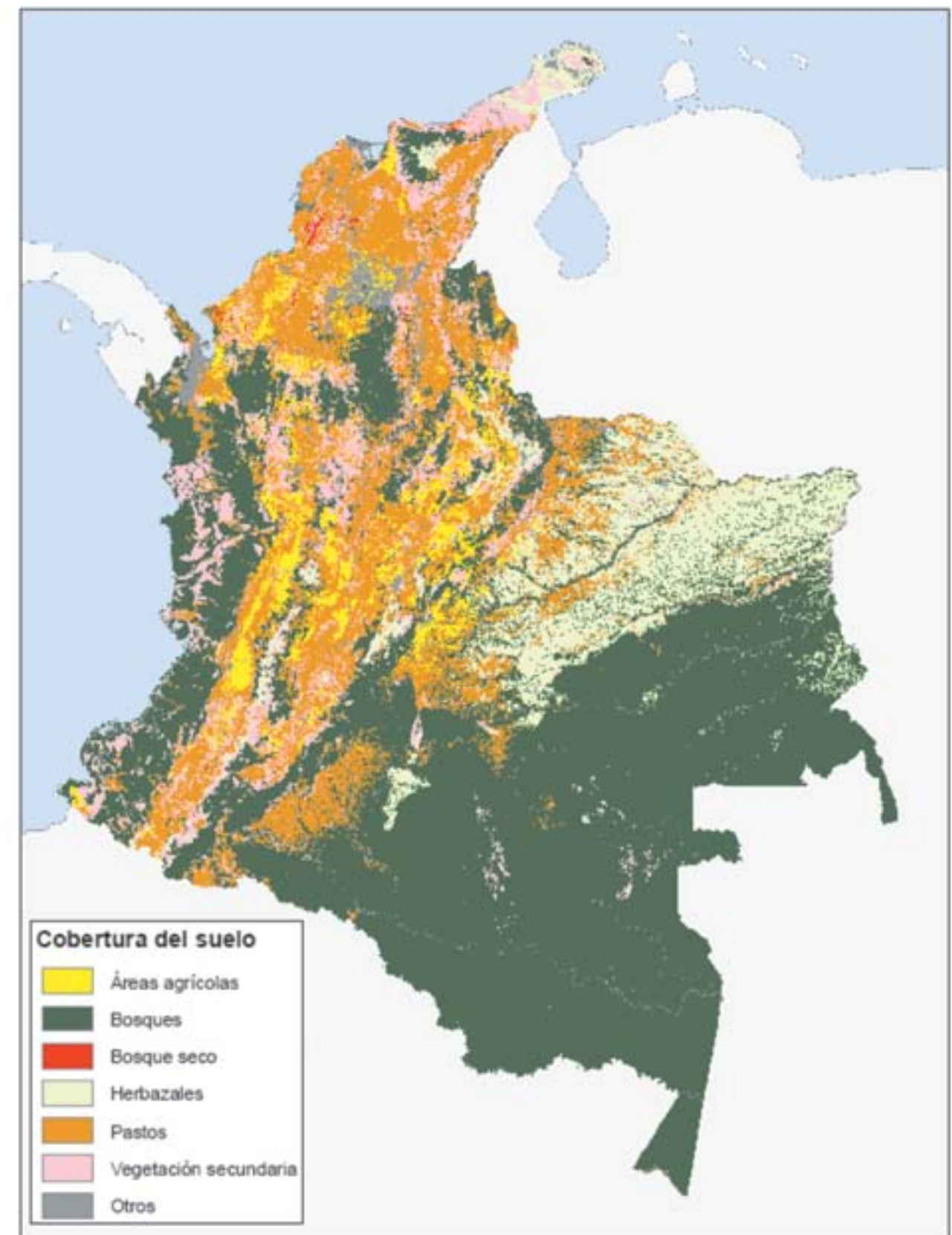
de focos activos mes a mes para el período 2000-2008. También se validaron los datos de áreas quemadas con el uso de imágenes de alta resolución Landsat (ETM Path 6 Row 56 del 16 Feb 2001) con datos derivados de un estudio anterior también de alta resolución, utilizando el estadístico Kappa, con los datos previamente reportados para la zona (Armenteras *et al.*, 2005).

Resultados

Pese a que algunas regiones naturales de Colombia han sido sometidas a considerables niveles de intervención antrópica sobre la cubierta del suelo (especialmente los Andes y el Caribe), aún puede considerarse que el país está dominado por bosques, los cuales suman un poco más de 61 millones de hectáreas. De éstos, los más extendidos son los bosques de la Amazonia, que ocupan el 36,57% del territorio terrestre del país (41.629.725 ha). A esta unidad de cubierta/región le siguen en superficie los bosques de los Andes, con 9.434.083 ha. (8,29%). Completan el conjunto de las cinco unidades de cubierta/región más extendidas los pastos de los Andes (8,04%), los herbazales de la Orinoquia (8,04%) y los pastos del Caribe (6,32%). En general, los bosques equivalen al 53,62% del área de estudio; los pastos, al 19,67%; los herbazales al 10,80%; la vegetación secundaria, al 9,26%; las áreas agrícolas, al 3,86% y los bosques secos, al 0,15% (Tabla 1).

El territorio anteriormente descrito, en términos de cubierta del suelo/región, se vio afectado por incendios forestales durante al período de análisis (por lo menos en una ocasión) en una extensión total de 3.609.750 ha (3,17% del país). Los resultados presentan

Figura 2. Cobertura vegetal para Colombia



Fuente: Dirección de Ecosistemas

Tabla 1. Extensión (ha) de las diferentes unidades de cubierta/región

Región	Cubierta Suelo	Area (ha)	Porcentaje Territorio (%)
Andes	Áreas agrícolas	2.964.258	2,60
	Bosques	9.434.083	8,29
	Bosques secos	8.329	0,01
	Herbazales	1.182.203	1,04
	Pastos	9.155.455	8,04
	Vegetación secundaria	5.149.756	4,52
Amazonia	Áreas agrícolas	8.468	0,01
	Bosques	41.629.725	36,57
	Herbazales	1.241.079	1,09
	Pastos	1.960.153	1,72
	Vegetación secundaria	551.752	0,48
Caribe	Áreas agrícolas	867.916	0,76
	Bosques	2.193.957	1,93
	Bosques secos	159.886	0,14
	Herbazales	728.812	0,64
	Pastos	7.197.375	6,32
	Vegetación secundaria	2.974.983	2,61
Orinoquia	Áreas agrícolas	420.004	0,37
	Bosques	3.310.462	2,91
	Herbazales	9.148.623	8,04
	Pastos	3.344.790	2,94
	Vegetación secundaria	367.133	0,32
Pacífico	Áreas agrícolas	131.395	0,12
	Bosques	4.477.838	3,93
	Pastos	739.859	0,65
	Vegetación secundaria	1.502.350	1,32
Otros		2.997.985.9	2,63
TOTAL		113.848.632	

Fuente: elaboración propia.

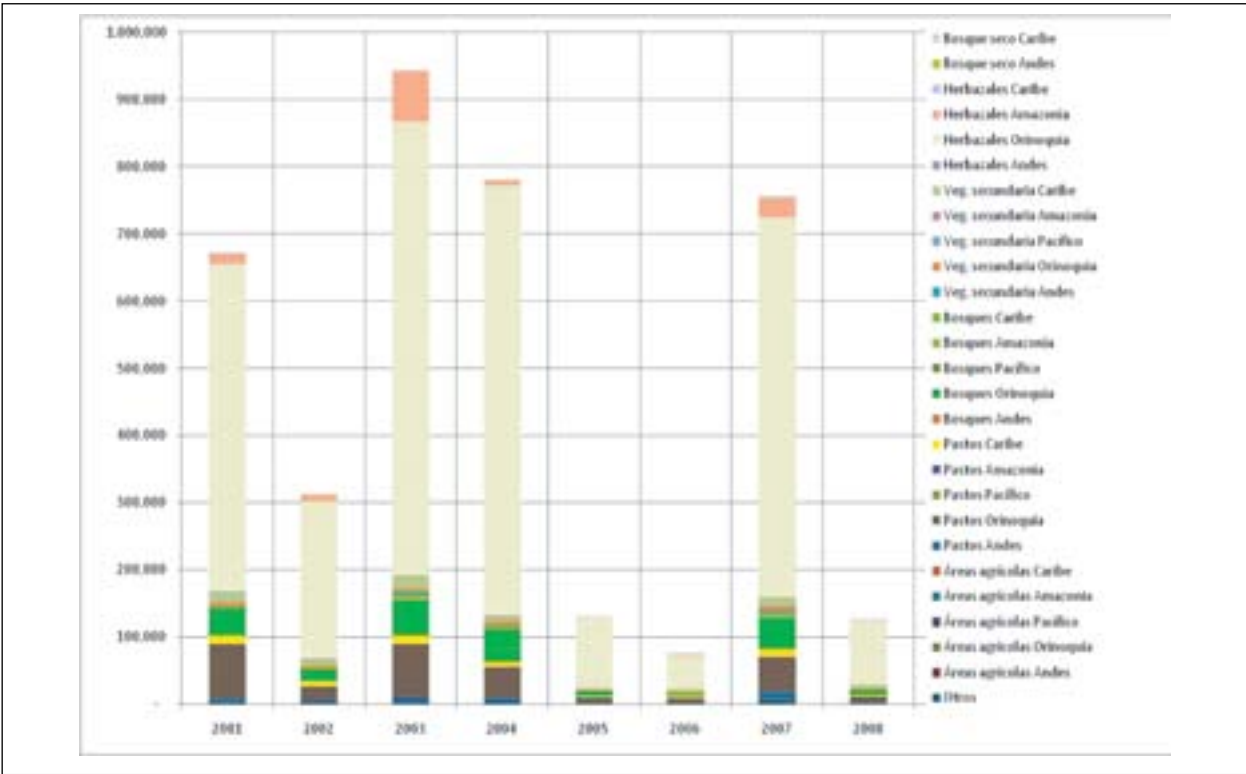
el año 2003 con la mayor superficie quemada en Colombia, con unas 942.787 ha, seguido del 2004 (779.274 ha) y del 2007 (753.904 ha), respectivamente. En el 2006 se reporta una baja extensión de área quemada (únicamente 74.033 ha), seguido del 2008 (125.876 ha) y 2005 (129.208 ha), respectivamente. Otro de

los aspectos de los incendios forestales contemplado aquí es la recurrencia anual. Entre diciembre del año 2000 y diciembre de 2008 el 42,7% (unas 1.213.650 ha) del área quemada sólo se vio afectada una vez (Figura 3) y el resto, un 57,3% del área quemada, presenta recurrencia a lo largo de los años con una frecuencia superior a dos veces.

El área quemada no sólo fluctúa entre años; también lo hace a lo largo de ellos. Para el caso colombiano, durante el período comprendido entre diciembre y febrero el área quemada se intensifica, situación que corresponde a una de las temporadas secas dominantes en el país (Figura 4). En algunos casos, como en enero de 2004, el área quemada en un mes equivale a casi la totalidad del área quemada en el año.

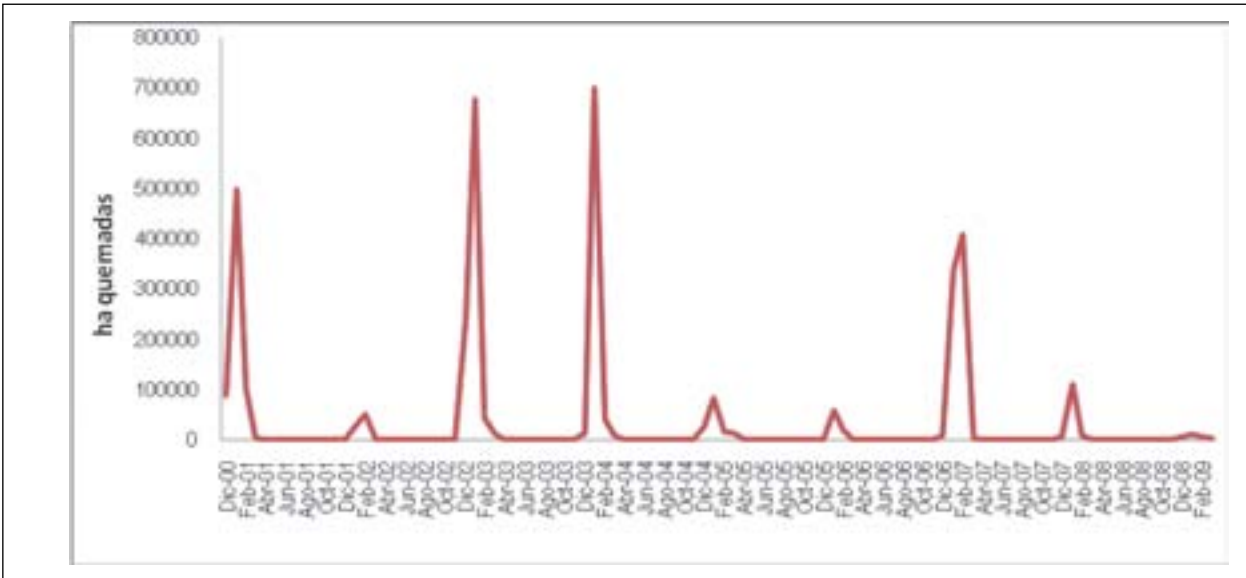
Por región natural, Colombia registra un panorama diferencial en lo que se refiere al área quemada anual. La Orinoquia, una región relativamente plana y dominada por formaciones herbáceas, concentra, sin importar el año, la mayor proporción de área quemada en el país, que en el 2005 equivalió al 95% de toda la extensión asociada a incendios forestales. Ésta es seguida a lo largo de todos los años por la superficie quemada detectada para la Amazonia y la región del Caribe (Figura 5). El área anual quemada para los Andes, la región más densamente poblada del país y la segunda más extensa, no supera en ninguno de los casos el 3% del área total anual quemada de toda Colombia. Finalmente, la región Pacífico es la que menor área anual quemada registra en el periodo analizado, consecuencia quizás del régimen climático asociado a ella.

Figura 3. Área anual quemada por tipo de cubierta del suelo (ha)



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Evolución en el tiempo desde diciembre 2000 a marzo 2009 de: a) área quemada mensualmente

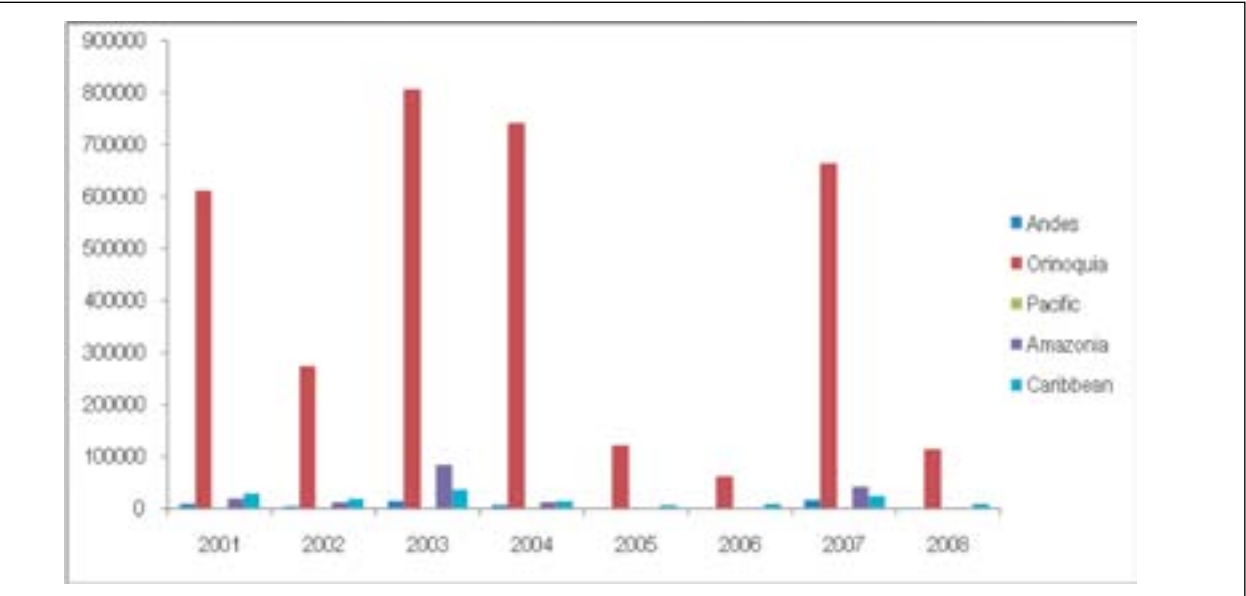


Fuente: elaboración propia.

Al analizar el área quemada con respecto al tipo de cubierta del suelo vuelve a presentarse una situación contrastante. En este caso

son los herbazales el tipo de cubierta más afectada por incendios a lo largo de los años analizados. Estos herbazales se presentan

Figura 5. Área anual quemada (ha) por región natural (2001-2008)



Fuente: elaboración propia.

especialmente en la región de la Orinoquia, mencionada anteriormente como la más afectada. Incluso al analizar el área quemada por tipo de cubierta estandarizada por el área total existente de la misma se puede observar que la más afectada por los fuegos sigue siendo los herbazales, seguida por pastos y bosques, en proporciones mucho más bajas.

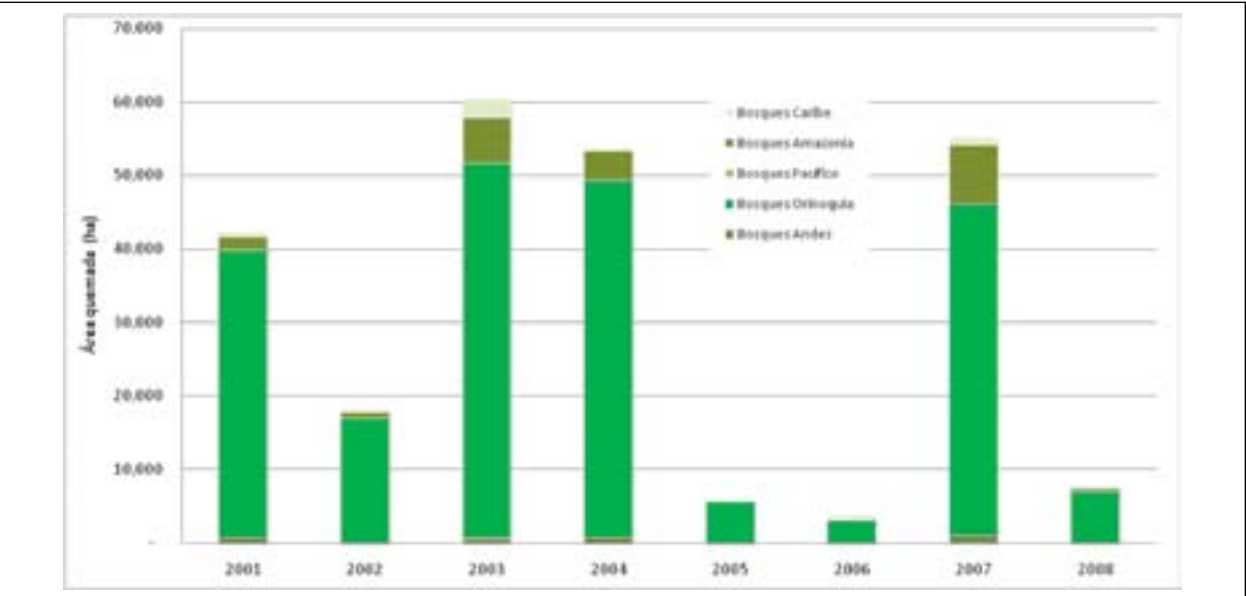
Si bien los incendios forestales en Colombia no están predominantemente asociados a cubiertas de tipo boscoso, su incidencia en casos como los de los años 2003, 2004 y 2007 es considerable, especialmente teniendo en cuenta los costos que representa restaurar un bosque a su estado original. De las hectáreas reportadas como área anual quemada, la mayor proporción, en todos los años, corresponde a los bosques de la región de la Orinoquia, los cuales se disponen como cordones riparios a lo largo de los ríos en las denominadas “matas de monte”, inmersos en una matriz dominada por herbazales.

En todos los casos a estos bosques siguen en ocurrencia de incendios los bosques de la Amazonia, con valores que, como el año 2007, ascienden a un poco más de 8.000 ha. El reporte de área anual quemada asociada a los bosques de las regiones Andina y Caribe apenas si supera las 1.000 ha (Figura 6).

En términos de precisión de la información del área quemada, los resultados de validación en una ventana correspondiente a la imagen *Landsat Path 6 Row 56* de la zona indican una alta correspondencia. El producto *Modis Burned Area* para la zona muestra unos 1.073 fragmentos que ocupan un área de 142.950 ha, mientras que los datos derivados de *Landsat* detectaron unos 1.004 parches que cubren unas 135.499 ha con un coeficiente Kappa de 0,9598.

Al analizar la incidencia de incendios tomando como fuente de información la relativa a las anomalías térmicas o focos de calor, las tendencias obtenidas del área

Figura 6. Área forestal afectada por quemas (ha)



Fuente: elaboración propia.

anual quemada cambian pero no ostensiblemente (Tabla 2). La región de la Orinoquia y los herbazales siguen siendo la región y el tipo de cobertura que concentran el mayor porcentaje de focos de calor (49,28% y 39,96%, respectivamente), seguidos por los bosques de la Amazonia y los pastos del Caribe. Nuevamente la región Pacífico registra el menor porcentaje de focos activos. Los focos activos presentan un comportamiento

intranual similar del área quemada, con picos durante el trimestre comprendido entre los meses de diciembre y febrero (Figura 7).

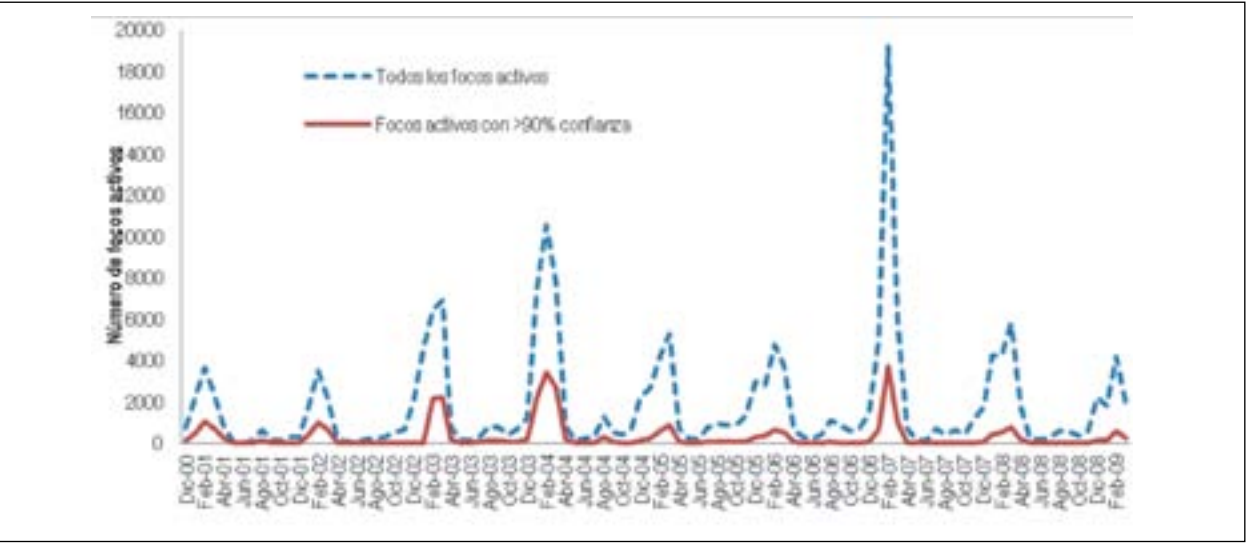
Al evaluar el grado de correlación existente entre el área quemada y la cantidad de focos activos que se le asocian, el modelo arroja un ajuste del 73,28%, considerablemente alto si se tiene en cuenta que el área quemada corresponde a píxeles de 500 m, y los focos a información puntual. (Figura 8).

Tabla 2. Porcentaje de cobertura por región afectada por focos activos de incendios (con nivel de confianza >90%) en el periodo Dic. 2000-Marzo 2009

Cobertura por Región	Herbazales	Bosques	Pastos	Ecosistemas Secundarios	Áreas Agrícolas	Bosques Secos
Andes	0,51	1,42	3,38	2,45	1,30	0,02
Caribe	0,10	1,89	13,14	6,44	0,51	0,51
Amazonia	4,26	9,53	2,98	0,36	0,04	na
Pacífico	na	0,03	0,21	0,02	0,01	na
Orinoquia	35,10	5,62	7,78	0,61	0,17	na
TOTAL	39,96	18,49	27,49	9,89	2,03	0,53

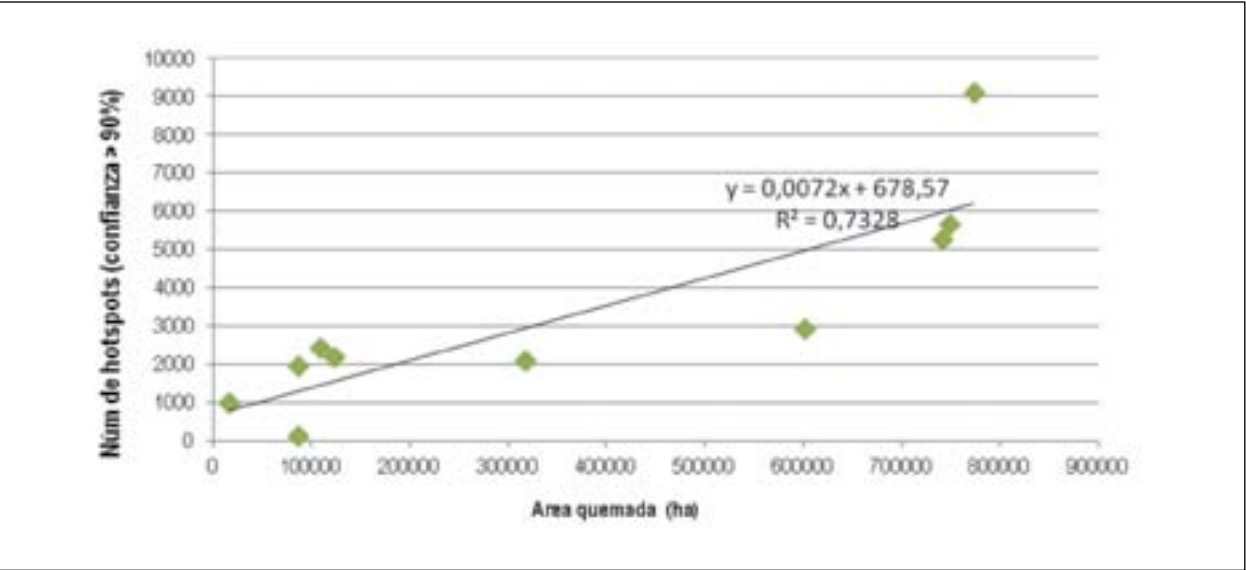
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Total de focos activos y focos con nivel de confianza de >90%



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Ajuste para la correlación lineal simple entre la superficie quemada y la superficie afectada por focos activos (con nivel de confianza >90%) en el periodo diciembre 2000- marzo 2009



Fuente: elaboración propia.

Discusión

Productos de información derivada de sensores remotos, como los empleados en este estudio, permiten hacer un rastreo estandarizado, efectivo y constante de la incidencia de incendios forestales. Este monitoreo resulta de mayor importancia ante los cambios que se están presentando en el ambiente, derivados del cambio climático, especialmente en un país como Colombia, con una riqueza natural excepcional, el cual está en una etapa inicial en lo que se refiere a monitoreo y seguimiento a escala nacional de fenómenos como la deforestación, la pérdida de biodiversidad y los incendios forestales.

El hecho de que lleguen a quemarse por año hasta 60.000 hectáreas de bosque en Colombia puede no parecer significativo con respecto al total nacional que supera ese valor en más de diez veces, pero si se tienen en cuenta las dificultades asociadas a la regeneración de los bosques naturales se hace urgente tomar acciones que prevengan que los bosques colombianos se vean afectados por los incendios forestales, cuyo origen suele estar asociado en la gran mayoría de los casos a factores humanos. Esto es particularmente importante en una región como la Amazonia, donde aún se conservan considerables extensiones de bosques naturales no perturbados y que están siendo intervenidos para establecer otras cubiertas del suelo como pastos y áreas agrícolas.

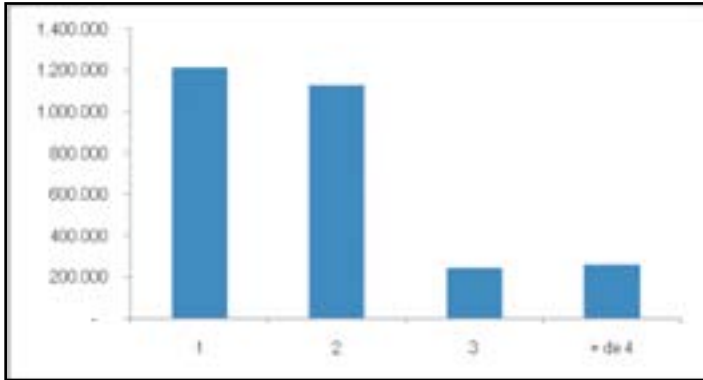
Dado que existen un gran número de incendios de tamaño inferior a lo que se calcula con los datos del producto MOD45, es necesario profundizar en el estudio de la dinámica de los incendios de tamaños inferiores. Si bien el modelo de regresión arrojó un grado de correlación bastante alto entre el área quemada y la cantidad de focos activos asociados, es necesario que ambos productos de información se utilicen de manera combinada para hacer el seguimiento de los incendios forestales en Colombia, especialmente en regiones altamente fragmentadas como la Andina y la Caribe. Esto permitiría hacer un seguimiento más preciso de los incendios forestales y desarrollar un conjunto de medidas que prevengan la reincidencia de este fenómeno o su aparición en otros sectores del país.

En este trabajo se utilizó el año calendario para analizar la variabilidad anual. No obstante y dados los resultados que se observan, sería deseable analizar los períodos por temporadas secas, cuando se producen la gran mayoría de los incendios de vegetación y que pueden estar asociados al clima y al manejo que se hace de las diferentes cubiertas del suelo.

Agradecimientos

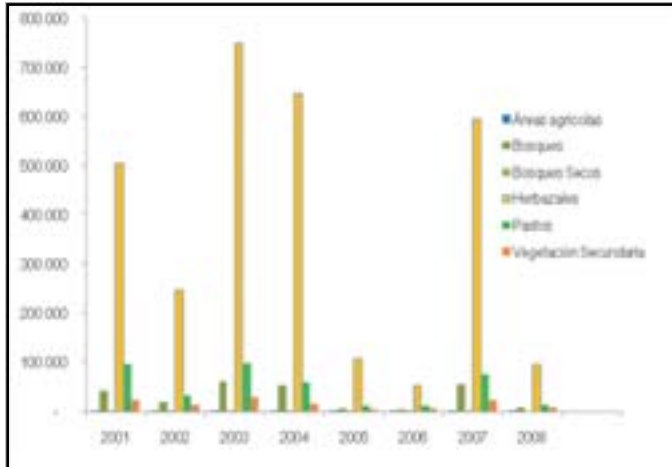
A la Agencia Española de Cooperación Internacional por su apoyo a través de la –Acción Complementaria C/7838/07– y el proyecto A/019951/08.

Anexo 1. Frecuencia de incendios a lo largo de 2001-2008. Área afectada (ha) por el número de veces quemada en 8 años



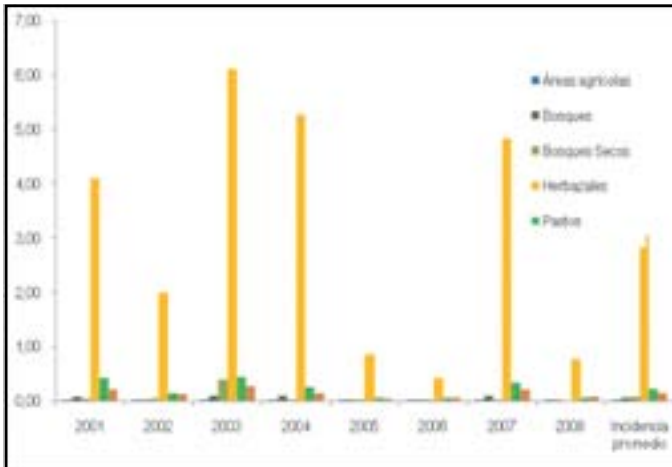
Fuente: elaboración propia.

Anexo 2. Incidencia de incendios por tipo de cubierta (2001-2008). Área anual quemada en ha



Fuente: elaboración propia.

Anexo 3. Incidencia de incendios por tipo de cubierta (2001-2008). estandarizada ha quemadas por ha de cubierta



Fuente: elaboración propia.

Bibliografía

Armenteras, D., González-A., F., Franco-A., C. (2009). "Distribución espacial y temporal de incendios en Colombia utilizando datos de anomalías térmicas". *Caldasia*, 31 (2), 291-306.

Armenteras, D., Romero, M, Galindo, G. (2005) "Vegetation fire in the savannas of the Llanos Orientales of Colombia". *World Resource Review*, 17 (4), 531-543.

Boschetti, L., Roy,D. y Hoffmann,A.A. "Modis Collection 5 Burned Area Product - MCD45". *User's Guide Version 2.0*, November, 2009.

Chang, Dy Song, Y. (2009) *Comparison of L3JRC and MODIS global burned area products from 2000 to 2007*. J. Geophys. REs. 114, D16106, doi: 10.1029/2008JD011361.

Chuvieco, E., Opazo, S., Sione, W., Del Valle, H., Anaya, J., Di Bella, C., Cruz, I., Manzo, L., López, G., Mari, N., González, --A., F., Morelli, F., Setzer, A., Csiszar, I., Kanpandegi, J.A., Bastarrika, A. & Libonati, R. (2008). "Global burned-land estimation in Latin America using MODIS composite data". *Ecological Applications*, 18 (1), 64-79.

Cochrane, M.A. and Schulze, M.D. (1998) "Forest fires in the Brazilian Amazon". *Conservation Biology*, 12, 948-50.

Davies, D.K., Ilavajhala, S., Wong, M.M., and Justice, C.O. (2009). "Fire Information for Resource Management System: Archiving and Distributing MODIS Active Fire Data". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47 (1),72-79.

De Santis, A. Chuvieco, E. (2007). "Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models". *Remote Sensing of Environment*, 108, 422-435.

Di Bella, C.M., Jobbágy, E.G., Paruelo, J.M. Pinnock, S. (2006). "Fire density controls in South America". *Global Ecology and Biogeography*, 15, 192-199.

Diaz Delgado, R., Lloret, F. y Pons, X. (2003). "Influence of fire severity on plant regeneration through remote sensing imagery". *International Journal of Remote Sensing*, 24, 1751-1763.

Dwyer, E., Pereira, J.M.C., Grégoire, J.M., DaCanara, C.C. (1999). "Characterization of the spatio-temporal patterns of global fire activity using satellite imagery for the period April 1992 to March 1993". *Journal of Biogeography*, 27, 57-69.

FIRMS. *Fire Information for Resource Management System*. Recuperado en Agosto de 2007. <http://maps.geog.umd.edu/firms/shapes.htm>.

Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C. O., and Kaufman, Y. J., (2003). "An enhanced contextual fire detection algorithm for Modis". *Remote Sensing of Environment*, 87, 273-282.

Giglio, L., van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Collatz, G.J. and Kasibhatla P. (2005). "Global estimation of burned area using Modis active fire observations". *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 5, 11091-11141.

IDEAM, IGAC, IAvH, Invemar, I. Sinchi e IIAP. (2007). *Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico Jhon von Neumann, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras Jose Benito Vives De Andreis e Instituto Amazonico de Investigaciones Cientificas Sinchi. Bogota, D. C, 276. + 37 hojas cartograficas.

Roberts, S.J. (2000). "Tropical fire ecology". *Progress in Physical Geography*, 24 (2), 281-288.

Román-C., R.M., Gracia, M., and J. Retana. (2003). "Environmental and human factors influencing fire trends in Enso and non-Enso years in tropical Mexico". *Ecological Applications*, 13, 1177-1192.

Roy, D. P., Jin, Y., Lewis, P. E., & Justice, C. O. (2005). Prototyping a global algorithm for systematic fire affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sensing of Environment*, 97, 137-162.

Simon, M., S. Plummer, F. Fierens, J. J. Hoelzemann, and O. Arino. (2004).

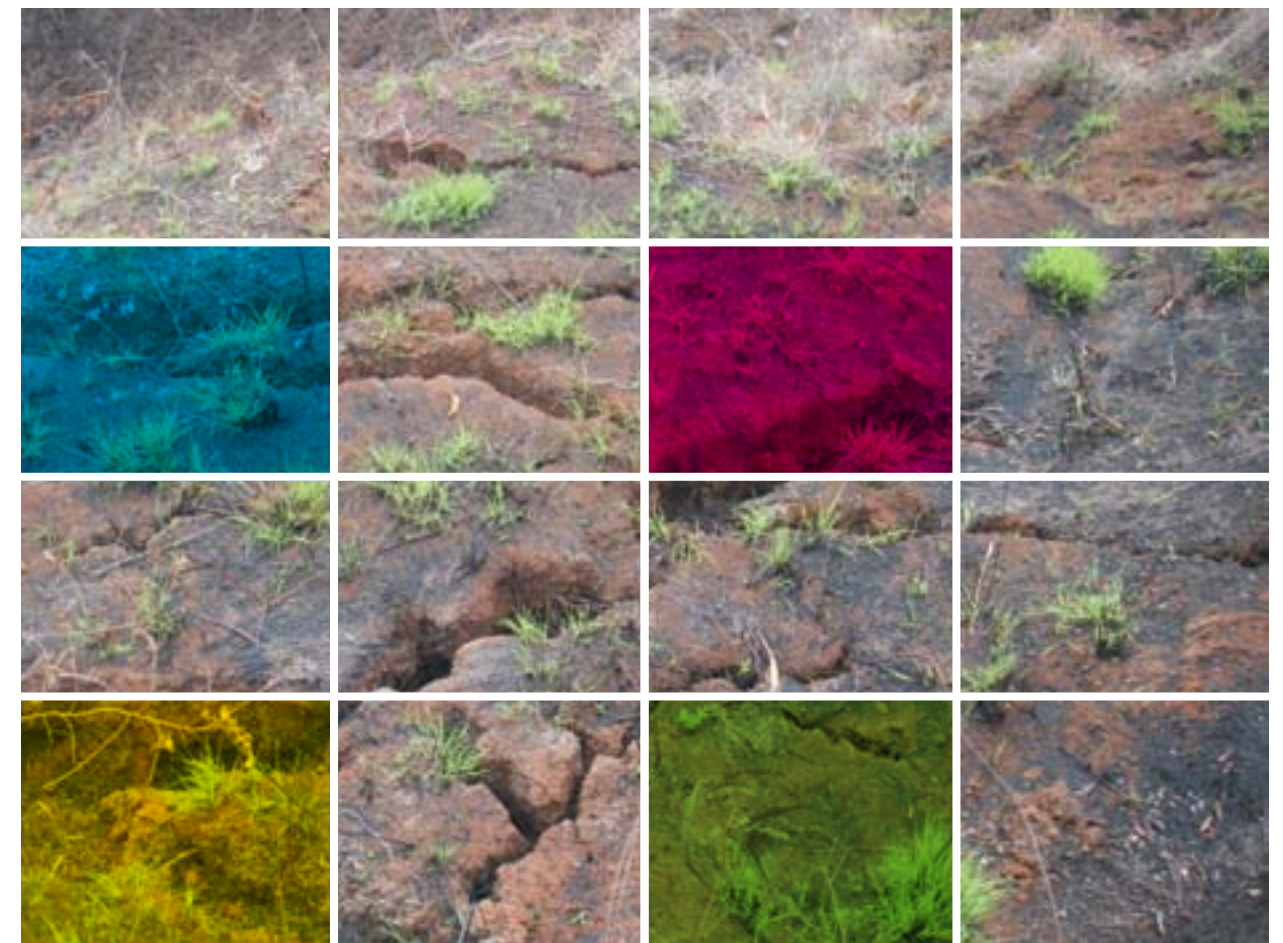
Burnt area detection at global scale using ATSR-2: The GLOBSCAR products and their qualification, *J. Geophys. Res.*, 109, D14S02, doi:10.1029/2003JD003622.

SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission. (2000). Modelo digital del terreno. Información cartográfica digital, tipo raster, celda de 92 m. National Aeronautics and Space Administration (NASA), National Imagery Mapping Agency (NIMA), German Space Agency (DLR), Italian Space Agency (ASI).

Tansey, K., et al. (2004), *Vegetation burning in the year. (2000). Global burned area estimates from SPOT VEGETATION data*. *J. Geophys. Res.*, 109, D14S03, doi:10.1029/2003JD003598.

Tansey, K., J. M. C. Grégoire, P. Defourny, R. Leigh, J.-F. Pekel, E. van Boogaert, E. Bartholomé, and S. Bontemp, "A new, global, multi-annual (2000–2007) burned area product at 1 km resolution and daily intervals," *Geophys. Res. Lett.*, 35, 1, L01 401, 2008. DOI:10.1029/2007GL031567.

Van der Werf, G. R., J. T. Randerson, L. Giglio, G. J. Collatz, P. S. Kasibhatla, and A. F. Arellano Jr. (2006). "Interannual variability of global biomass burning emissions from 1997 to 2004". *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 6, 3175–3226.



Parte II

Los incendios de la cobertura vegetal en la cuenca media – alta del río Cali, municipio de Santiago de Cali, Colombia

Principales rasgos biofísicos y socio-económicos de la cuenca del río Cali asociados a los incendios de la cobertura vegetal

ÁLVARO DEL CAMPO PARRA-LARA^{1,2}
FRANCIA HELENA BERNAL-TORO^{2,3}

Resumen

La cuenca media del río Cali objeto de estudio de un conjunto de investigaciones relacionadas con el fuego de coberturas vegetales por parte del Grupo de Estudios Ambientales para el Desarrollo de la Universidad Autónoma de Occidente, tiene una gran importancia estratégica para la ciudad de Santiago de Cali como proveedora de bienes y servicios ambientales. Considerando que es un territorio con una alta dinámica social estrechamente asociada

a los procesos urbanos, se considera como un área en donde se expresan fenómenos propios de lo urbano pero también de lo rural, siendo muchos de ellos condicionantes o determinantes del fenómeno del fuego. Por las anteriores razones se describen en el presente capítulo aquellos rasgos del medio natural y social que tienen potencialmente una retroalimentación, positiva o negativa, con los incendios de la cobertura vegetal.

Palabras clave: dinámica, frecuencia, gravedad, Colombia, Santiago de Cali.

1 Magíster en Ciencias; Doctorante en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Instituto Tecnológico de Costa Rica / Universidad Nacional de Costa Rica / Universidad Nacional Autónoma de México / Universidad Autónoma de Chapingo (México). alcampo@uao.edu.co.
2 Investigación en la Línea: Ecología y Gestión de Incendios de la cobertura vegetal, Grupo de Estudios Ambientales para el Desarrollo Sostenible, Grupo “A” de Colciencias, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia.
3 Administrador del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales y estudiante de la Especialización en Gestión Ambiental de la Universidad Autónoma de Occidente. fhbernal@uao.edu.co.

Abstract

The average basin of Cali River, which is a study subject of several research projects related to vegetable covers fires carried out by the research group Environmental Studies for the Regional Development, belonging to the Universidad Autónoma de Occidente, is of high strategic importance for the city of Santiago de Cali as supplier of environmental goods and services. Taking into account that it is a territory which holds a high social dynamics associated to the urban processes, it is considered an area where urban and rural phenomena are expressed, many of them being determining and decisive for the fire phenomenon. Due to the abovementioned reasons, in this chapter those characteristics of the natural and social surroundings which have either a positive or negative feedback from the vegetable covers fires are described.

Key words: dynamics, frequency, seriousness Colombia, Santiago de Cali.

Características biofísicas generales

El área objeto de estudio de los proyectos cuyos resultados son expuestos en el presente documento corresponde a una zona de aproximadamente 5.409,4 hectáreas comprendida en el rango altitudinal de 1.100 msnm a 2.200 msnm y cuyas coordenadas

extremas son en metros: extremo norte: 1.049.801; oriente: 1.057.834; sur: 1.050.255; y occidente: 1.044.873; y extremo norte: 877.477; oriente: 872.937, sur: 867.770 y occidente: 873.508, origen occidente - chocó. Esta franja fue seleccionada principalmente por presentar la mayor frecuencia de eventos relacionados con la quema de coberturas vegetales en el contexto de toda la cuenca del río Cali.*

La cuenca del río Cali, que sirve de marco de referencia a la citada área de estudio, está localizada al noroccidente del municipio de Santiago de Cali, en la vertiente oriental de la cordillera Occidental, en un recorrido con dirección sur-norte, desde los Farallones de Cali hasta la margen izquierda del río Cauca, entre las coordenadas 1.059.000 E, 874.000 N, y 10.411.000 E, 874000 N (Daza y Alba, 1999). Limita, en términos generales,** al norte con las cuencas de los ríos Arroyohondo y Dagua, al sur con las cuencas de los ríos Pance y Meléndez, al oriente con la margen izquierda del río Cauca y al occidente con la cuenca del río Anchicayá (CVC, Grupo de Recursos Hídricos, 2000). Las referencias sobre la superficie de esta cuenca no son coincidentes, ya que en algunos casos se excluye la parte plana o urbana*** (Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente 1997; Haltenhoff, 1995;

Escobar, 2007), o toda la cuenca, sin incluir la subcuenca del río Aguacatal (CVC, Grupo de Cartografía, 2000), o incluyendo la última citada (Universidad del Valle, 2007), razón por la cual se ha adoptado la cifra de 21.497,15 hectáreas. (Univalle-CVC, 2007).

En cuanto a su origen geológico, esta cuenca se encuentra ligada a los procesos de formación de la cordillera Occidental ocurridos a partir de finales del Cretáceo o principios del Terciario, resultantes de la compresión de las placas tectónicas de Nazca y Suramérica.

Un rasgo significativo de su geología actual son las siguientes fallas (Esquivel y Estrada, 2000), las cuales constituyen factores de inestabilidad permanente:

- a) Dagua-Calima: con orientación NW-SE, controla el curso de La Soledad.
- b) Pichindé: con orientación NE-SW, controla el curso alto del río del mismo nombre.
- c) Pichindécito: con orientación NE-SW, controla el río Pichindécito y la quebrada Las Nieves.
- d) Quebrada Honda: con orientación NE-SW, controla el curso de la quebrada Honda y pasa cerca de las cabeceras de Felidia y La Leonera.
- e) La Tulia: con orientación NE-SW, controla la quebrada La Tulia.
- f) San Bernardo: con orientación NE-SW, controla el primer tercio del río Pichindé.
- g) Cali: la cual coincide con el borde oriental del piedemonte de la cordillera Occidental y constituye el límite entre esta cordillera y el valle aluvial del río Cauca.

Desde el punto de vista fisiográfico la cuenca se caracteriza por presentar en la parte alta un relieve montañoso con pendientes alargadas, de cimas afiladas, vertientes asimétricas y lisas; en su parte media (1.300 - 2.000 msnm) el relieve es colinado y tiene como estructura principal al cerro Los Cristales, y en la parte baja, la planicie aluvial correspondiente al valle geográfico del río Cauca. Las pendientes medias de las subcuencas son del 81.8% y 87.9% para los sistemas Felidia-Cali y Pichindé-Pichindécito, respectivamente (CVC, Grupo de Cartografía, 2000). Presenta una longitud axial, en sentido W-E (en el mismo sentido en que corre el río Cali la mayor parte de su curso), de aproximadamente 16.000 km), así mismo, la parte más ancha (cercana a los 11.5 km) tiene un sentido N-S, entre el cerro de La Horqueta y el Alto de La Carolina (Galindo, 1957; CVC, 2000).

Respecto a sus rasgos ecológicos, en el área de estudio es posible identificar las siguientes zonas de vida según el sistema Holdrige (Univalle, 2007).

El sistema hidrológico de la cuenca está constituido por las subcuencas de los ríos Pichindé, Pichindécito y Felidia y de la quebrada El Cabuyal (Cuadro 1), cuyos principales rasgos son los siguientes (Bonccam y Silva, 1969):

Respecto a sus rasgos ecológicos, en la cuenca es posible identificar las siguientes zonas de vida, según el sistema Holdrige adaptado por Espinal (1968) (Cuadro 2): bosque seco tropical, bosque seco premontano, bosque húmedo premontano, bosque húmedo montano bajo, bosque muy húmedo montano y bosque perhúmedo montano,

* La importancia estratégica del río Cali radica en: a) Suministra agua para cerca de 500.000 habitantes de la ciudad de Cali; b) Permite la operación continua de dos microcentrales eléctricas que producen 1.800 KW., c) Constituye un hito paisajístico de la ciudad al atravesar su zona histórica y d) Sus riberas rurales, junto a las del río Pance, son las más visitadas por parte de la población urbana con fines recreativos y de esparcimiento.

** La delimitación precisa se encuentra consignada en el acuerdo 003 del 2005 de la Comisión Conjunta CVC – DAGMA – UAESPNN.

*** Dicha área corresponde a 26,38 km2 (Estudio del caudal ecológico del río Cali. CVC). Es importante señalar que el río Cali atraviesa la ciudad en sentido Oeste – Este, en un recorrido de aproximadamente 16 Km., el cual se inicia en las coordenadas 110834,12 N – 105475,30 E y termina en su desembocadura en el río Cauca en las coordenadas 116564.59 N – 115722.74 E. (CONVENIO DAGMA – UNIVALLE No. 192 – 2005. Identificación de la Situación Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del río Cali, zona urbana de Santiago de Cali. Informe Final – Febrero de 2007).

Cuadro 1. Tributarios presentes en el área de estudio

Subcuenca	Área (Has)	Tributarios significativos
Río Pichindé	3.048	Margen derecha: quebradas El Gallinazo, La Tulia, Quebrada Honda, El Recreo, El Danubio, La Palma y La Cabaña. Margen izquierda: quebradas Peñas Blancas, La Marina, La Marisca y La Esmeralda.
Río Pichindecito	960	Quebradas El Silencio y Los Andes.
Río Felidia	2.419	Margen derecha: quebradas La Teresita, El Bosque, Agua Bonita, El Llanto y El Guabal. Margen izquierda: La Soledad, El Cedral, Felidia y Las Nieves.
Río El Cabuyal	1.066	Recibe cinco quebradas, cinco a cada lado, muy pequeñas y sin denominación conocida.

Fuente: Espinal, 1968.

Cuadro 2. Zonas de vida presentes en la cuenca del río Cali

Zona de Vida	Rango altitudinal (msnm)	Temperatura promedio (°C)	Precipitación anual (mm)
Bosque seco tropical (Bs-T)	hasta los 1.200	24	1.300
Bosque húmedo sub tropical (BH-ST) o Bosque húmedo premontano (BH-pm)	1.300 - 1.650	19	1.600
Bosque húmedo montano bajo (bh-MB)	1.650 - 2.600	17	1.850

Fuente: Holdrige adaptado por Espinel (1968)

siendo el Bs-PM, el bh-PM y el bh-MB los dominantes.

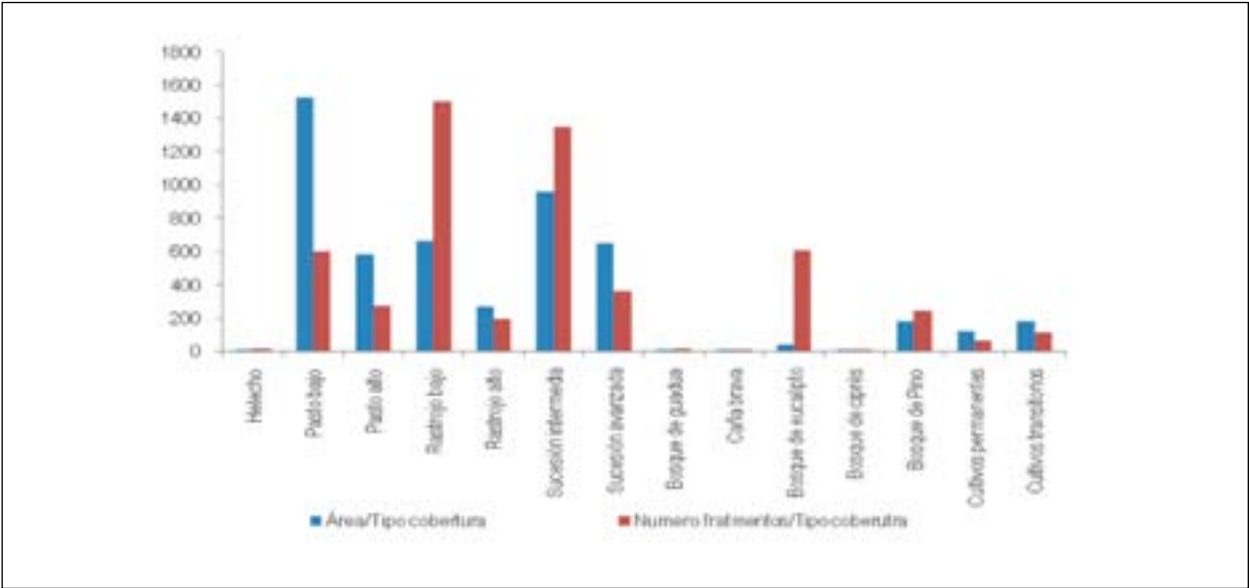
De las coberturas vegetales* existentes en el área de estudio, según la actualización cartográfica desarrollada en el marco de la presente investigación (Parra *et al.*, 2009), Figura 1 cerca del 50% corresponden a vegetación natural en sus diferentes fases sucesionales, seguidos de pastizales (40.6%). Como es de esperarse, el corregimiento de Los Andes contiene la mayor área en los diferentes tipos de cobertura vegetal, excepto sucesión avanzada (Felidia) y cultivos transitorios (La Leonera). Desde el punto de vista de fragmentación de las coberturas

vegetales, las leñosas presentan en promedio fragmentos o “parches” de menor tamaño que los correspondientes a pastizales. Es importante resaltar que los rodales de bosque plantado constituyen el tipo de cobertura más fragmentado y presentan “parches” de menor tamaño (Figura 2).

El anterior panorama de coberturas vegetales indica que el mayor factor de conflicto en el uso del suelo en la cuenca lo constituye la ganadería, fenómeno transversal al sistema de los ríos Cali-Meléndez-Pance-Aguacatal (CVC, 2002).

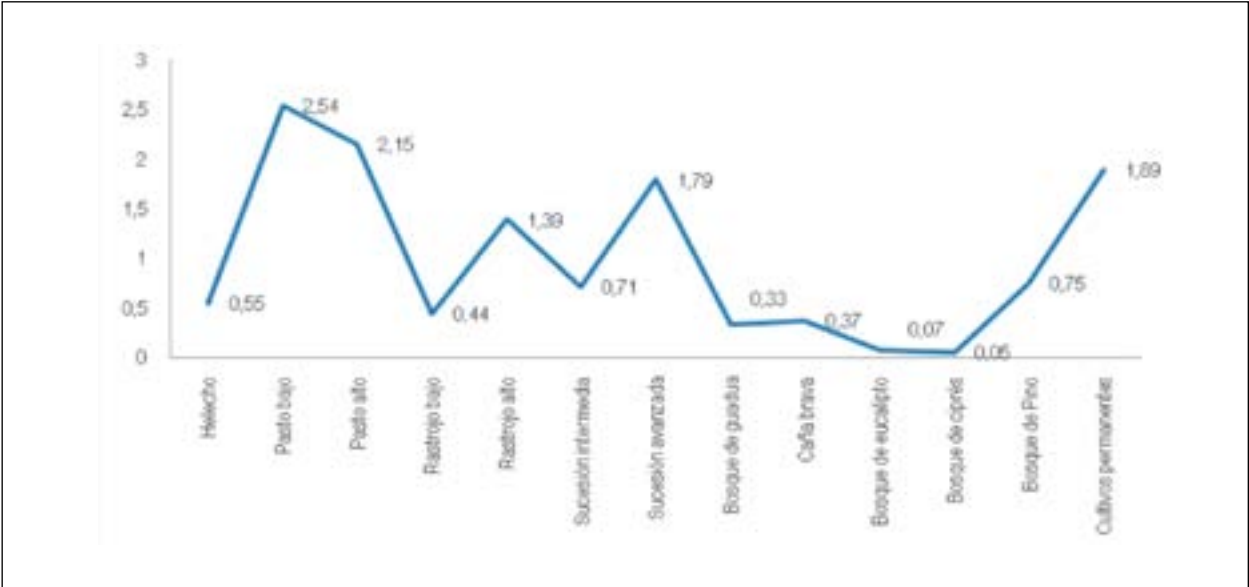
* Los datos resultan del análisis cartográfico hecho en el marco del presente proyecto con base en la cartografía digital actualizada a diciembre de 2008.

Figura 1. Tipo de cobertura vegetal por área y número de fragmentos



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Tamaño promedio del área de los fragmentos por tipo de cobertura vegetal



Fuente: elaboración propia.

Con relación a la organización político-administrativa, esta cuenca está integrada por los corregimientos La Leonera, Felidia, Pichindé, El Saladito y Los Andes. Desde este punto de vista el manejo de la Cuenca puede dividirse en las siguientes tres zonas (Anexo 1).

a) **Alta**, desde los 2000 msnm hasta los 4000 msnm, la cual constituye la vertiente oriental del Parque Nacional Natural Los Farallones de Cali y su área forestal protectora. Es la zona mejor conservada de toda la cuenca.

- b) **Media**, comprendida entre los 1.300 msnm hasta los 2.000 msnm, que incluye la franja agrícola de ladera del municipio e importantes asentamientos como Pichindé, La Leonera y Felidia. Presenta una deforestación significativa, producto de la ampliación de tierras para la agricultura y la ganadería, la recurrencia de incendios de la cobertura vegetal, la parcelación de terrenos para vivienda recreativa y la invasión, con diferentes propósitos, de los terrenos públicos existentes.
- c) **Baja**, que va desde el cerro Los Cristales hasta la desembocadura del río Cali en el río Cauca, es decir, desde los 958 msnm hasta los 1.300 msnm. Corresponde a la zona urbana y periurbana del municipio.

Factores climáticos presentes en la cuenca

La precipitación media anual es de 2.042 mm y oscila entre 3.600 y 1.200 mm en las partes alta y baja, respectivamente, lo cual guarda una correlación directa entre su volumen y el gradiente altitudinal. Su distribución anual es típica de un régimen bimodal, con dos períodos de mayores lluvias (marzo-mayo y septiembre-noviembre), alternando con períodos secos correspondientes a los meses de diciembre-febrero y junio-septiembre, que por lo general se extiende hasta principios de octubre. Durante los periodos de lluvia es frecuente la presencia, especialmente en la parte media y alta de la cuenca, de tormentas eléctricas.

Las altas precipitaciones y la marcada influencia de los vientos húmedos provenientes del océano Pacífico establecen unas

condiciones de alta humedad, especialmente en la parte alta de la cuenca, que oscila entre un 70% y un 80%, aunque en su parte baja es de alrededor de un 50% (CVC, 2003). Es importante enfatizar que la topografía de la cuenca, la desigual distribución de las lluvias, la red de fuentes superficiales de agua y la orientación de las laderas, establecen que el territorio se comporte como un mosaico en cuanto a humedad relativa.

La temperatura media en la cuenca oscila entre los 24°C en la parte baja y los 8°C en la parte alta y presenta también un régimen bimodal similar al de la precipitación. En cuanto a vientos, en la cuenca se presentan dos clases de corrientes de aire: la primera y más importante es la que se dirige en las tardes (14:00-18:00 horas) y alcanza su máximo hacia las 18:00 horas, desde la parte alta en dirección S-W hacia el valle geográfico del río Cauca, con velocidades promedio de 3 m/s. Esta corriente es particularmente importante en la propagación de los incendios y conatos de incendio de cobertura vegetal, ya que los direcciona hacia la parte media-baja de la cuenca, en donde existe una mayor probabilidad de impacto por ser una zona más poblada. La segunda corriente corresponde a los vientos que ascienden desde el valle hacia los Farallones en horas de la mañana (08:00-13:00 hr., aproximadamente), aunque con menor intensidad y velocidad que la primera.

Características socioeconómicas básicas de la cuenca

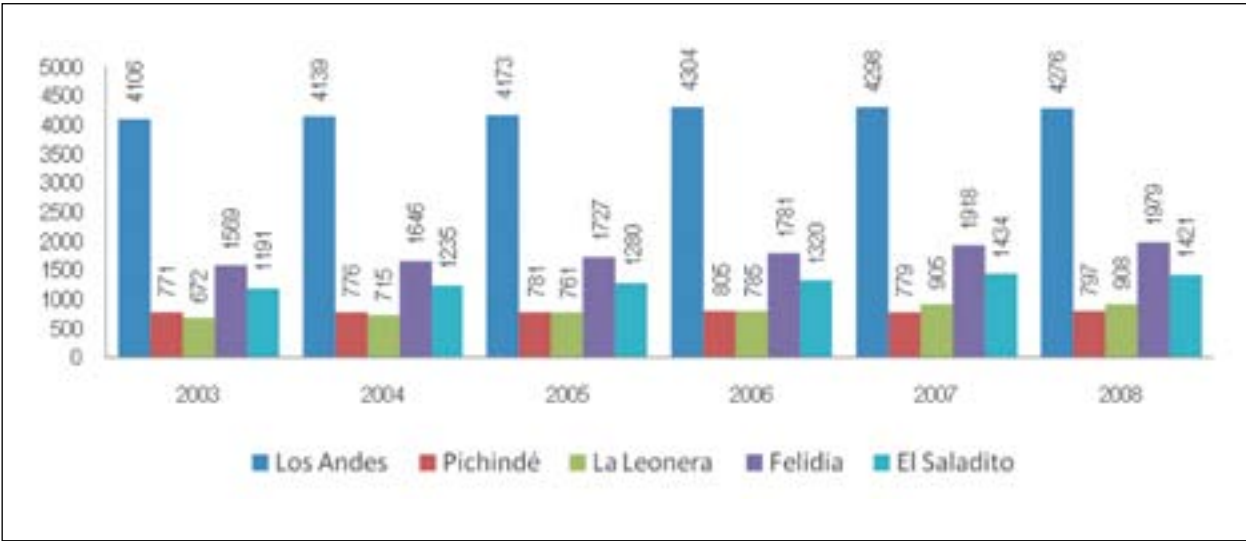
Población

La población proyectada para 2008 en los cinco corregimientos de la cuenca (Felidia, El

Saladito, Pichindé, La Leonera y Los Andes) era de aproximadamente 9.381 habitantes, concentrada especialmente en este último (45.6%). Se destaca que para el periodo 2003-2008 los corregimientos con mayores incrementos fueron La Leonera (35.1%), Felidia (26,1%) y El Saladito (19,3%)* (Figura 3), debido posiblemente a su nueva condición de “asentamientos-dormitorios”. Llama la atención también el hecho de que los dos primeros corregimientos citados presentaron

(para el periodo 2002-2008) incrementos en su número de predios, mientras que en El Saladito esta situación permaneció invariable (Cuadro 3), lo cual permite conjeturar que en La Leonera y Felidia el incremento de la población se puede deber a la llegada de más propietarios y en El Saladito a la inmigración de familias más numerosas, la presencia del Batallón de Alta Montaña, la pavimentación de la vía El Saladito-Felidia y la instalación de redes de energía en las vías de acceso.

Figura 3. Tendencia de la población en la cuenca del río Cali. Periodo 2005-2008



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 3. Variaciones porcentuales de población y predios

Corregimiento	Variaciones porcentuales	
	Población 2003-8	Predios 2002-8
Los Andes	4,1	2,4
Pichindé	3,4	3,5
Felidia	26,1	13,7
El Saladito	19,3	0
La Leonera	35,1	17,8

Fuente: elaboración propia.

Considerando que de toda la cuenca del río Cali sólo se abordó una porción de ella como área de estudio, en el Cuadro 4 se presenta la población involucrada en sus veredas.

Teniendo en cuenta la importancia de otros aspectos socioeconómicos de la población, se aplicó una encuesta** a novecientos

* Departamento Administrativo de Planeación del Municipio de Cali, para efectos del SISBEN, 2006.
** Muestreo aleatorio proporcional con una seguridad del 95% y precisión del 5%.

Cuadro 4. Veredas y población del área de estudio.

Corregimiento	Nombre	Área (Has)	Población 2008	Densidad
El Saladito	Las Nieves		136	1.62
	El Saladito cabecera	20.1	480	23.88
	San Antonio	41.0	173	4.22
	Montañuelas	368.5	308	0.84
Felidia	Las Nieves	241.2	397	1.65
	Felidia cabecera	61.0	1.108	18.16
	La Soledad	83.6	59	0.71
	La Esperanza	194.2	85	.044
	La Ascensión	136.0	68	0.50
	Santa Helena	103.7	323	3.11
	El Cedral	142.4	182	1.28
	El Diamante	74.0	133	1.80
La Leonera	La Leonera cabecera	95.3	390	4.09
	El Pajui	458.0	241	0.53
	El Pato	17.0	42	2.47
	El Porvenir	130.8	235	1.80
Los Andes	El Faro	46.8	120	2.56
	El Mameyal	1.3	327	251.54
	Karpatos	25.7	59	2.29
	Pueblo Nuevo	163.1	321	1.97
	Quebrada Honda	140.3	239	1.70
	Pilas del Cabuyal	78.5	351	4.47
	Los Andes cabecera	745.0	312	0.42
	El Cabuyal	1.239.5	586	0.47
Pichindé	Atenas	80.5	400	4.97
	Pichindé cabecera	348.6	475	1.36
	Peñas Blancas	126.4	228	1.80
	Loma de la Cajita	162.3	94	0.58
Total		5.408.8	7.872	319.49

Fuente: adaptado y complementado a partir de Planeación Municipal.

sesenta personas cabeza de familia, con el propósito de complementar y actualizar la información socioeconómica veredal*. Se optó por las cabezas de familia como elementos muestrales, al considerar que, en su condición de responsables económicos del

hogar, tenían una relación más directa con las actividades y prácticas productivas asociadas a los incendios de la cobertura vegetal. A continuación se presentan las tendencias en los principales rasgos demográficos y socioeconómicos de la población encuestada.

* Las fuentes de referencia fueron el Departamento Administrativo de Planeación del Municipio de Cali (2006, para efectos del SIS-BEN), los mapas sociales (Santiago de Cali. Alcaldía. Caracterización Social del corregimiento de Los Andes, Pichindé, La Leonera, Felidia y El Saladito, 1999.- 2005) y la proyección hecha, para algunos casos por el equipo investigador del presente proyecto.

Género

En general, la población de las cabezas de familia está constituida predominantemente por hombres (81.4%), tendencia que se observa en términos aproximados, en los corregimientos (Cuadro 5). Se destaca el caso de El Saladito, en donde la proporción de mujeres cabeza de hogar es mayor.

Escolaridad

El nivel de analfabetismo es relativamente bajo (9.5%), aunque en los corregimientos El Saladito presenta el mayor índice (38%) y Los Andes, el menor (3.9%). Los grados de escolaridad dominante son la educación básica primaria (31.9%) y la media vocacional o básica

secundaria (24.5%). El corregimiento con mayor porcentaje de básica primaria completa es Felidia y con secundaria completa (grado 11º) El Saladito (34%). Se destaca el hecho de que en ningún caso se reportan más de tres años de estudios superiores (Cuadro 6; Figura 4).

Patrón de poblamiento y arraigo a la cuenca

Considerando que estas variables guardan una estrecha relación con el fenómeno de incendios de la cobertura vegetal, se observa con respecto a la primera que el 86.1% de los encuestados no residen en centros poblados, sino de manera dispersa en la cuenca, hecho más acentuado en Los Andes y menor en La Leonera (Cuadro 7).

Cuadro 5. Perfil educativo por corregimiento de la población estudiada

Escolaridad	Corregimiento					Total
	Felidia	La Leonera	Los Andes	Pichindé	El Saladito	
Analfabetas	17 (7.8%)	33 (18.4%)	10 (3.9%)	15 (10.6%)	15 (38%)	90 (9.5%)
Básica primaria incompleta	20	10	38	40	12	120
Básica primaria completa	96 (44%)	60 (33.5%)	69 (26.8%)	29 (20.4%)	49 (32%)	303 (31.9%)
Básica secundaria incompleta	11	3	44	24	1	83
Básica secundaria completa	11 (5%)	7 (3.9%)	13 (5%)	4 (2.8%)	7 (4.5%)	42 (44.2%)
Media incompleta	5	1	6	1	4	17
Media completa	49 (22.4%)	49 (27.4%)	60 (23.3%)	23 (16.1%)	52 (34%)	233 (24.5%)
Hasta tres años estudios superiores	9	16	17	6	13	61
TOTAL	218	179	257	142	153	949

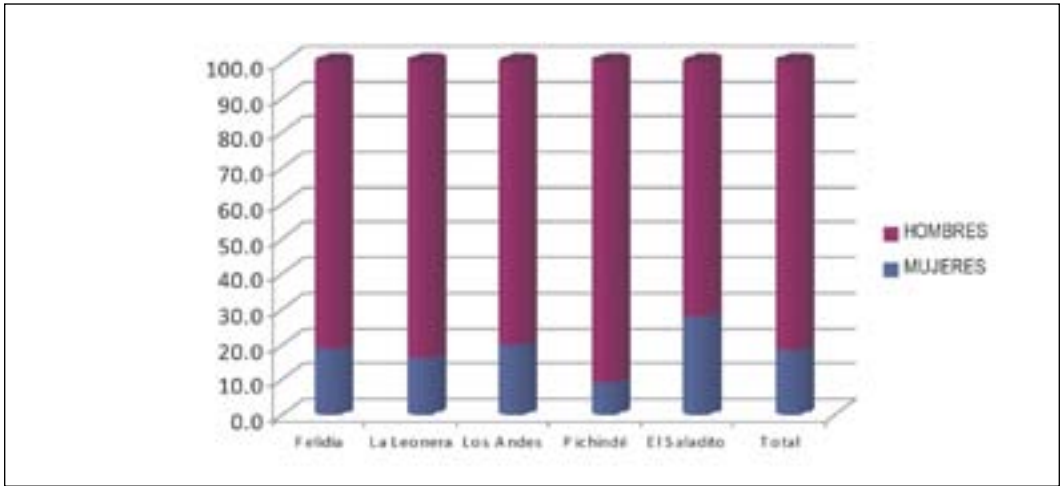
Fuente: elaboración propia.

Cuadro 6. Tiempo de residencia de la población estudiada en el corregimiento

Corregimiento	Frecuencias	Media	DS	Mínimo	Máximo
Felidia	217	25.8	19.4	1	70
La Leonera	181	30.6	19.6	1	82
Los Andes	257	22.5	19.4	<1	84
Pichindé	132	27.0	17.5	1	77
El Saladito	152	17.8	18.5	< 1	79
TOTAL	939	24.7	19.4		84

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Composición por género de la población estudiada



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 7. Entidades públicas presentes en la administración de la cuenca del río Cali

Entidad	Periodo									Competencia territorial	Competencia Ambiental
	1937	1946	1954	1962	1970	1978	1986	1994	2009		
Junta Pro-Aguas ^a	•	•	•	•						Cuenca media y alta	Conservación recurso forestal e hídrico
Emcali ^b				•		•	•	•	•	Predios de su propiedad en la cuenca	Conservación de los recursos hídricos en la cuenca
CVC ^c			•	•	•	•	•	•	•	Cuenca media	Conservación de los recursos naturales
MAVDT ^d								•	•	Cuenca alta	
Dagma ^e								•	•	Cuenca baja	Autoridad ambiental urbana

^a: Acuerdo N° 26 de 1937 del Concejo del Municipio de Santiago de Cali.

^b: Acuerdo N° 50 de 1961.

^c: Contrato Comodato EMCALI-CVC (mayo 1° de 1962), jurisdicción ratificada a la CVC a través de varias normativas posteriores.

^d: Ley 99 de 1993

^e: Acuerdo N° 18 de 1994 del Concejo del Municipio de Santiago de Cali (DAGMA)

Fuente: modificado y ampliado a partir de Estrada y Esquivel (2000)

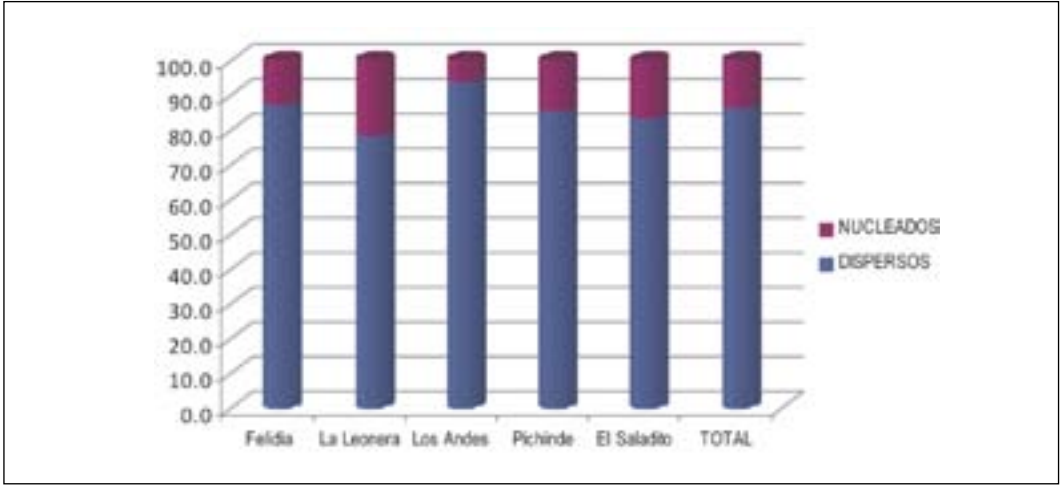
Respecto al tiempo de residencia, lo cual puede ser considerado como indicador de conocimiento del territorio, se observa una gran dispersión (DS: 17.5-19.6), con patrones muy diversos en los corregimientos. (Figura 5).

Tenencia de la tierra

El 57% de los encuestados son propietarios, aunque en los corregimientos de El Saladito y Felidia existe el menor número de ellos, debido posiblemente a que estos sectores, desde hace varias décadas, han

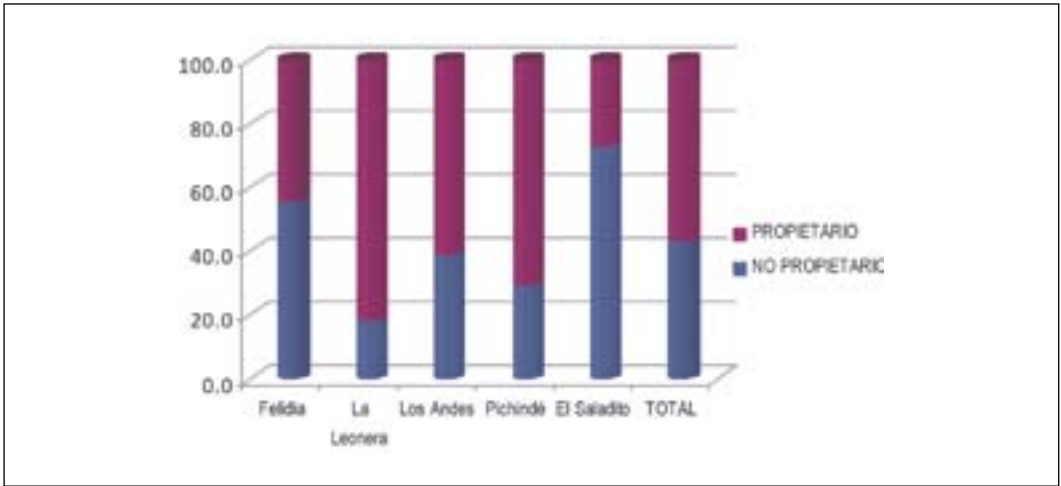
sido destinados a fincas de veraneo y de fin de semana por algunos sectores económicamente pudientes de la ciudad de Santiago de Cali, y por tanto la población campesina residente ha pasado de propietario-productor a residente-asalariado. Por el contrario, los encuestados de los corregimientos de La Leonera y Pichindé son pequeños campesinos que generalmente subsisten de actividades productivas ligadas a la tierra (Figura 6).

Figura 5. Patrón de doblamiento de la población estudiada en la cuenca



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Propiedad de la tierra por parte de la población encuestada



Fuente: elaboración propia.

En general, durante el desarrollo del presente trabajo los investigadores pudieron constatar en la cuenca del río Cali un dinámico proceso de transferencia de la tenencia de los predios de los pobladores rurales a habitantes urbanos, por el potencial turístico de la región.

Economía local

La base económica del área de estudio es la agricultura de pancoger y el cultivo

de plantas aromáticas y ornamentales, cuya producción se destina al autoconsumo y los pequeños excedentes se comercializan en Cali. Estas actividades agrícolas son complementadas con otras pecuarias como cría y engorde de pollos y, en menor grado, cerdos y bovinos. Una actividad económica en crecimiento es la ecoturística, aunque limitada a fines de semana, festivos y épocas de vacaciones escolares, cuando genera ingresos por venta de comidas y bebidas a los visitantes.

El corregimiento de La Leonera concentra el mayor porcentaje del área dedicada a cultivos transitorios, mientras que Los Andes lo hace con los permanentes, lo mismo que con el área dedicada al pastoreo de bovinos. El Saladito y Felidia son corregimientos muy ligados a la dinámica urbana, especialmente en lo relacionado con prestación de servicios turísticos.

Gestión ambiental de la cuenca

Desde el punto de vista de la gestión territorial y ambiental, la cuenca corresponde a una unidad de manejo especial, considerando que más del 50% de su área se encuentra dentro del Parque Nacional Natural Los Farallones de Cali, un 25% adicional con el estatus de Reserva Forestal Protectora y el resto, entre los 1.100 y los 1.500 msnm, en la categoría de forestal-residencial establecida por el Estatuto del Suelo del Municipio. Parte de la complejidad que presenta la cuenca es la administración compartida entre diferentes entidades del Estado y la participación de otras públicas y privadas con programas o proyectos propios.

Infortunadamente, en la práctica no hay un alineamiento entre sus actuaciones y los objetivos de conservación ecológica del territorio, a pesar de la existencia de un Plan de Ordenamiento formulado por Higroccidente (2000). Ésto ha propiciado una serie de situaciones conflictivas, entre las cuales se pueden mencionar⁴:

- a) Disminución de las coberturas de bosque natural en las áreas de reserva forestal protectora y forestal-residencial, lo que compromete no solo las funciones hidrológicas de la cuenca, sino también los procesos de articulación ecológica entre Los Farallones de Cali y el valle geográfico del río Cauca (migración altitudinal de especies, etc).
- b) Desaprovechamiento de las áreas con potencial forestal multipropósito como producción de madera, captación de carbono, regulación del ciclo hidrológico local, protección del suelo y servicios recreativos.
- c) Subutilización de la producción potencial de las áreas plantadas con coníferas y eucaliptos hace más de cuarenta años en predios públicos que han sido abandonados.
- d) Incremento del área de pastizales, debido especialmente a la expansión de la ganadería bovina y la recurrencia de incendios de la cobertura vegetal.
- e) Ampliación de las áreas de cultivo, muchos de éstos sin el manejo adecuado (siembra en pendiente, quemas, entre otros) y cuya vocación es exclusivamente forestal.
- f) Incremento del número de puntos de erosión edáfica, debido a cortes de laderas con diversos propósitos (construcción de vías y terraplenes para construcción de casas, fuga permanente de agua de las mangueras de distribu-

ción domiciliaria, establecimiento de cultivos en áreas con fuerte pendiente y recurrencia de incendios de la cobertura vegetal).

- g) Disminución de la cantidad y calidad de la oferta hídrica de la cuenca para la ciudad, debido al incremento de la población rural y a la inadecuada disposición de efluentes domiciliarios.
- h) Incremento de las actividades de construcción de viviendas que no cumplen con los requerimientos de ley ni atienden las restricciones de orden natural (pendiente y estabilidad del terreno, microfallamientos, entre otros).
- i) Incremento del riesgo de incendios de la cobertura vegetal debido a actitudes irresponsables o negligentes.

Bibliografía

- Alcaldía de Santiago de Cali. (1999). *Caracterización Social del Corregimiento de Los Andes*. Cali: Gerencia de Desarrollo Territorial, 39.
- Alcaldía de Santiago de Cali. (1999). *Caracterización Social del Corregimiento de Felidia*. Cali: Gerencia de Desarrollo Territorial, 56.
- Alcaldía de Santiago de Cali. (1999). *Caracterización Social del Corregimiento de La Leonera*. Cali: Gerencia de Desarrollo Territorial, 50.
- Alcaldía de Santiago de Cali. (1999). *Caracterización Social del Corregimiento de Pichindé*. Cali: Gerencia de Desarrollo Territorial, 55.

Alcaldía de Santiago de Cali. (1999). *Caracterización Social del Corregimiento de El Saladito*. Cali: Gerencia de Desarrollo Territorial, 135.

Bonccam, E. y B. Silva. (1969). *Estudio preliminar del uso de los suelos de la Cuenca del Río Cali (Valle)*. Tesis de Grado Ingeniería Forestal, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá. Documento mecanografiado, 117.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (Grupo de Recursos Hídricos). (2000). *Balance oferta-demanda de agua cuencas de los ríos Cali – Meléndez – Pance y Aguacatal*. Cali: CVC. 11.

Corporación Autónoma Regional del Valle Del Cauca. (2000). *Sistema de Información Geográfica de a Unidad de Manejo de Cuenca Cali – Meléndez – Pance – Aguacatal*. Cali: CVC, 204.

Corporación Autónoma Regional del Valle Del Cauca. (2002). *Plan de Ordenamiento Ambiental de la cuenca de los ríos Cali, Meléndez, Pance, Aguacatal*. Documento Síntesis. CVC-Subdirección de Planeación. Santiago de Cali, 54.

Daza, J. y E. Alba. (1999). *Evaluación de la demanda hídrica en zona de influencia de embalses de regulación –Cuenca Río Cali*. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Contrato SGA 035-97. Santiago de Cali. Documento mecanografiado. 93.

Departamento Administrativo de Gestión Del Medio Ambiente, Dagma. (1997). *Cali: la Ciudad de los siete ríos*. Santiago de Cali: Artes Gráficas, Universidad del Valle.

⁴ En la actualidad la CVC adelanta las gestiones orientadas a la formulación del POMCH para esta cuenca.

Departamento Administrativo de Gestión Del Medio Ambiente, Dagma. (2000). *Estudio del Caudal Ecológico, Balance Hídrico, Indicadores Ambientales e Inventario del Recurso Hídrico en Los Ríos Cali, Aguacatal, Cañaveralejo y Meléndez del Municipio de Santiago de Cali*. Cali: Dagma.

Escobar, S. (2007). *Balances oferta-demanda de agua superficial de las cuencas hidrográficas del Valle del Cauca*. Contrato CVC 45 de 2007. Cali: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.

Espinal, L.S. (1968). *Visión ecológica del Departamento del Valle del Cauca*. Cali: Universidad del Valle, 103.

Estrada, D. y H. (2000). Esquivel. *Procesos geológicos y geomorfológicos actuales y recientes en la Cuenca del Río Cali. Proyecto ¼ Divisoria de la Cuenca hasta el sitio de encuentro de los ríos Pichindé y Pichindecito*. Trabajo de Grado Ingeniería Topográfica, Universidad del Valle. Santiago de Cali.

Galindo, J. (1957). *Apuntes sobre los principales problemas forestales en la Hoya Hidro-*

gráfica del Río Cali. Trabajo de Grado Ingeniería Forestal, Bogota D.C.: Universidad Distrital.

Haltenhoff, H. (1995). *Programa de prevención y control de incendios forestales*. Cali: Emcali – Dagma - Procuenas. Documento mecanografiado. Santiago de Cali: s.n, 95.

Parra Lara. Á., Bernal Toro, F., Montoya Santacruz, J., Giraldo, A. y Álvarez, G. (2009). *Caracterización de algunos parámetros de la condición pirogénica de las coberturas vegetales de la cuenca media- alta del río Cali*. Cali: 85.

Universidad del Valle. (2003). *Plan de ordenamiento y manejo ambiental de la cuenca hidrográfica del río Cali: diagnóstico*. Documento en revisión, formulación en proceso. Convenio CVC –Univalle, 168. Santiago de Cali: s.n, 215.

Universidad del Valle. (2007). “Identificación de la Situación Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Cali, zona urbana de Santiago de Cali”. *Informe final*. Convenio Dagma – Univalle. Santiago de Cali: s.n, 184.

Análisis del fenómeno de los incendios de la cobertura vegetal en la cuenca media del río Cali

ÁLVARO DEL CAMPO PARRA-LARA^{1,2}

Resumen

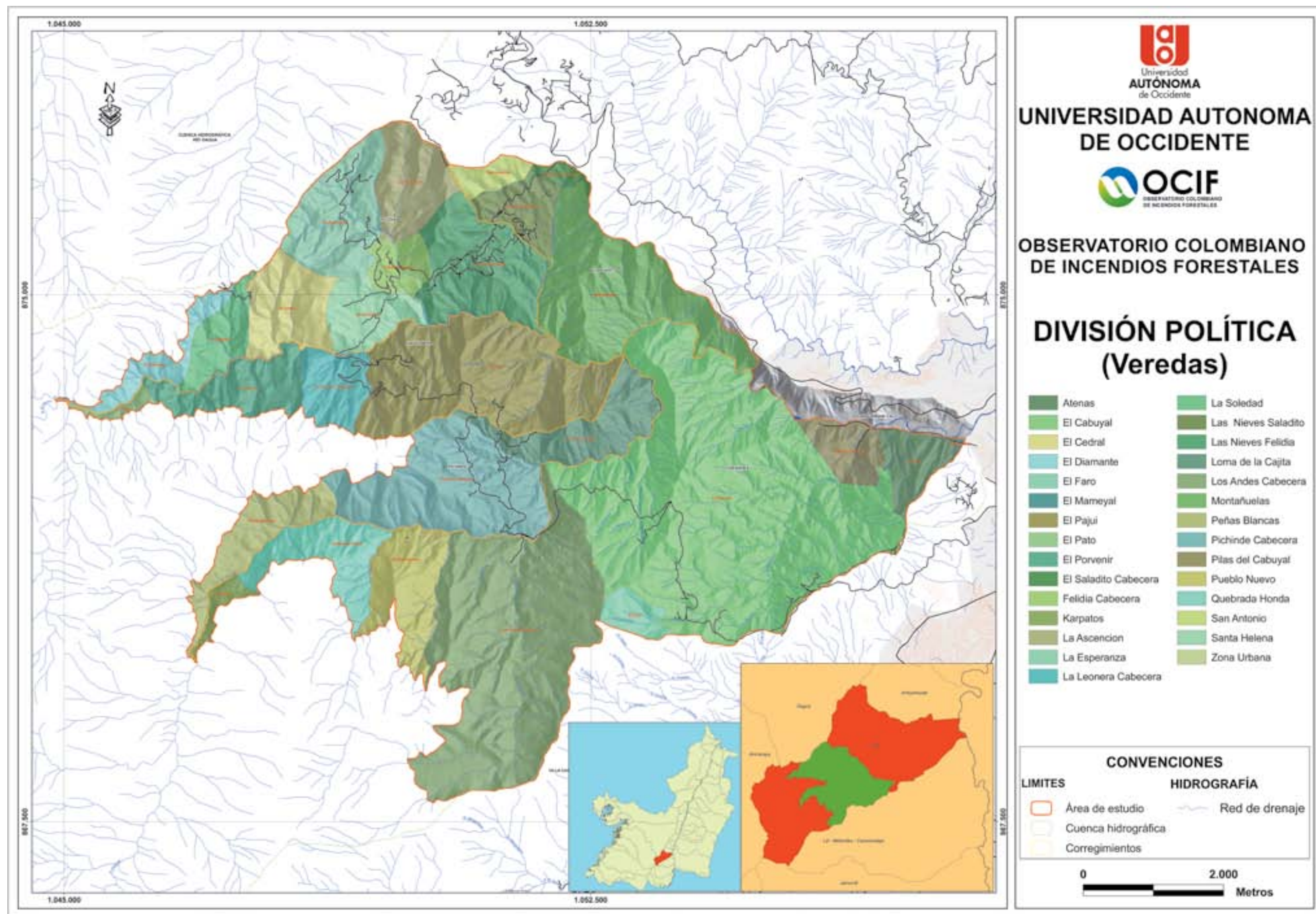
Los incendios de la cobertura vegetal son un fenómeno común en las interfaces urbano-rurales de las ciudades colombianas, como resultado de prácticas culturales relacionadas con el uso del territorio y a la baja gobernabilidad ejercida por el Estado sobre estos escenarios. Con el objetivo de caracterizar la dinámica espacio-temporal del fuego, de esclarecer sus posibles causas e impactos sobre las coberturas vegetales existentes en la zona de estudio, lo mismo que la percepción de sus habitantes acerca del fenómeno, se adelantó la presente investigación, aunque

toma como ventana de observación el periodo 1999 - 2009. Los resultados muestran una alta concentración de eventos y de área quemada en los periodos más secos del año, que afectan de manera especial los pastizales, cobertura que viene expandiéndose por efecto del fuego en la franja peri-urbana. El nivel de conocimiento empírico que poseen los habitantes sobre el fenómeno estudiado es consistente con el recabado por el grupo de investigación.

Palabras clave: dinámica, frecuencia, gravedad, Colombia, Santiago de Cali.

1 Magíster en Ciencias; Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Instituto Tecnológico de Costa Rica / Universidad Nacional de Costa Rica / Universidad Nacional Autónoma de México / Universidad Autónoma de Chapingo (México). alcampo@uao.edu.co.

2 Investigador Línea Ecología y Gestión de Incendios de la Cobertura Vegetal, Grupo de Estudios Ambientales para el Desarrollo Sostenible, Grupo A de Colciencias, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, Colombia.



Abstract

The fires of vegetable coverage constitute a common phenomenon in the urban - rural interfaces of the Colombian cities, as result of cultural practices related to the use of the territory and to few gobernabilidad exercised by the State on these scenes. With the aim to characterize the dynamics temporary space of the fire, to clarify his possible reasons and impacts exercised on the vegetable existing coverages in the zone of study the same as the perception of his inhabitants on the phenomenon, the present investigation went forward, taking the period as a window of observation 1999 – 2009. The results show a high concentration of events and of area burned in the driest periods of the year, affecting in a special way to the pastures, coverage that comes expanding to effect of the fire in the peri-urban band. The level of empirical knowledge that the inhabitants possess on the studied phenomenon is consistent with the obtained one for the group of investigation.

Key words: dynamics, frequency, gravity, Colombia, Santiago de Cali.

Introducción

El municipio de Santiago de Cali históricamente ha sido el principal conector entre las dinámicas socioeconómicas del Pacífico colombiano y el interior del país. En la actualidad cuenta con una población

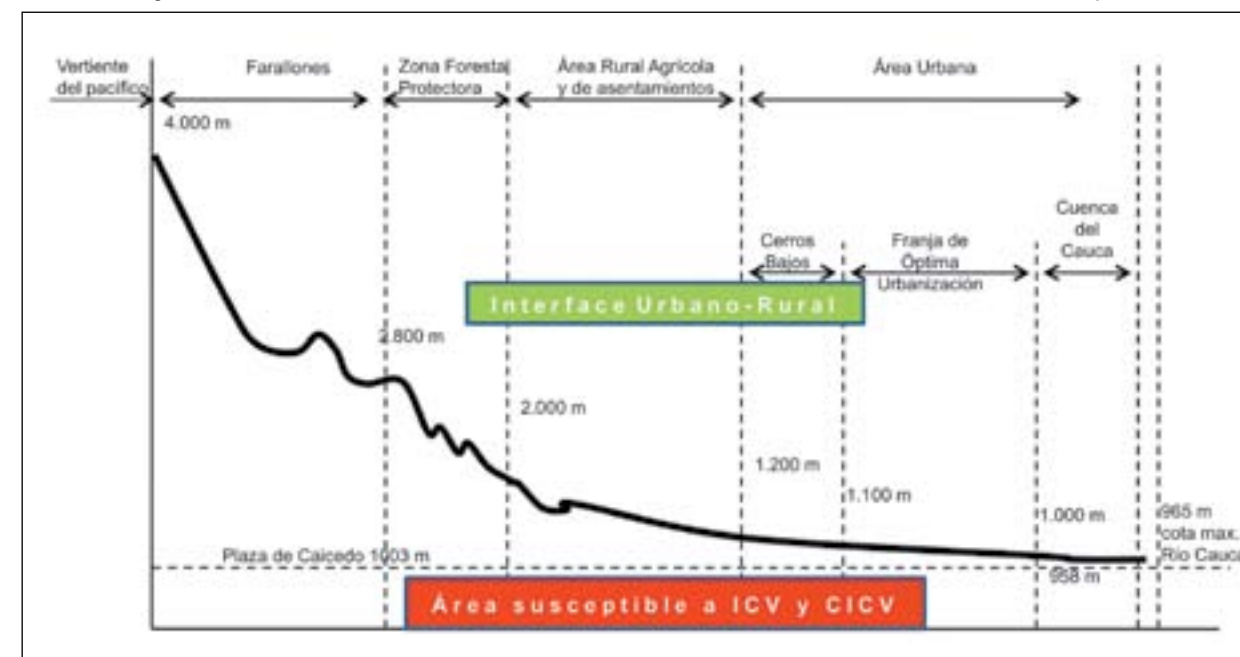
de aproximadamente 2.219.600 personas, de las cuales el 98,4% se ubica en la zona urbana (Departamento Administrativo de Planeación, 2009) y su capital -Santiago de Cali- constituye el núcleo de dos sistemas: por una parte, de un área metropolitana funcional formada por los municipios circunvecinos de Jamundí, Yumbo, Palmira, Candelaria y Puerto Tejada y por otro lado, del sistema de ciudades intermedias del valle geográfico del río Cauca (Santander de Quilichao, Palmira, Buga, Tuluá y Cartago).

Otra característica importante del municipio de Santiago de Cali es el alto número de incendios y conatos de incendios de la cobertura vegetal que reporta por año en comparación con otras entidades territoriales*. Esta situación posiblemente sea explicable por la combinación de factores socioeconómicos que ocurren en su área rural (Figura 1) y por la alta susceptibilidad al fuego de las coberturas vegetales predominantes.

La dinámica espacio-temporal de los incendios de la cobertura vegetal en la zona de estudio

Teniendo en cuenta la importancia estratégica de la cuenca como proveedora de bienes y servicios ambientales para la ciudad de Cali, los conflictivos procesos socioeconómicos presentes en su territorio, la dinámica del fuego en sus coberturas vegetales observada durante los últimos once años y la urgencia de dimensionar dicha problemática,

Figura 1. Unidades de paisaje del Municipio susceptibles a incendios y conatos de incendios de coberturas vegetales



Fuente: Adaptado de Observatorio Sismológico del Sur Occidente –Osso– 2004.

se desarrolló una investigación cuyo objetivo específico fue el de establecer el régimen espacio-temporal de los incendios y conatos de incendios de la cobertura vegetal (ICV, CICV) en dicho territorio. La utilidad práctica de conocer el fenómeno en las unidades territoriales menores a la municipal, es la generación de insumos de información de base científica para el diseño de estrategias de prevención en territorios más particulares. El presente trabajo intenta contribuir a ello -desde una perspectiva más analítica, detallada y actualizada- más que los escasos trabajos realizados para la cuenca de referencia (Haltenhoff, 1995; Corporación Fondo de Solidaridad, 2006).

La investigación parte de la evidencia documentada según la cual, la dinámica del fuego tiene una estrecha relación con las principales variables climáticas locales y algunas variables

socioeconómicas del área en donde ocurren (Fulé y Covington, 1998; McKenzie, 2004; Cochrane *et al.*, 1999; Hoffman *et al.*, 2009).

Para el desarrollo del trabajo se utilizó la información sobre el número y área de incendios y conatos de cobertura vegetal existente en el Observatorio Colombiano de Incendios Forestales (OCIF). Los datos históricos del clima corresponden a las series históricas de las estaciones climatológicas *Yanaconas* (1.730 msnm) y *La Teresita* (1.950 msnm) (CVC, 2009), ubicadas dentro del área de estudio y complementarias en las variables de interés. Considerando que la primera estación mencionada es la más representativa por encontrarse aproximadamente en el punto medio de altitud del área de estudio, todos los datos utilizados en la investigación corresponden a ella o fueron homologados a la misma.

* Situación que puede estar expresando la problemática en su verdadera magnitud o que los otros municipios no hacen un manejo cuidadoso de las estadísticas sobre el tema.

Los datos de temperatura corresponden al historial de la estación *La Teresita*, pero fueron extrapolados a la estación de *Yanaconas* utilizando la ecuación de gradiente adiabático establecido por Rosero (2010)*:

$$T^{\circ}C = T^{\circ}C_{ref} + 0,0062 \times \Delta Altitud_{(EstA-EstB)}$$

Ecuación (1)

Donde:

$T^{\circ}C$: temperatura extrapolada, en grados centígrados.

$T^{\circ}C_{ref}$: temperatura de la estación que cuenta con historial de temperatura

0,0062: variación de temperatura por cada 100 metros de altitud.

$\Delta Altitud_{(EstA-EstB)}$: diferencia de altitud entre las dos estaciones consideradas.

Los datos sobre precipitación se tomaron de la estación *Yanaconas*, y la serie debió completarse con regresiones simples.

Para establecer las relaciones entre fuego y variables climáticas se tomaron como variables dependientes, el número de eventos de fuego y el área afectada según el tipo de evento Incendios de la Cobertura Vegetal (ICV) y Conatos de incendios de la Cobertura Vegetal (CICV). Las variables explicativas fueron la temperatura y la precipitación media mensual registrada durante el periodo de estudio.

Los resultados obtenidos muestran que:

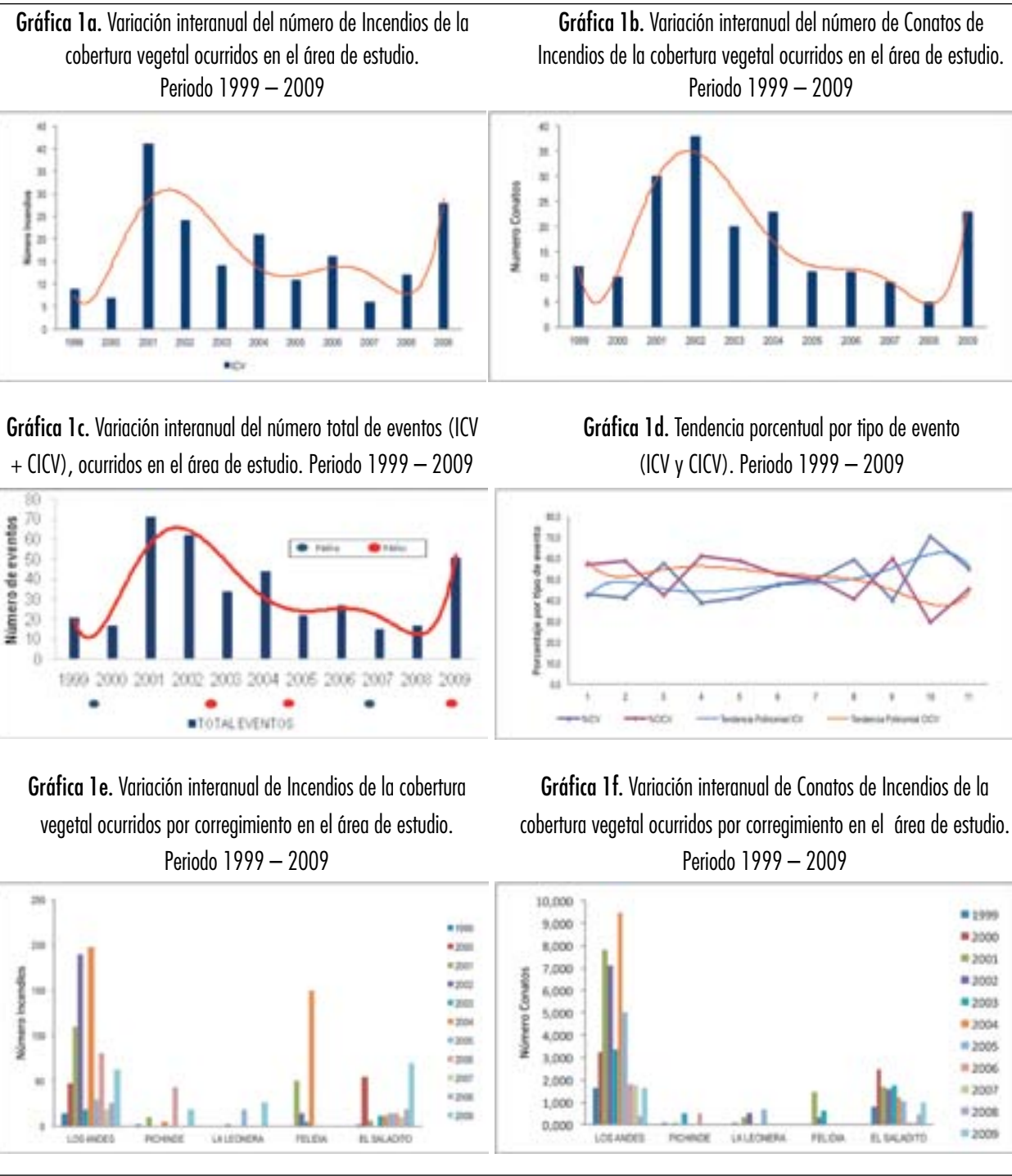
A. Durante el periodo de estudio (1999-2009) se registraron 381 eventos de fuego en proporciones muy cercanas a incendios (49,6%) y a conatos (50,4%) con un promedio aproximado de 34 eventos por año.

B. En la dinámica temporal y espacial interanual son evidentes las siguientes tendencias:

a) La disminución en el número de ICV y de CICV, aunque en el último año (2009) se observa un incremento en ambos tipos de eventos respecto a los seis años inmediatamente precedentes, y es más marcado el fenómeno en conatos (Gráficas 1a, 1b y 1c). Así mismo, se observa que a partir del 2002 los ICV porcentualmente tienden a incrementarse respecto a los CICV (Gráfica 1d).

La variabilidad en el número de eventos de fuego, especialmente en relación con los máximos y mínimos, debiera estar condicionada en alto grado por la ocurrencia de los fenómenos de El Niño y de La Niña, ya que el primero tiende a determinar un clima más seco -con fuertes sequías- y el segundo, a una fase húmeda con altas precipitaciones. Sin embargo, los máximos de eventos (2001, 2002, 2004 y 2009) no coinciden con la presencia de *El Niño*, excepto para el último año señalado, lo cual reafirma lo destacado por Carvajal *et al* (s. f.), en el sentido que algunas de las sequías extremas ocurridas en la región están asociadas a otras variables macroclimáticas. Una tendencia similar a la presentada en toda el área de estudio puede ser observada a escala de corregimiento, especialmente en aquellos que presentan una dinámica más continua e intensa (Gráficas 1e y 1f).

* Los términos de la ecuación son aditivos en este caso considerando que la estación con $T^{\circ}C_{ref}$ se encuentra en una cota superior a la de referencia.

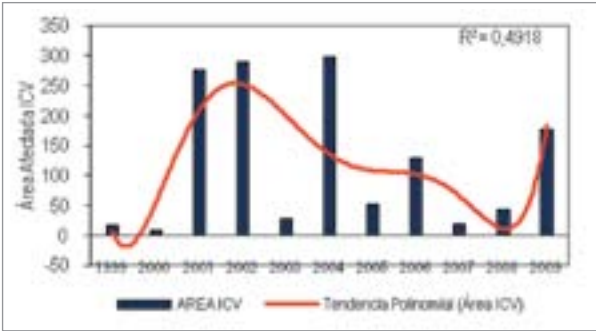


Fuente: elaboración propia

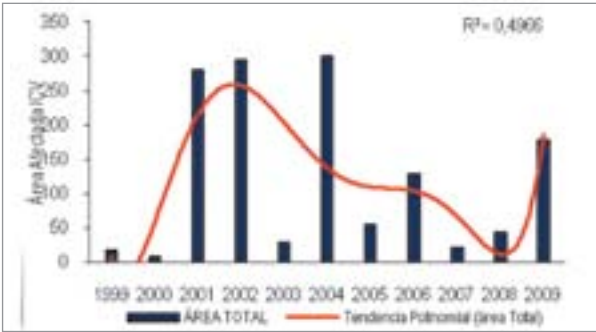
b) La disminución del área afectada para ambos tipos de eventos (Gráficas 1g, 1h y 1i), aunque el área correspondiente a los ICV tiende a incrementarse porcentualmente respecto a la de CICV (Gráfi-

ca 1j), tendencia observable también en los corregimientos (Gráficas 1k y 1l). En general, el área afectada por conatos es significativamente inferior a la impactada por los incendios (2% en promedio).

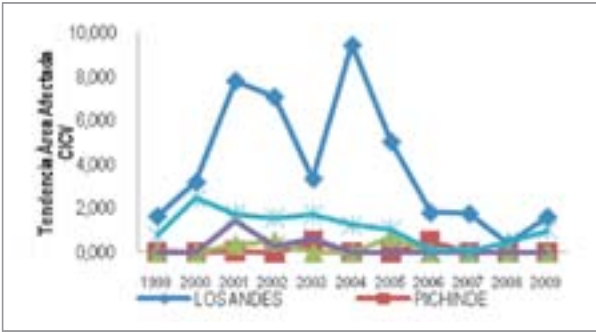
Gráfica 1g. Variación interanual del área afectada (Ha) por Incendios de la cobertura vegetal. Periodo 1999 – 2009



Gráfica 1i. Variación interanual del área total (Ha) afectada (Ha) por los eventos (ICV + CICV). Periodo 1999 – 2009



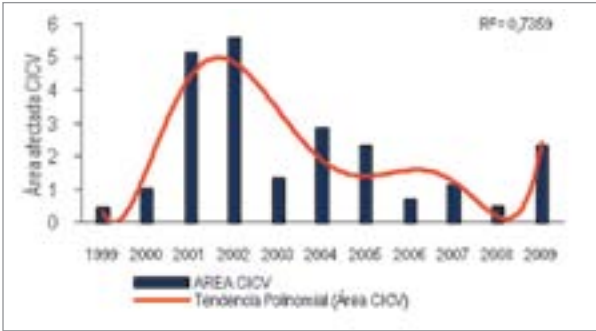
Gráfica 1k. Variación interanual del área afectada (Ha) por Incendios de la cobertura vegetal a nivel de corregimientos. Periodo 1999 – 2009



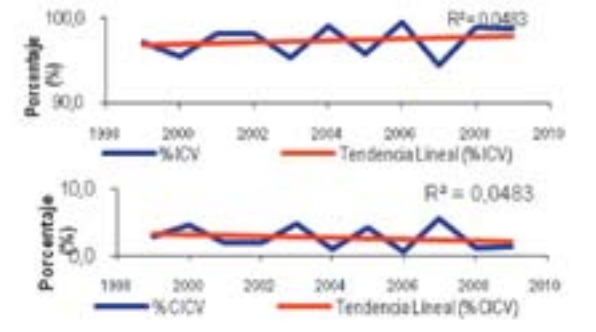
Fuente: elaboración propia

C. La dinámica temporal y espacial intra-anual establece las siguientes tendencias:
 a) Un comportamiento bimodal del número de eventos a lo largo del año (Gráficas 2a, 2b y 2c), aunque con una

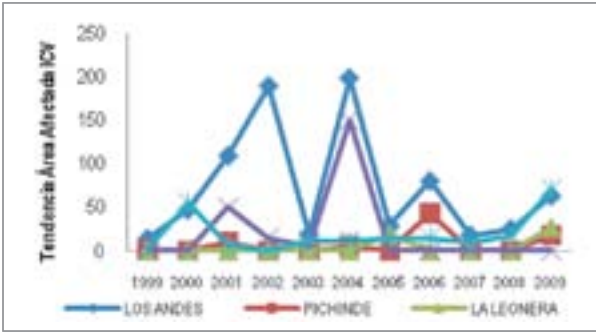
Gráfica 1h. Variación interanual del área afectada (Ha) por Conatos de Incendios de la cobertura vegetal. Periodo 1999 – 2009



Gráfica 1j. Variación porcentual de áreas afectadas por eventos (ICV + CICV). Periodo 1999 – 2009

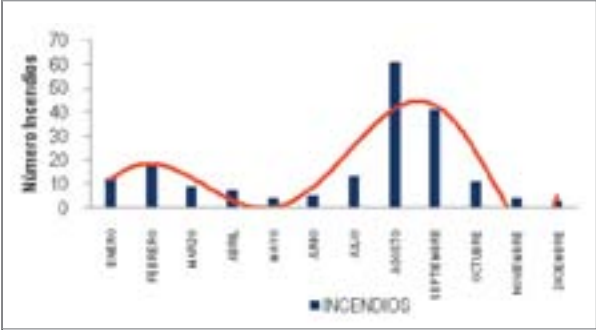


Gráfica 1l. Variación interanual del área afectada (Ha) por Conatos de Incendios de la cobertura vegetal a nivel de corregimientos. Periodo 1999 – 2009

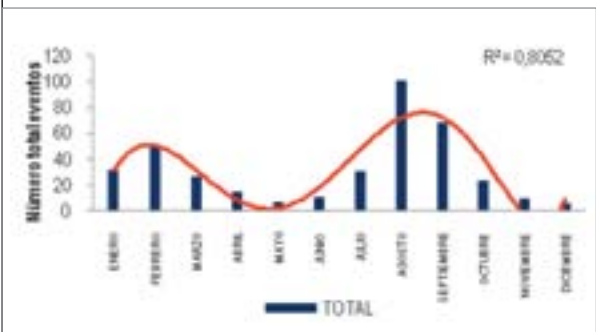


mayor concentración en el periodo julio-septiembre de cada año, meses durante los cuales se incrementa fundamentalmente el número de ICV y el área afectada (Gráficas 2d y 2h). Es

Gráfica 2a. Variación intra-anual del número de Incendios de la cobertura vegetal ocurridos en el área de estudio. Periodo 1999 – 2009



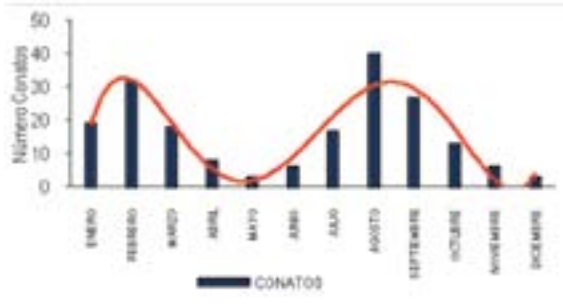
Gráfica 2c. Variación intra-anual del número total de eventos (ICV + CICV) ocurridos en el área de estudio. Periodo 1999 – 2009



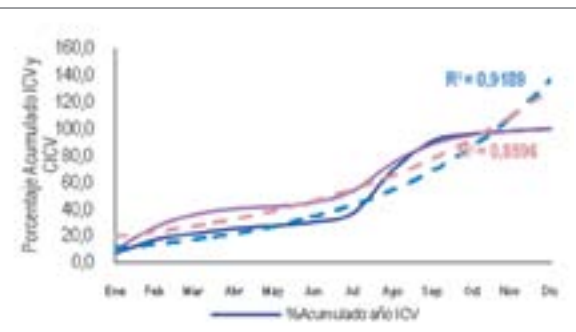
Fuente: elaboración propia

de anotar que la dinámica de eventos guarda una estrecha relación con el ciclo climático anual, debido en buena medida a la pérdida de humedad de los combustibles ocasionada por altas temperaturas y menores preci-

Gráfica 2b. Variación intra-anual del número de Conatos de Incendios de la cobertura vegetal ocurridos en el área de estudio. Periodo 1999 – 2009



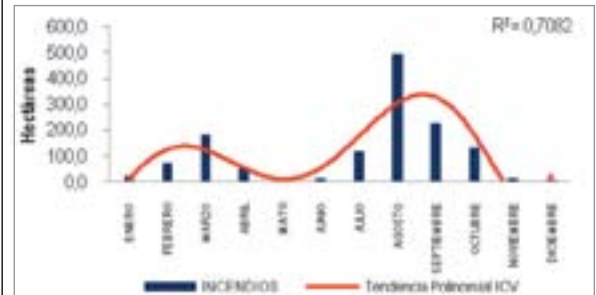
Gráfica 2d. Variación intra-anual del porcentaje acumulado del número de Incendios de ICV y CICV ocurridos en el área de estudio. Periodo 1999 – 2009



pitaciones, condiciones que además predisponen a la vegetación al fuego al inducir el estrés hídrico en ella.

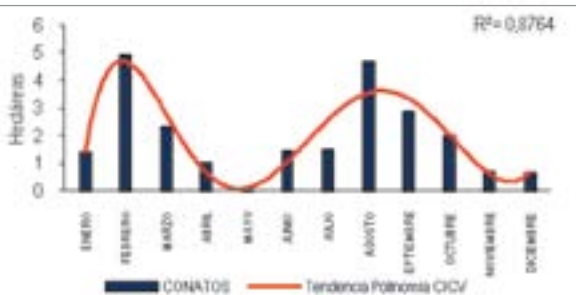
b) El incremento del área total quemada (Gráfica 2e, 2f y 2g) y del área prome-

Gráfica 2e. Variación intra-anual del área afectada (Ha) por ICV ocurridos en el área de estudio. Periodo 1999 – 2009



Fuente: elaboración propia

Gráfica 2f. Variación intra-anual del área afectada (Ha) por CICV ocurridos en el área de estudio. Periodo 1999 – 2009



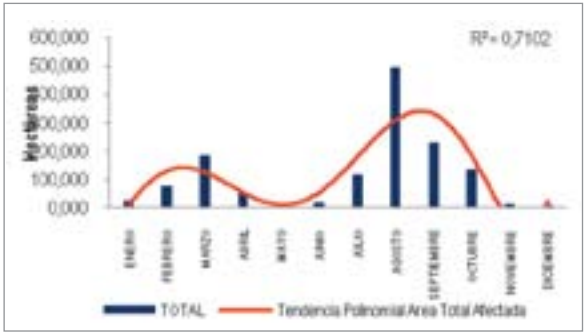
dio quemada por evento durante la temporada más seca del año (grafica 2h).

D. La dinámica intrasemanal de eventos no muestra una tendencia evidente de concentración en días específicos (Gráfica 3), aunque los martes, miércoles y jueves reúnen alrededor del 46,6% de ellos. Por otra parte, se destaca el hecho que el trimestre abril-mayo-junio presenta el mayor número de días sin eventos y, por

el contrario, enero-febrero-marzo, el más alto (Gráfica 4).

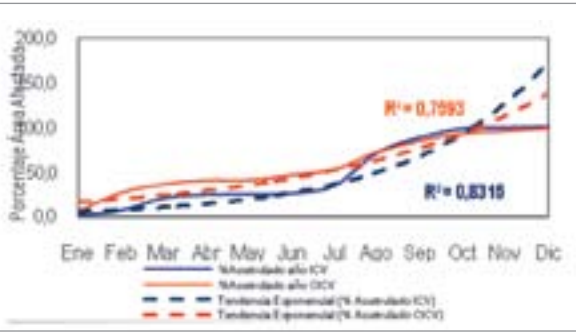
E. La variación diaria, es decir, 24 horas, muestra que el 63,6% de los eventos se concentran en la franja comprendida entre las 12:00 y las 17:59 horas (Tabla 1, Gráfica 5), fenómeno que puede estar condicionado por una inflamabilidad potencial mayor de los combustibles vegetales como resultado del calor acumulado por la radiación solar recibida durante la mañana.

Gráfica 2g. Variación intra-anual del área total afectada (Ha) por el total de eventos (ICV + CICV) en el área de estudio. Periodo 1999 – 2009

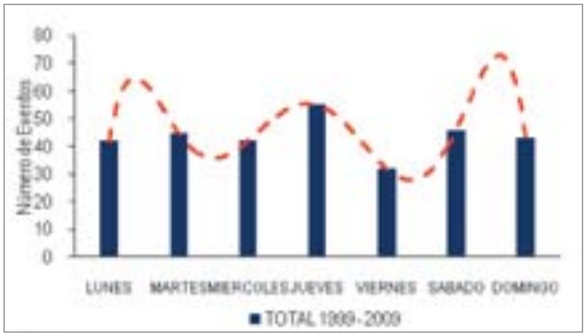


Fuente: elaboración propia

Gráfica 2h. Variación intra-anual del porcentaje acumulado del área afectada por ICV y CICV. Periodo 1999 – 2009



Gráfica 3. Distribución porcentual del número de eventos (ICV y CICV) durante la semana. Periodo 1999 – 2009



Fuente: elaboración propia

Gráfica 4. Distribución porcentual de eventos (ICV y CICV) durante la semana. Periodo 1999 - 2009

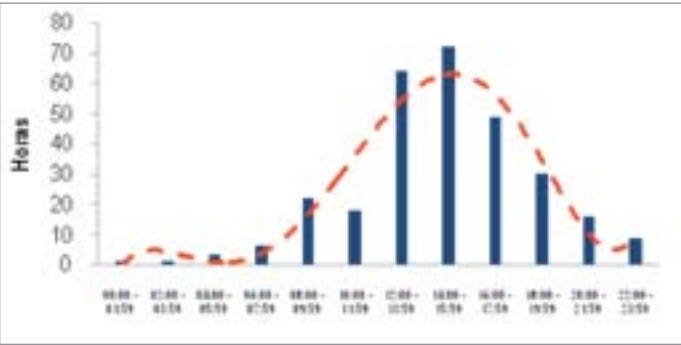


Tabla 1. Distribución porcentual del número de eventos en las diferentes franjas horarias del día. Periodo 1999 – 2009

Franja		%
Madrugada	00:00 – 05:59 hrs	1,7
Mañana	06:00 . 11:59 hrs	15,8
Tarde	12:00 – 17:59 hrs	63,6
Noche	18:00 -23:59 hrs	18,9

Fuente: elaboración propia

Gráfica 5. Distribución porcentual del número de eventos durante la semana. Periodo 1999 – 2009.



Las coberturas vegetales afectadas por el fuego

La cuenca del río Cali es un complejo mosaico de coberturas vegetales que expresa los conflictos presentados por el uso del suelo, ocurridos paralelamente al desarrollo de la ciudad de Santiago de Cali y, de manera especial, a partir de la mitad del siglo XX. En

la actualidad las coberturas vegetales predominantes en el área de estudio corresponden a distintas fases sucesionales de vegetación secundaria, lo mismo que a pastizales y otras coberturas menores como plantaciones de especies exóticas (Cuadro 1), y la mayor parte de ellas se caracterizan por un alto grado de fragmentación (Álvarez-Saa y Giraldo, 2009).

Cuadro 1. Principales atributos de las coberturas existentes en la zona de estudio

Cobertura vegetal	Especies dominantes	Altura Vegetación (m)	Número		H' (Shannon-Wiener)		Biodiversidad
			Familias	Especies	Encontrado	Máximo	
Pastizal Bajo	<i>Andropogon bicornis</i> y <i>Paspalum saccharoides</i> (POACEAE), <i>Scleria</i> sp. (CYPERACEAE), <i>Bacharis trinervis</i> (ASTERACEAE) y <i>Thumbergia alata</i> (ACANTHACEAE).	0.6	22	34	1.1	1.4	Baja
Pastizal Alto	<i>Paspalum saccharoides</i> , <i>Paspalum notatum</i> , <i>Melenis minituflora</i> , <i>Saccharum officinarum</i> (POACEAE), <i>Galium hypocarpium</i> (RUBIACEAE).	2	21	40	0.7	1.6	Baja
Cañaveral	<i>Gynerum sagittatum</i> (POACEAE), <i>Scleria</i> sp. (CYPERACEAE), <i>Mikania banisteriae</i> (ASTERACEAE), <i>Hyptis capitata</i> (LAMIACEAE) y <i>Piper crassinervium</i> (PIPERACEAE).	10	39	60	1.1	1.7	Media
Guadual	<i>Guadua angustifolia</i> (POACEAE), <i>Melenis minituflora</i> (POACEAE), <i>Impatiens balsamina</i> (BALSAMINACEAE), <i>Hyparrhenia rufa</i> (POACEAE) y <i>Blechnum ensiforme</i> (ACANTHACEAE).	15	40	65	1.6	1.8	Alta
Helechal	<i>Pteridium aquilidium</i> (PTERIDACEAE), <i>Coccosipcelum lanceolatum</i> (RUBIACEAE), <i>Hyptis capitata</i> (LAMIACEAE), <i>Panicum trichoides</i> y <i>Andropogon bicornis</i> (POACEAE).	2	36	66	1.6	1.8	Alta

Cobertura vegetal	Especies dominantes	Altura Vegetación (m)	Número		H' (Shannon-Wiener)		Biodiversidad
			Familias	Especies	Encontrado	Máximo	
Rastrojal bajo	<i>Andropogon bicornis</i> , <i>Paspalum sacharoides</i> y <i>Melenis minutiflora</i> (POACEAE), <i>Hyptis capitata</i> (LAMIACEAE) y <i>Scleria</i> sp (CYPERACEAE).	2	36	74	1.6	1.8	Alta
Rastrojal alto	<i>Toxicodendron striatum</i> (ANACARDIACEAE), <i>Piper aduncun</i> , <i>P. crassinervium</i> y <i>P. grande</i> (PIPERACEAE), <i>Ladenbergia magnifolia</i> (RUBIACEAE).	5	25	63	1.6	1.7	Alta
Sucesión intermedia	<i>Tapirira guianensis</i> (ANACARDIACE), <i>Guatertia latisejala</i> (ANNNONACEAE), <i>Myrcine coriacea</i> (MYRCYNACEAE), <i>Alchornea grandiflora</i> (EUPHORBIACEAE) y <i>Ladenbergia magnifolia</i> (RUBIACEAE).	15	41	89	1.8	1.9	Alta
Sucesión avanzada	<i>Elaegia regia</i> (RUBIACEAE), <i>Ocotea</i> sp (LAURACEAE), <i>Calatola columbiana</i> (ICACINACEAE), <i>Heliocarpus popayanensis</i> (TILIACEAE), <i>Chrysochlamys colombiana</i> (CLUSIACEAE).	35	44	73	1.7	1.8	Alta
Pinar	<i>Pinnus oocarpa</i> , <i>P. patula</i> y <i>P. radiata</i> (PINACEAE), <i>Melenis minutiflora</i> (POACEAE), <i>Spilanthes ecliptoides</i> (ASTERACEAE).	25	30	44	1.3	1.6	Baja
Ciprés	<i>Cupressus lusitánica</i> (CUPRESACEAE), <i>Selaginella geniculata</i> (SELLAGINELLACEAE), <i>Kohleria spicata</i> (GESNERIACEAE), <i>Coccocypselum lanceolatum</i> (RUBIACEAE) y <i>Vismia baccifera</i> (CLUSIACEAE).	25	29	44	1.5	1.6	Alta
Eucalipto	<i>Eucalipto deglupta</i> (MYRTACEAE), <i>Melenis minutiflora</i> (POACEAE), <i>Scleria</i> sp. (CYPERACEAE), <i>Miconia caudata</i> (MELASTOMATAACEAE) y <i>Hyparrhenia rufa</i> (POACEAE).	30	28	37	1.4	1.6	Media

Fuente: Giraldo y Saa, 2008

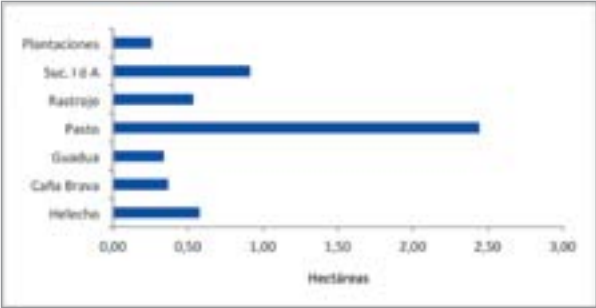
De manera tendencial, las diferentes coberturas vegetales existentes en la zona se encuentran altamente fragmentadas, tal como lo muestra el tamaño promedio de los *parches* para cada una de ellas (Gráfica 6).

En relación con el tipo de cobertura vegetal afectada por incendios y conatos, se destacan los pastos seguidos por los rastrojos y la sucesión intermedia y avanzada (Gráfica 7) y se registra una tendencia incremental en

el porcentaje del área afectada por bosque natural en el 2009 (Gráfica 8). Es de anotar que en el periodo 2004-2009, del cual existe información confiable acerca de las coberturas vegetales quemadas, no se reporta afectación a cultivos transitorios o permanentes.

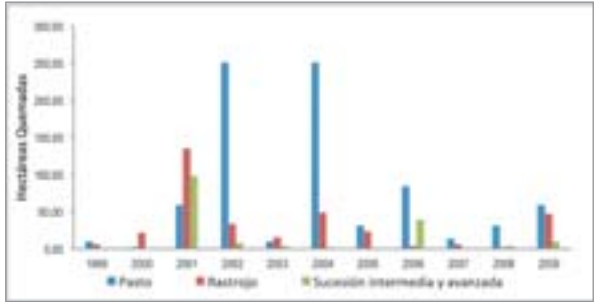
Las tendencias de las distintas coberturas vegetales objeto de incendios y conatos en la cuenca estudiada permiten establecer un modelo ecológico del fuego (Figura 2)*, el cual

Gráfica 6. Tamaño promedio de los fragmentos por tipo de cobertura vegetal



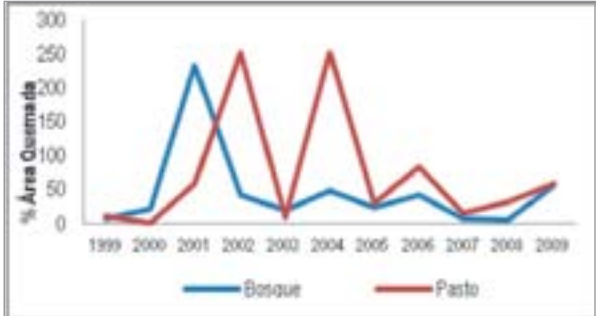
Fuente: elaboración propia

Gráfica 7. Variación interanual de área promedio afectada por eventos (ICV + CICV) en el área de estudio



Fuente: elaboración propia

Gráfica 8. Tendencia porcentual interanual del área afectada por tipo de cobertura



Fuente: elaboración propia

muestra que la recurrencia de los eventos conduce -en diferentes horizontes de tiempo- al establecimiento del pasto como cobertura vegetal dominante. Por el contrario, cuando los eventos son de baja intensidad y periodi-

cidad permiten la autorregeneración de los sitios y coberturas afectados.

Para estimar la gravedad de los eventos ocurridos en cada tipo de cobertura se utilizó un índice propuesto por el autor del presente trabajo (Anexo 1), ya que los métodos ampliamente utilizados (Copete *et al.*, 2007; Villers y Hernández, 2007; Hernández, 2009) lo toman solamente como una función de la superficie forestal total afectada por el fuego en una zona determinada, sin considerar otras variables relevantes (valor ecológico y grado de fragmentación de la cobertura perturbada). Lo anterior parte del hecho de que no todas las coberturas vegetales tienen el mismo grado de importancia ni de conservación en un territorio determinado y, por lo tanto, la gravedad del fuego es diferencial más allá del área quemada.

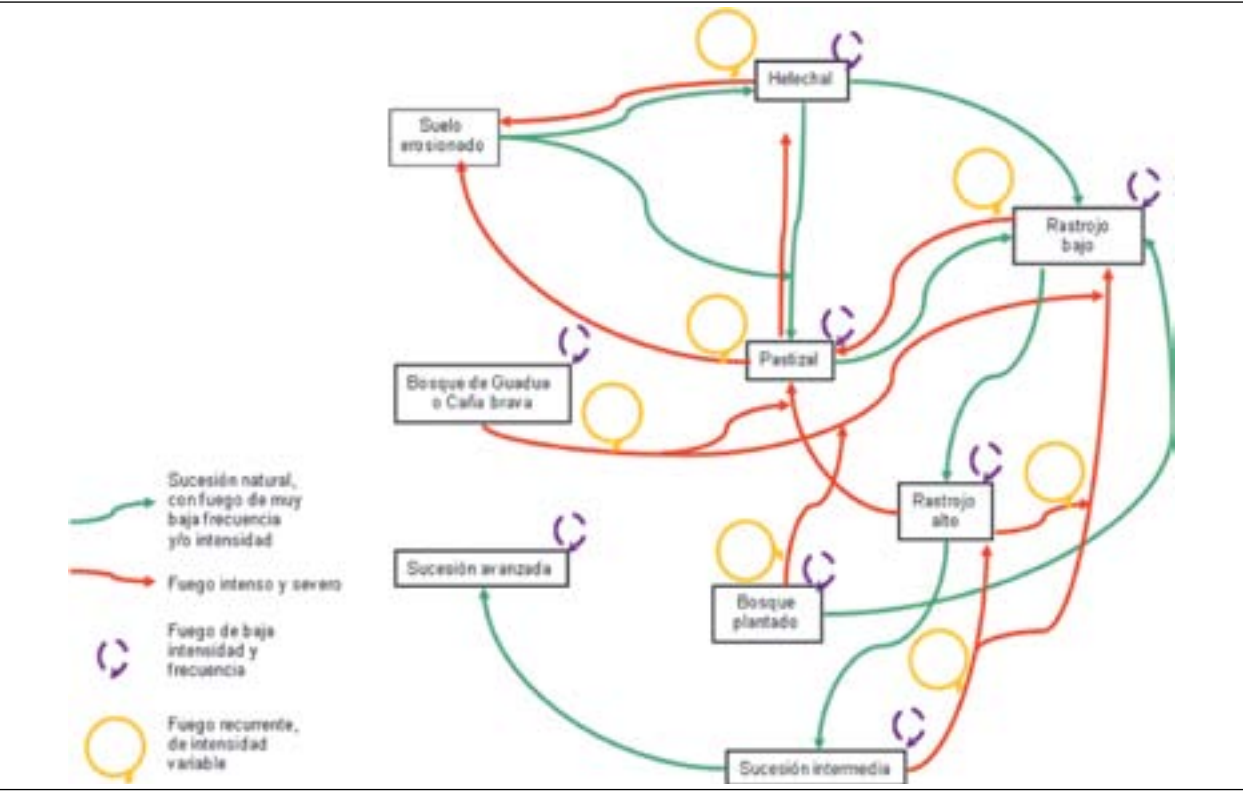
Los Índices de Gravedad Individual (IGI), histórico calculados* para los principales tipos de cobertura, son más irregulares para pasto y rastrojo (Gráficas 9 y 10) y los IG más altos corresponden a rastrojo y bosque. (Gráfica 11).

Los incendios más graves, considerando la totalidad de coberturas estudiadas, son los que ocurren en el mes de enero y mayo (Gráfica 12), lo que contrasta con la creencia de que la mayor afectación individual se presenta durante los periodos de julio–septiembre, por ser los meses más calurosos, lo que propicia la deshidratación de las coberturas vegetales, y deja el material vegetal en

* Para el trabajo se localizaron una serie de sitios en los cuales han ocurrido eventos durante los últimos 25 años, historial que fue posible de levantar gracias a la colaboración de antiguos guardabosques de la CVC y del Parque Nacional Natural Los Farallones de Cali y de habitantes de la zona.

* Los cálculos se efectuaron únicamente para los años 2008 y 2009 por no contar con la información suficiente para los años anteriores.

Figura 2. Modelo ecológico del fuego en la cuenca del río Cali – Colombia.



Fuente: elaboración propia

condiciones que permiten su ignición con gran facilidad.

El fuego como fenómeno peri-urbano de la cuenca

Partiendo del hecho que el municipio de Santiago de Cali se caracteriza también por presentar un patrón de poblamiento integrado por una gran ciudad y un conjunto de asentamientos periurbanos -cuyo territorio, área de influencia y procesos socioeconómicos se encuentran profundamente permeados por pautas culturales propiamente urbanas (Buitrago, s.f.)-, se podría afirmar que la cuenca del río Cali, en particular su parte media, constituye una zona de transición entre lo urbano y lo propiamente rural. De lo anterior se deduce que solo es posible comprender la problemática de los incendios de la cobertura vegetal que ocurren en dicho territorio a partir de las dinámicas propias de una Interface Urbano-Rural*, (I-UR) o Wildland-Urban Interface, W-UI.

causas, básicamente se podrían identificar las siguientes:

- a) La necesidad de habitar espacios con una mejor oferta ambiental y social (ausencia de ruido urbano, disfrute paisajístico, presencia de fauna silvestre, mayor privacidad, condiciones para el desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias domésticas o comerciales).
- b) La conveniencia de acceder a los beneficios y oportunidades de distinta índole que ofrece la ciudad, sin necesidad de habitarla.
- c) La posibilidad de poseer un sitio propio para vivienda, así sea en áreas marginales o no aptas para ello, en terrenos públicos o privados.
- d) La posibilidad de valorizar la tierra por parte de los especuladores del suelo.

Para el caso de Santiago de Cali, podrían señalarse los siguientes procesos territoriales que caracterizan la dinámica de periurbanización en la parte media de la cuenca del río Cali:

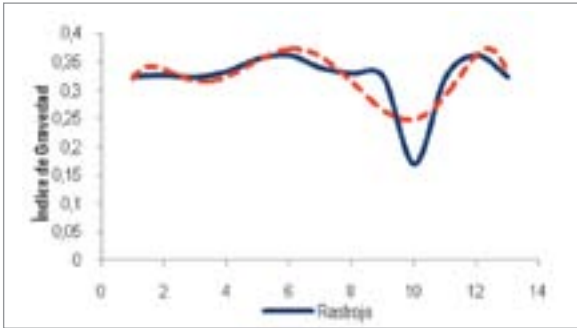
- a) La consolidación y expansión de los núcleos de urbanización de La Reforma, Pichindé, Felidia y La Leonera como asentamientos “dormitorio”.
- b) La expansión de los núcleos periurbanos de Terrón Colorado, Brisas de los Cristales y La Fortuna.

Estas interfaces, cuyo concepto fue planteado inicialmente en Estados Unidos a principios de los años 90 (Stewart *et al.*, 2007), son -con variaciones importantes- un fenómeno creciente en la mayor parte de las ciudades del mundo, y han sido abordadas desde distintas perspectivas analíticas** reseñadas en varios estudios (Prados, 2004; Leveau, 2007; Entrena, 2005; Arroyo, 2001; Ferrás, 2007; Delgado, 2008, entre otros). Aunque el fenómeno puede responder a distintas

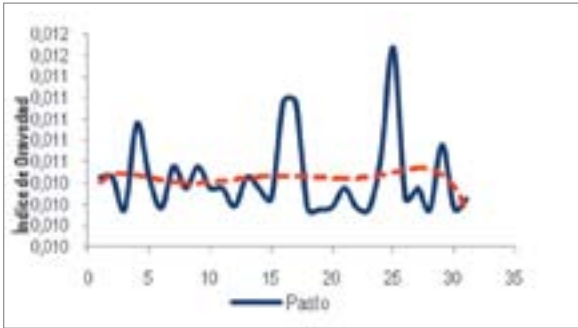
* Áreas caracterizadas por su localización periférica respecto de una ciudad con la cual mantienen un alto número de interrelaciones dinámicas, que combinan en su territorio y en un ambiente de ruralidad diferentes usos del suelo -especialmente residencial no densificado- y que tienen en sus entornos o de manera intercalada, diferentes tipos de coberturas vegetales (bosque natural, pastizales, frutales, ornamentales), nativas o introducidas.

** Especialmente con la teoría de la periurbanización, la suburbanización, la contraurbanización, la naturbanización y la urbanización difusa.

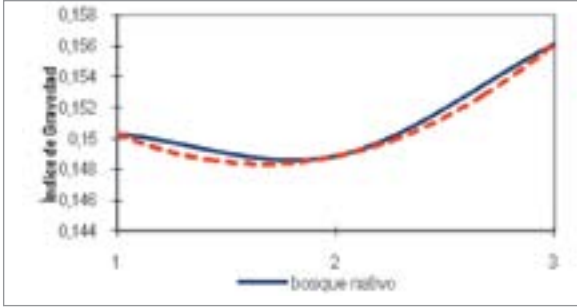
Gráfica 9. Índice de gravedad individual, tipo de cobertura, rastrojo. Periodo 2008 – 2009



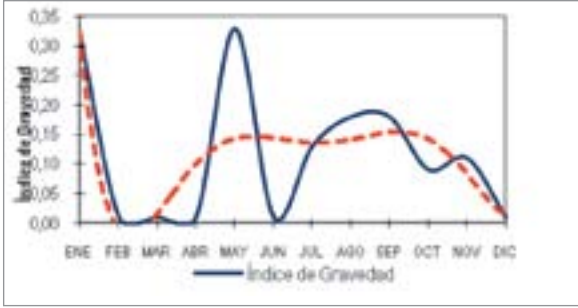
Gráfica 10. Índice de gravedad individual, tipo de cobertura, pasto. Periodo 2008 – 2009



Gráfica 11. Índice de gravedad individual, tipo de cobertura, bosque. Periodo 2008 – 2009



Gráfica 12. Dinámica del índice de gravedad anual para la totalidad de las coberturas vegetales. Periodo 2008 – 2009



Fuente: elaboración propia

- c) La ocupación, para prestación de servicios asociados al turismo local, de los corredores viales de Terrón Colorado- (Km. 18 de la vía al mar y Cali, monumento a Cristo Rey).
- d) Densificación predial por fragmentación y comercialización de los predios aledaños a las carreteras que conectan a Santiago de Cali con los distintos centros poblados rurales de la cuenca.
- e) Ocupación por particulares de los predios del municipio de Santiago de Cali.

Independientemente de las causas que dinamizan el desarrollo de las Interfaces Urbano-Rurales (I-UR), éstas generan una serie de fenómenos e impactos ambientales, entre los cuales se pueden citar los siguientes (Badia *et al.* 2010; Fahrig, 2003; Centro de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos, Habitat, 1996; Hardoy y Satterthwaite, 1984):

- a) Ocupación de áreas ecológicamente importantes como relictos de vegetación nativa o conectores de corredores biológicos.
- b) Ocupación de áreas ambientalmente críticas (cauces de inundación de ríos, terrenos inestables).
- c) Fragmentación de hábitats con la consecuente pérdida de biodiversidad debido a la extinción local de especies.
- d) Alteración en calidad y cantidad de la oferta hídrica para la ciudad por extracción de caudales y vertimiento de aguas residuales o residuos sólidos domiciliarios.

- e) Introducción de especies exóticas de flora y fauna, las cuales al competir más exitosamente con las especies nativas, terminan desplazándolas, lo cual incide negativamente en los procesos ecológicos en los que intervenían.
- f) Alteración de los atributos paisajísticos derivados de la vegetación y de otros de sus elementos.
- g) Incremento de la contaminación del aire urbano por arrastre de gases y material particulado producidos por la quema de material vegetal y otros materiales.

Otro de los problemas de mayor importancia que presentan las Interfaces Urbano-Rurales (I-UR) son los incendios de la cobertura vegetal (Caballero, 2000 y 2004; Caballero *et al.*, 2007; Nowak *et al.*, 2005; Kamp y Sampson, 2003; Haight *et al.*, 2004; Soares, 2007; Hammer *et al.*, 2007; Mell *et al.*, 2010), como los que ocurren de manera recurrente y con efectos catastróficos en Estados Unidos de Norte América (California, principalmente), Australia y en los países del Mediterráneo (Weise y Wotton, 2010). El fenómeno parece estar asociado a causas como las siguientes (Davis, 1990; Herrero, 2001; Zhai *et al.*, 2003; Ivandic, 2008; White y Zipperer, 2010):

- a) Incremento de la densidad de viviendas próximas a áreas con coberturas vegetales.
- b) Introducción de vegetación propensa al fuego, con predominancia ornamental arbustiva y herbácea y, con frecuencia, muy próxima a viviendas o estructuras.

- c) Empleo del fuego como una práctica cultural muy extendida para la eliminación de desechos agrícolas y domiciliarios.
- d) Acumulación de combustibles vegetales como consecuencia de la supresión del fuego natural en las áreas con coberturas vegetales próximas.
- e) Uso no cuidadoso del fuego por parte de visitantes ocasionales (fogatas, cigarrillos).
- f) Empleo de materiales inflamables en la construcción de viviendas y otros equipamientos complementarios.
- g) La ausencia o limitaciones de la normativa pública que reglamenta el uso del suelo en las IU-R.

En el contexto planteado la investigación buscó establecer la posible relación entre la dinámica del fuego y su localización periurbana, partiendo de la evidencia recopilada acerca de la naturaleza antrópica de los eventos. Para determinar si existían diferencias significativas en la dinámica del fuego (ICV y CICV) en los corregimientos y en el tiempo (Periodo 1999-2009) se realizó un análisis de varianza -con un nivel de significancia del 5% - para incendios y conatos, con el supuesto de que no hay diferencias en la información consignada y que no existen características heterogéneas entre los corregimientos o los años de análisis. De manera complementaria, se calculó el índice de frecuencia (Copete *et al.*, 2007), suavizando las frecuencias a una escala de cien hectáreas y considerando el tamaño tanto de las unidades territoriales trabajadas como la cantidad de eventos ocu-

rridos en ellas. La ecuación empleada para su cálculo es:

$$F_i = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a n_i \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

F_i : frecuencia de incendios.

a : número de años de la serie de datos utilizada (once años).

n_i : número de incendios en cada año de la serie referidos a cien hectáreas.

Con la finalidad de dimensionar la magnitud de los índices de frecuencia calculados para cada unidad territorial, se decidió establecer una escala de referencia calculando el índice respectivo para toda el área rural del municipio de Cali, el cual consideró los ICV y CICV ocurridos en todos los corregimientos. De acuerdo con el Anova realizado (Tablas 2 y 3), se encontró que hay diferencias significativas entre los corregimientos en cuanto a incendios (P-Valor = 3.19E-0.9) y conatos (P-valor = 2.14E-09) y que también lo son para los años de análisis en incendios (P-valor = 0.01), pero no significativas para los conatos (P-Valor es de 0.14). En cuanto al área afectada, se infiere que existen diferencias significativas entre los corregimientos (P-Valor = 0.0095) y conatos (P-valor = 4.90E-07); igualmente, las diferencias son significativas entre los años de análisis para incendios (P-valor = 0.04) y para conatos (P-Valor = 0.024). Los anteriores resultados muestran que sí existe una asociación entre los eventos

Tabla 2. Anova para incendios y conatos

ANÁLISIS PARA INCENDIOS						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Corregimientos	672.2545455	4	168.0636364	20.3870754	3.19989E-09	2.605974949
Años de análisis	223.5272727	10	22.35272727	2.71151301	0.012176316	2.077248046
Error	329.6454545	40	8.243636364			
Total	1225.527273	54				
ANÁLISIS PARA CONATOS						
Corregimientos	1087.745455	4	271.9363636	20.780132	2.48901E-09	2.605974949
Años de análisis	208.5454545	10	20.85454545	1.59360889	0.143914454	2.077248046
Error	523.4545455	40	13.08636364			
Total	1819.745455	54				

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Anova para el área afectada por los incendios y conatos

ANÁLISIS PARA INCENDIOS						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Corregimientos	19487.78836	4	4871.947091	3.8631929	0.009561339	2.605974949
Años de análisis	27291.76336	10	2729.176336	2.16409055	0.041212208	2.077248046
Error	50444.77164	40	1261.119291			
Total	97224.32336	54				
ANÁLISIS PARA CONATOS						
Corregimientos	14.22532667	4	3.556331667	13.4567634	4.90493E-07	
Años de análisis	6.353128625	10	0.635312863	2.4039532	0.024134549	2.605974949
Error	10.5711353	40	0.264278383			2.077248046
Total	31.14959059	54				

Fuente: elaboración propia.

del fuego (frecuencia y superficie afectada) a lo largo de los años estudiados y la proximidad de las áreas de ocurrencia al área urbana de la ciudad (Figura 3). El fenómeno anotado posiblemente se debe a la presión que ejercen los pobladores urbanos sin vivienda sobre el suelo de propiedad

pública y a las motivaciones señaladas por los habitantes de la cuenca (Tabla 7).

Los corregimientos más cercanos al perímetro urbano presentan mayor frecuencia de eventos (Los Andes y El Saladito) y en menor proporción Pichindé, La Leonera y Felidia, respectivamente (Tabla 4).

Tabla 4. Índice de frecuencia zona rural municipio de Santiago de Cali y de los corregimientos pertenecientes a la cuenca media río Cali.

Municipio de Cali	Rango	Categoría	Área de estudio	Corregimiento	I de F	Categoría
	≥ 0,186	Muy alto		LOS ANDES	0,21909	Muy alto
	0,134 - 0,185	Alto		PICHINDE	0,02	Muy bajo
	0,082 - 0,133	Medio		LA LEONERA	0,00545	Muy bajo
	0,031 - 0,081	Bajo		FELIDIA	0,02091	bajo
	≤ 0,03	Muy bajo		EL SALADITO	0,08091	Bajo

Fuente: elaboración propia.

La percepción comunitaria sobre el fuego de las coberturas vegetales

La mayor parte de los riesgos ambientales pueden considerarse en la actualidad como “constructos” sociales, ya que las personas potencian -con alguna lógica, motivación o interés- una condición, característica o proceso del medio natural, de un proceso productivo o de una práctica de uso de la naturaleza, hasta un nivel en el que se generan impactos negativos sobre los seres humanos, sus plataformas productivas y sobre los ecosistemas. Al considerar la naturaleza social de algunos riesgos ambientales no es posible entender su verdadero significado sino en el contexto de cada cultura* y de las ideas de sostenibilidad ambiental, social y económica que se tengan en dicho marco (García y Silió, 2000; Khzam, 2008).

Las ideas anteriormente planteadas llevan a pensar que no es posible una adecuada y efectiva gestión integral del riesgo ambiental sin el conocimiento de la percepción que tengan de él los sujetos y comunidades involucrados; es decir, es fundamental para establecer los modelos de decisión respecto a una problemática ambiental determinada a partir de un capital existente (construcciones cognitivas sobre el entorno y sus fenómenos, valoraciones y juicios individuales y grupales, evaluación empírica de alternativas para neutralizar, disminuir o eliminar conflictos ambientales) (Unesco-MAB, 1975).

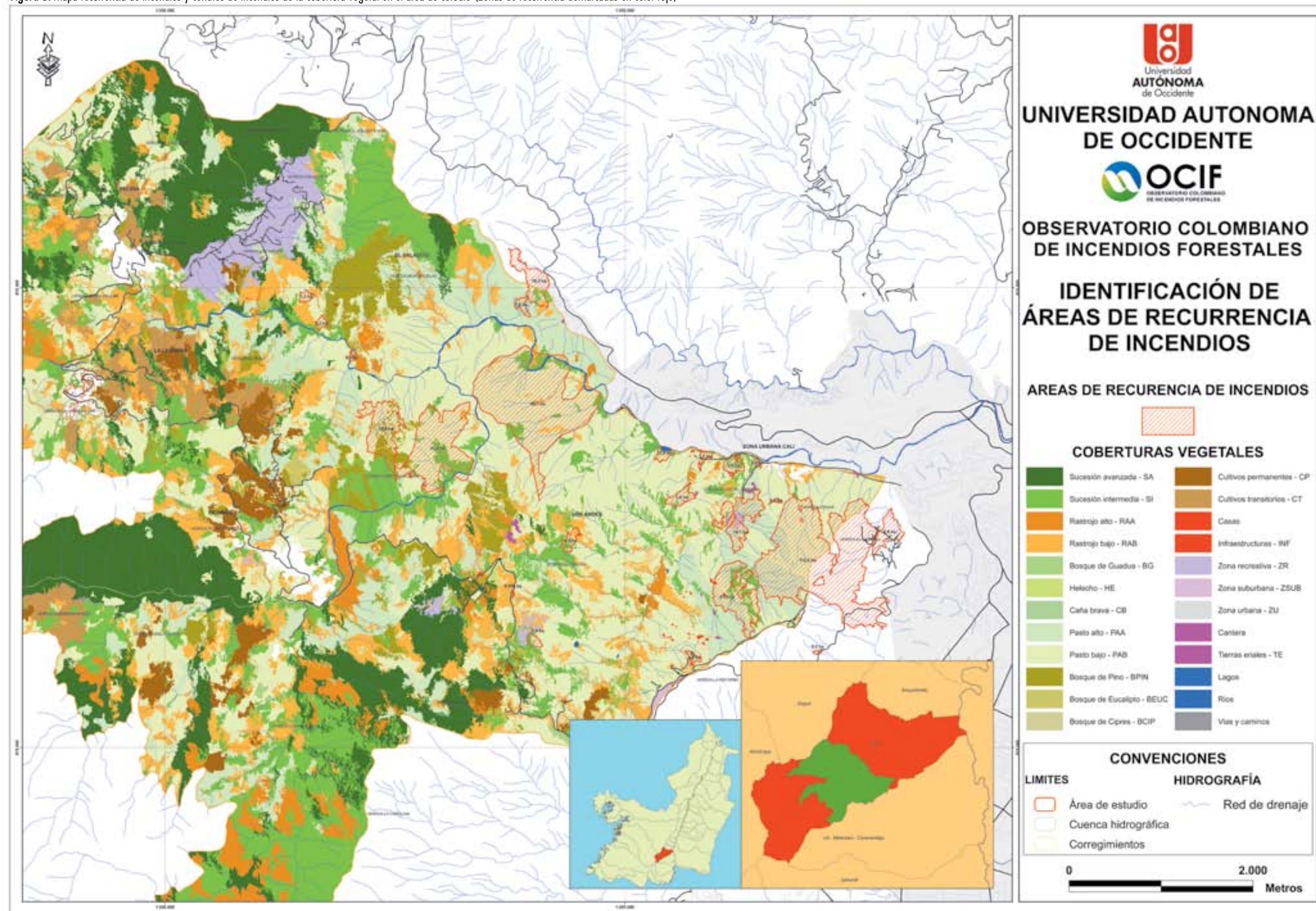
En cuanto a estudios de percepción en materia de incendios de la cobertura vegetal,

los existentes se centran fundamentalmente en el conocimiento de las posibles motivaciones explicativas (Apas, 2003; Apas & Idem, 2003; Barroso, *et al*, 2007; Dolz, 2005; Molinero *et al.*, 2008). Partiendo de la premisa de que no es posible obtener una visión integral del fenómeno de los incendios de la cobertura vegetal en Colombia, ni diseñar e implementar estrategias institucionales eficaces para su prevención si no se conoce la percepción de los habitantes del campo sobre esta problemática y sobre los posibles factores que pueden estar interviniendo en la configuración local de estos eventos, se desarrolló el presente estudio de carácter exploratorio en la cuenca del río Cali, con el objetivo de establecer en el contexto del imaginario de la población estudiada lo siguiente:

- El nivel de riesgo personal percibido frente a los ICV y CICV, el grado de importancia asignado en el conjunto de amenazas ambientales que enfrentan.
- El nivel de conocimiento sobre el fenómeno (régimen anual y su tendencia, probabilidad de ocurrencia y magnitud, características pirogénicas de la vegetación, causas e impactos potenciales).
- Las posibles motivaciones personales inductoras de conductas y prácticas no deseables relacionadas con los ICV y CICV, y sus implicaciones sociales.
- Las actitudes, conductas y prácticas proambientales de la población local relacionadas con los ICV y CICV.

* Por esta razón muchas de las percepciones del riesgo se ubica en una dimensión simbólica, complejas de intervenir.

Figura 3. Mapa recurrencia de incendios y conatos de incendios de la cobertura vegetal en el área de estudio (zonas de recurrencia demarcadas en color rojo)



Para lograr los objetivos planteados, a finales del año 2009 se encuestó* -mediante un muestreo estratificado** - a 960 jefes de hogar de la zona de estudio***, por considerar que son quienes potencialmente poseen un mayor conocimiento sobre el fuego de coberturas vegetales en la región.

Algunos de los resultados obtenidos por la encuesta utilizada (Anexo 1) fueron:

a) Los eventos de fuego (ICV y CICV) son reconocidos, en el conjunto de riesgos naturales percibidos, como el segundo en importancia (18.6%) (Tabla 5), y se presenta una correspondencia entre la importancia asignada y las entidades con mayor dinámica (*Los Andes*, *El Saladito* y *Felidia*).

Tabla 5. Importancia relativa de los riesgos naturales en la zona de estudio

Corregimiento	Tipo de fenómenos percibidos como riesgos (%)			
	Deslizamiento de tierra	Incendios de c.v.	Inundaciones	Otros
Felidia	63,8	19,7	9,2	7,3
La Leonera	85,1	8,8	1,7	4,4
Los Andes	62,0	32,2	1,2	4,7
Pichindé	85,9	4,9	0,0	9,2
El Saladito	76,0	18,2	4,5	1,3
TOTAL	72,6	18,6	3,5	5,3

Fuente: elaboración propia.

- b) La preocupación que el fenómeno del fuego genera en la población de la zona de estudio, es alta (81,4%), aun en corregimientos en donde es menos frecuente.
- c) Se identifican como principales causas del fenómeno las de origen humano (78.9%), entre las cuales se destacan la negligencia, la imprudencia o el descuido como las más representativas (54.4%), excepto para el corregimiento de Pichindé en donde las causas naturales tienen una mayor significancia (65.5%) (Tabla 6).
- d) Entre las motivaciones aducidas para provocar ICV y CICV, se establece que las clasificables como de orden cultural son las dominantes (55,6%) y las de naturaleza económica las menos importantes (Tabla 7, Figura 4).

Tabla 6. Posibles causas generadoras de incendios y conatos de incendios de las coberturas vegetales según la percepción de la población estudiada

Corregimiento	Posibles causas generadoras de ICV y CICV (%)					
	Causas naturales	Negligencia, imprudencia o descuido	Accidentes	Intencional	Otra	No Sabe
Felidia	10,55	48,62	12,39	18,35	2,29	7,80
La Leonera	1,66	60,77	2,21	32,04	2,76	0,55
Los Andes	8,08	66,15	1,92	22,31	0,77	0,77
Pichinde	65,49	28,17	4,23	2,11	0,00	0,00
El Saladito	11,69	59,74	4,55	16,88	1,30	5,84
TOTAL	16,50	54,40	5,10	19,40	1,47	3,04

Fuente: elaboración propia.

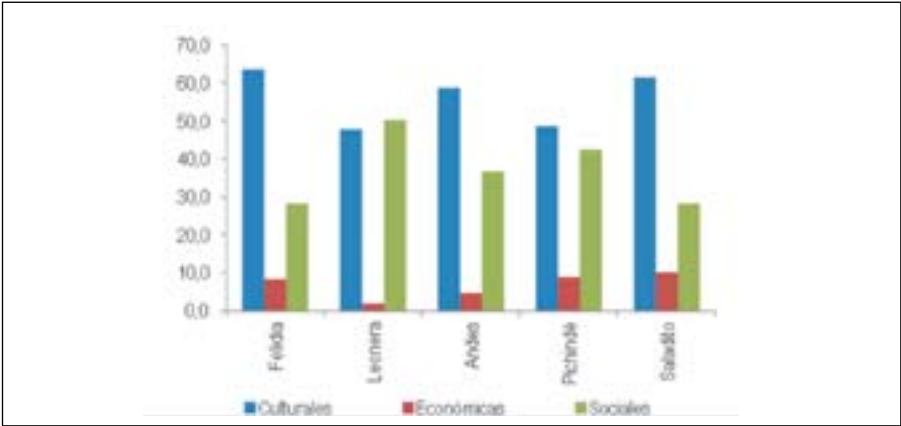
Tabla 7. Motivaciones reportadas como posibles inductoras del fuego de las coberturas vegetales en la zona de estudio

Corregimiento	Categorías de motivaciones reportadas para la generación de ICV y CICV		
	Culturales (%)	Económicas (%)	Sociales (%)
Felidia	63,5 (15,6)	8,3 (19,5)	28,1 (9,9)
La Leonera	47,8 (19,4)	1,9 (7,3)	50,3 (29,4)
Los Andes	58,7 (38,8)	4,6 (29,3)	36,7 (34,9)
Pichindé	48,7 (14,0)	8,8 (24,4)	42,5 (17,6)
El Saladito	61,5 (12,2)	10,3 (19,5)	28,2 (8,1)
% totales	(55,6)	(5,8)	(38,6)
Conductas, actitudes o razones aparentes para propiciar el fuego	•Vandalismo y piromanía. • Ritos pseudoreligiosos. • Animadversión a plantaciones forestales. • Contemplar labores de combate del fuego. • Ahuyentar o eliminar animales peligrosos (víboras, alacranes).	• Revigorización de pastizales. • Eliminación de malezas en campos agrícolas. • Facilitar la invasión de predios del Municipio • Reafirmar la posesión de predios invadidos. • Facilitar el cambio de uso del suelo. • Facilitar o justificar la extracción de madera y leña de predios públicos. • Obtener trabajo en tareas de restauración. • Atraer los bomberos con el fin de atacarlos.	• Venganza o resentimiento contra las autoridades ambientales. • Venganzas personales o familiares. • Crear alarma ambiental como mecanismo de oposición a las autoridades locales. • Propiciar el fracaso de planes o acciones de reforestación. • Forzar a las autoridades al establecimiento de convenios o acuerdos con las comunidades locales.

Los valores sin paréntesis corresponden a los porcentajes de causas percibidas por corregimiento , y los que se encuentran dentro de ellos hacen referencia a los porcentajes percibidos por corregimiento dentro de cada tipo de causa.

Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Distribución porcentual de las categorías de causas inductoras de ICV y CICV por corregimiento



Fuente: elaboración propia.

* Esta encuesta fue diseñada con base en las diferentes variables utilizadas en estudios similares (Apas & Idem, 2003; Franco y Dolz Reus, 2006; IESA, 2006) y las consideradas por el equipo investigador. Su validación inicial se hizo entre varios expertos en el tema y mediante su aplicación a un grupo de cien personas cabezas de familia residentes en la zona de estudio.

** $Z_a^2 = 1.96^2$ (seguridad del 95%); precisión: 5%.

*** Para la consolidación de un universo confiable en los corregimiento se utilizó la información sobre la población proyectada por el Departamento Administrativo de Planeación del municipio de Cali para efectos del régimen subsidiado de salud (Sisben), la cual fue complementada con las proyecciones hechas, en algunos casos, por el equipo investigador del presente proyecto a partir de información reportada en los mapas sociales elaborados por la Administración Municipal para los diferentes corregimientos (Alcaldía de Santiago de Cali, 2005).

- e) Los impactos ocasionados por los ICV y CICV, según la percepción de los encuestados, son fundamentalmente de carácter ecológico-ambiental (71.6 %). Vale la pena señalar que se destacan los impactos sobre la salud y la vida humana (16.8%), por encima de los impactos económicos (9%) (Cuadro 2).

f) En cuanto al régimen temporal de ICV y CICV, los encuestados de todos los corregimientos reconocen que el trimestre julio-septiembre es el de mayor ocurrencia (71.3%). Aunque manifiestan que durante todo el año se presentan estos eventos, la percepción coincide con el patrón documentado.

g) Respecto a los factores que pueden incidir en la tendencia futura del fenómeno, conciben que el comunitario (personas que viven o visitan la cuenca) es el de más peso en su incremento (76,6%) y el

institucional, en su disminución (41%). Al factor climático se le asigna muy poca influencia en la tendencia anotada.

h) El conocimiento que manifiestan tener para prevenir el fuego es relativamente alto (78.4%), adquirido fundamentalmente a partir de su propia experiencia (58.8%) y, secundariamente, a partir de capacitaciones (38%). Se destaca el alto interés (91%) por conocer los diferentes aspectos relacionados con el fenómeno (prevención, manejo y restauración).

i) La gestión que desarrollan las instituciones públicas del sector ambiental en la prevención del fuego solo es reconocida como ‘buena’ por los encuestados en un 33.6%, y un 45.3% manifiesta ‘no conocerla’.

j) Acerca de las actividades de educación ambiental conocidas y desarrolladas por las instituciones responsables de gestión

de la cuenca hidrográfica, el 55.6% de los encuestados las valora como ‘de utilidad’.

Conclusiones generales y recomendaciones

- a) La dinámica espacial y temporal de los eventos del fuego de las coberturas vegetales en la cuenca del río Cali, si bien están consideradas por factores climáticos, presenta una estrecha relación con otros factores como la cercanía de la zona al área urbana, debido posiblemente a las presiones existentes sobre el suelo de propiedad del Estado por los pobladores urbanos sin vivienda. Aunque el fuego muestra una tendencia a la baja en el periodo estudiado, se observa que el área afectada por los incendios tiende a incrementarse.
- b) El patrón espacial y temporal del fuego caracterizado, entre otros aspectos, por una amplia recurrencia, impide el desarrollo de los procesos de sucesión natural, facilita la expansión territorial de gramíneas, y produce simultáneamente dos fenómenos: la homogenización y el empobrecimiento del paisaje -con un efecto claro en cuanto a la desaparición del estrato arbóreo- y el incremento del riesgo de incendios en estas áreas por la invasión de herbáceas de carácter pirófitas y heliófilas. A lo anterior se añade la situación de ser un territorio no regulado ya que tanto la autoridad ambiental departamental como la urbana no la consideran dentro de su respectiva jurisdicción.
- c) Los impactos producidos por el fuego son más de carácter ecológico que am-

- biental, si se considera que la descarga de gases invernadero no tiene una relación significativa con el tamaño de las áreas afectadas y de la biomasa quemada, pero sí afectan fragmentos de vegetación que sirven de “conectores” a los corredores biológicos utilizados por algunas especies que realizan migraciones altitudinales entre el valle geográfico del río Cauca y los Farallones de Cali.
- d) La cuenca del río Cali, a pesar de su importancia ecológica, ambiental y social, no es objeto de preocupación desde el punto de vista del fuego por las autoridades ambientales y territoriales. Tal parece que es un fenómeno subvalorado en relación con sus impactos o que existe un sobredimensionamiento de la capacidad del sistema natural para atenuarlos.
- e) Los pobladores de la cuenca poseen un buen nivel de conocimiento sobre el fuego que ocurre en las distintas coberturas vegetales del área, al igual que sobre sus posibles causas e impactos. Así mismo, reconocen el papel que cumplen en su dinámica y la importancia de capacitarse para prevenirlo y combatirlo, y cuestionan el papel desempeñado por las autoridades ambientales responsables de la gestión del fuego en la cuenca por su baja efectividad.
- f) En general la parte media de la cuenca manifiesta las tensiones propias de una interfase urbano-rural, con el agravante de ser un territorio que carece de un proyecto de desarrollo en el que converjan los objetivos y las actuaciones de las diferentes agencias del Estado, los intereses

Cuadro 2. Receptores de los impactos ocasionados por el fuego según lo percibido por la población encuestada

Corregimiento		Receptores de impacto (%)								% Total por categoría de impacto	
		Flora y fauna	Suelo	Fuentes de agua	Atmósfera	Cultivos	Vivienda	Animales domésticos	Salud y vda humana		Otros
Felidia		39,6	10,6	18,0	4,1	3,2	1,4	0,5	11,1		11,5
La Leonera		47,5	6,6	32,0	0,6	0,6	2,2	10,5	0,0		0,0
Los Andes		38,4	7,0	11,6	1,6	0,8	0,8	3,9	36,0		0,0
Pichindé		54,9	8,5	4,2	1,4	1,4	0,7	5,6	23,2		0,0
EL Saladito		37,6	18,1	18,1	3,4	1,3	2,0	13,4	6,0		0,0
TOTAL		42,8	9,7	16,9	2,2	1,5	1,4	6,1	16,8		2,6
Clase de impactos	Ecologico ambientales	●	●	●	●						71.6
	Económicos					●	●	●			9
	Humanos								●		16.8

Fuente: elaboración propia.

de sus pobladores y los objetivos de conservación necesarios. El panorama planteado representa un alto riesgo ambiental por causas antrópicas, y los eventos de fuego son una de sus manifestaciones más frecuentes.

- g) La combinación de las coberturas vegetales altamente combustibles y las crecientes presiones humanas ejercidas sobre la cuenca, permiten configurar un escenario de alto riesgo al fuego que debería ser objeto de atención especial por las instituciones encargadas de la gestión ambiental y territorial, las comunidades y los demás actores relacionados con el desarrollo sostenible de la cuenca.

Finalmente se recomienda:

- Una acción interinstitucional que defina con las comunidades de la zona, un proyecto de desarrollo para la cuenca con criterios de sustentabilidad ambiental, social e institucional.
- El dominio efectivo de los terrenos públicos, especialmente municipales, por parte de las instituciones o agencias correspondientes.
- El desarrollo de proyectos de reconversión de pastizales a plantaciones de doble propósito técnicamente manejadas, las cuales incluso podrían ser negociadas como sumideros de carbono.
- Profundizar el nivel de conocimiento del fuego para establecer sus tendencias en escenarios de cambio climático.
- Diseñar modelos silvícolas para la reforestación de las áreas degradadas por la

recurrencia del fuego basadas en especies resistentes al fuego.

- Desarrollar proyectos de turismo de bajo impacto que potencien la cuenca como destino local y regional.

Bibliografía

Alcaldía de Santiago de Cali. 1999.- 2005. Caracterización social del corregimiento de Los Andes, Pichindé, La Leonera, Felidia y El Saladito.

Álvarez-Saa, G; A. F., Giraldo (2010). Determinación de la biodiversidad vegetal existente en 11 coberturas vegetales en la cuenca media del río Cali. En: Parra, A.; Montoya J.D. y Bernal, F.

Arroyo, M., (2001). "La contraurbanización: un debate metodológico y conceptual sobre la dinámica de las áreas metropolitanas". Papeles de Población México. Número 30: 93-129.

Asociación para la promoción de actividades socioculturales (APAS). (2003). Estudio sociológico sobre la percepción de la población española hacia los incendios forestales. [en línea]. España: APAS, 2003 [citado 31 ene 2009]. Disponible en internet: <http://www.idem21.com/descargas/pdfs/IncendiosForestales.pdf>.

Asociación para la promoción de actividades socioculturales (APAS). Estado del conocimiento sobre las causas de los incendios forestales en España. [en línea]. España: APAS, 2006 [citado en 14 diciembre 2009]. Disponible en In-

ternet: www.idem21.com/descargas/pdfs/CAUSAS_IF.pdf.

Badia, A., Antoni, F., Ana V. (2010). "Los incendios en zonas de interface urbano forestal. La integración de nuevos elementos en el diseño de la prevención". Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales. [En línea]. Barcelona: Universidad de Barcelona, 1 de agosto de 2010, vol. 14, n° 331 (60). <<http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-331/sn-331-60.htm>>. [ISSN: 1138-9788].

Barroso, J., Martín, J., y Pérez, D. "Utilidad de la investigación de causas en la prevención de incendios forestales". En: IV Encuentro Internacional sobre Incendios Forestales (14-17, mayo: Sevilla, España). Memorias. Sevilla: Wildfire, 2007.

Buitrago, O., (2006) "Planificación de cuencas hidrográficas. Algunos principios básicos. Caso de la cuenca del Río Cali". Departamento de Geografía, Universidad del Valle, Cali. Revista Entorno Geográfico, 4. <http://entornogeografico.univalle.edu.co/numero4.htm>.

Caballero, D. (2000). Wildland-Urban Interface Fire Risk Management: WARM project. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-208. 2000.

Caballero, D., Beltrán, I., Velasco, A. (2007). Forest fires and wildland urban interface in Spain: Types and risk distribution. Wildfire 2007. [En línea]. <http://www.davidcaballero.com/>

[publications/20070517_Caballero_WUI_Spain.pdf](http://www.davidcaballero.com/publications/20070517_Caballero_WUI_Spain.pdf)>.

Caballero, D. (2004) Conclusions of the Third WARM workshop on forest fires in the wildland-urban Interface in Europe. Madrid, Spain, 26-27th of May.

Centro de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos, Hábitat. (1996). Un mundo en proceso de urbanización. Capítulo 4. Condiciones y tendencias ambientales. TM Editores/ INURBE/Fondo Nacional del Ahorro. Tomo I: 267-333.

Carvajal, Y.; H., Jiménez y H. Materón. (s. f.). Incidencia del fenómeno del Niño en la Hidroclimatología del Valle del Río Cauca – Colombia.

Cochrane, M.; A. Alencar; M. Schulze; C. Souza; D. Nepstad; P. Lefebvre; E. Davidson. (1999). Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forest. Science, 284: 1832-1835.

Cochrane, M. (2009). Fire, land use, land cover dynamics, and climate change in the Brazilian Amazon. En: Cochrane, M. (editor). Tropical Fire Ecology. Springer/Praxis, Berlin. 389-426.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2009). Dirección Técnica Ambiental, Grupo de Sistemas de Información Ambiental, Red Hidroclimática. Boletín Hidroclimático año 2009.

Corporación Fondo de Solidaridad, (2006). Mapas de riesgo, amenaza, vulnerabilidad, daño potencial, prioridad de

- protección frente a incendios forestales. Convenio 120 de 2006 CVC-CFS.
- Copete, M.; J. Monreal; M. Selva; L. Fernández-Cernuda; E. Jordán (2007). Análisis de los incendios forestales en Castilla-La Mancha. Detección de áreas potencialmente peligrosas. Wildfire2007. Sevilla, España.
- Davis, J.B. (1990). The wildland-urban interface: paradise or battleground? *Journal of Forestry*, 88(1): 26-31.
- Dolz, M., Análisis de la percepción de la sociedad ante el problema de los incendios forestales. Resultado y metodología. En: Curso de Verano Paisaje, Sociedad y Defensa contra los Incendios Forestales (15-19, agosto: España). Documento. España: Universidad Internacional de Andalucía, 2005.
- Delgado, J., (2008). La urbanización difusa de la Ciudad de México. Otras miradas sobre un espacio antiguo (Coord). Colección: Geografía para el siglo XXI, Serie: Libros de Investigación, núm. 2, Instituto de Geografía, UNAM, México, 206.
- Departamento Administrativo de Planeación, (2009). Cali en cifras 2009. Alcaldía de Santiago de Cali. p. 9. Documento en línea: http://Planeacion.Cali.gov.co/publicaciones/Cali_en_Cifras/Calien-cifras2009.pdf. Consultado 23-12-210.
- Entrena, F., (2005). Procesos de periurbanización y cambios en los modelos de ciudad. Un estudio europeo de casos sobre sus causas y consecuencias. *Papers* 78, 59-88.
- Ferrás, C., (2007). El enigma de la contraurbanización. Fenómeno empírico y concepto caótico. *Revista Eure* (Chile), vol. 33, 98: 5-25.
- Ferreira, A.; P. Vilaça (1992). The relationship of forest FIRE to agro-forestry and socio-economic parameter in Portugal. *International Journal Wildland Fire*, 2(1): 37-40.
- Fulé, P.; W. Covington (1999). Fire regimens changes in La Michilía Biosphere Reserve, Durango, Mexico. *Conservation Biology*, 13(3): 640-652.
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematic* 34:487-515.
- García. L.C. y F. Silió. Riesgos naturales en los andes: cambio ambiental, percepción y sostenibilidad. En: Boletín de la A.G.E, 2000. no. 30 69-84.
- Haltenhoff, H., (1995). Programa de Prevención y control de Incendios Forestales. Santiago de Cali.
- Hammer, R.; C, V.C. Radeloff; J.S. Fried; S.I. Stewart (2007). Wildland-urban interface housing growth during the 1990s in California, Oregon, and Washington. *International Journal of Wildland Fire*, 16, 255-265.
- Hardoy, J. y D. Satterthwaite (1984). Third World Cities and the Environment of Poverty. *Geoforum*, 15(3): 307-333.
- Haight, R.;D. Cleland; R.B. Hammer; V.C. Radeloff; T. Scott (2004). Assessing Fire Risk in the Wildland-Urban Interface. *Journal of Forestry*, Volume 102, Number 7: 41-48.
- Hernández, O. (2009). Los incendios forestales en la Región III Texcoco, Estado de México durante el periodo 2005-2009. Tesis profesional División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Chapingo, México, 65.
- Herrero, G. (2009). Análisis Regional de la Interfaz Urbano-Forestal en la Gestión del Riesgo de Incendio en España. En: Memorias del Tercer Simposio Internacional Sobre Economía, Planificación, y Políticas de los Incendios Forestales: Problemas y Enfoques Comunes. Departamento de Agricultura de los EE.UU., Servicio Forestal Estación de Investigación del Pacífico Suroeste Albany, California Informe Técnico General PSW-GTR-227 Informe Técnico General PSW-GTR-227, 265-276.
- Hoffman, A.; Parry, J-E.; C. Cuambe; D. Kwesha; W. Zhakata (2009). Climate change and wildland fires in Monzambique. En: Cochrane, M. (editor). *Tropical Fire Ecology*. Springer/Praxis, Berlin. 227-259.
- Instituto de Estudios Sociales Avanzados de Andalucía (2006). Percepción Social de los Incendios Forestales En Andalucía. Consejo Superior de Investigaciones Científicas / Junta de Andalucía (España). 46.
- Ivandic, F. (2008). Incendios forestales en la interfase urbano rural: un desafío actual. *Presencia* (Chile), 52: 40-45.
- Kamp, M., Sampson, N. Using GIS to identify potential wildland-urban interface areas based on population density. Technical report with recommendations to agencies, 2003. http://www.sampsongroup.com/Papers/wui_paper.pdf.
- Khzam, E., La percepción ambiental como significación del paisaje: implicancias teóricas desde la relación del ser humano y el entorno [en línea]. Madrid, España: Universidad de Alcalá, 2008. [citado 18 febrero 2009]. Disponible en Internet: < http://ambiente-total.ucentral.cl/pdf/at1_percepcion.pdf>.
- Leveau, C.M., (2007). ¿Contraurbanización en Argentina? Una aproximación a varias escalas con base en datos censales del periodo 1991-2001. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, Núm. 69: 85-95*.
- Mckenzie, D. (2004). La historia del fuego y su relación con el clima. En: Villers, L. y J.L. Blanco (editores). *Incendios Forestales en México. Métodos de Evaluación*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera, México, D.F. 13-28.
- Mell, W.E; S.L. Manzello; A. Maranghides; D. Butry; R.G. Rehm (2010). The wildland-urban interface fire problem – current approaches and research needs. *International Journal of Wildland Fire*, 19, 238-251.
- Messina, J.; L.D. Cochrane (2007). The forest are bleeding: How land use change is creating a new FIRE regime in the

Ecuadorian Amazon. Journal of Latin American Geography, 6: 85-100.

Molinero, F., A. Garcia, C. Cascos, *et al.* La percepción local de los incendios forestales y sus motivaciones en Castilla y León. Revista cuatrimestral de geografía [en línea], Mayo – Agosto 2008 [citado en 29 diciembre 2008]. Disponible en Internet: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?tipo_búsqueda=CODIGO&clave_revista=509>. ISSN 0211-0563.

Nowak, D.J., Walton J.T., Dwyer J.F., Kayo L.G., Myeong S. (2005). The increasing influence urban environments on US forest management. Journal of forestry, vol. 103 (8): 377-382.

Prados M.J., (2004). Territorial recognition and the control of changes and dynamic rural areas. Analysis of naturbanisation process in Andalucía-Spain”, en Journal of Environmental management and plannig-special issue vol. 48, 1.

Soares, P.R.R., (2007). La investigación sobre la urbanización dispersa en Brasil. Biblio 3W Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales, Universidad de Barcelona, vol.12, 721. <http://www.ub.es/geocrit/b3w-721.htm>. Consultado 12 diciembre 2009.

Stewart et al. 2007. Stewart, S.I., Radeloff V.C., Hammer, R.B., Hawbaker, T.J., (2007). “Defining the Wildland–urban Interface”. Journal of Forestry. 105:201-207.

UNESCO-MAB. Percepción de la calidad del medio. Cuarta reunión del Consejo Internacional de coordinación del Programa sobre el Hombre y la Biósfera. Informe sobre la marcha del proyecto No.13., Paris: UNESCO, 1975. Documento de distribución limitada SC-75/CONF-218/COL.6.

Villers Ruiz, L. Hernández Lozano, J. (2007). Incendios forestales y el fenómeno de El Niño en México. Wildfire. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Weise, D.R. and B.M. Wotton. (2010). Wildland–urban interface fire behavior and fire modelling in live fuels. International Journal of Wildland Fire, 19, 149–152.

White, R.H and W.C. Zipperer. (2010). Testing and classification of individual plants for fire behaviour: plant selection for the wildland–urban interface. International Journal of Wildland Fire, 19, 213–227.

Zhai, Y.; Munn, I.A.; Evans, D.L. (2003). Modeling forest fire probabilities in the south central United States using FIA data. Southern Journal of Applied Forestry. 27(1): 11-17.

Uhl, C.; J.B. Kauffman (1990). Deforestation, fire susceptibility, and potential fire tree responses to fire in the eastern Amazon. Ecology, 71(2): 437-449.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE

GRUPO DE ESTUDIOS AMBIENTALES PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

Programa de investigación sobre incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal

Percepción del riesgo

Fecha: _____ de _____ de 2008

Datos generales

Nombre: _____

Edad (años): _____

Género: 1 (M) ☐ 2 (F) ☐

Nivel de escolaridad: _____

Nombre del Predio: _____

Vereda: _____

Tiempo de residencia en el Sector (años): _____

¿Reside dentro de un núcleo urbano?: 1(Si) _____ 2(No) _____

¿Es propietario de algún predio en la Cuenca? ☐

¿Cuánto paga en promedio al mes por el servicio de energía? \$ _____

CUESTIONARIO

1. ¿De los siguientes, cuál es el principal riesgo natural existente en la Cuenca?

a) Deslizamiento de tierra ☐

b) Incendios y conatos de incendios de Cobertura Vegetal ☐

c) Inundaciones ☐

d) Otro ☐ ¿Cuál? _____
2. ¿Qué tan familiarizado está con los incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal?

a) Mucho ☐ Continúe en 3.

b) Nada o Poco ☐ Continúe en 4. ☐
3. ¿Esto se debe mayormente a que:

a) Ha recibido capacitación sobre la manera de prevenirlos y/o combatirlos: ☐

b) Ha participado en su combate ☐

c) Ha convivido con ellos durante mucho tiempo ☐

d) Se ha preocupado por informarse sobre ellos ☐

c) Otro ☐ ¿Cuál? _____

4. ¿Qué tanto le preocupan los incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal que ocurren en la Cuenca?:

- a) Mucho ☐ b) Poco o Nada ☐

5. ¿Cuál es, en su opinión, la principal causa de los incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal en la Cuenca del Río Cali?

- a) Causas naturales (rayos, etc.) Continúe en 7.
- b) Negligencia, imprudencia o descuido (fumadores, quema de basuras, quemas agrícolas, etc.) ☐ Continúe en 7.
- c) Accidentes (por líneas eléctricas, maniobras militares, etc.) ☐ Continúe en 7.
- d) Intencional ☐ Continúe en 6.
- e) Otra. ☐ ¿Cuál? _____ Continúe en 7.
- f) No sabe ☐ Continúe en 7.

6. Si los incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal que suceden en la cuenca son producidos intencionalmente, ¿cuál cree usted que sean las TRES principales motivaciones de las personas para originarlo?

- a) Vandalismo ☐
- b) Piromanía, es decir, por el simple placer de producir y ver el incendio ☐
- c) Ritos religiosos o satánicos ☐
- d) Venganza o resentimiento contra las autoridades ambientales ☐
- e) Venganzas personales o familiares ☐
- f) Animadversión a las plantaciones forestales o a las especies exóticas ☐
- g) Contemplar las labores de extinción ☐
- h) Crear alarma social como mecanismo de oposición a autoridades locales ☐
- i) Ahuyentar o eliminar animales peligrosos (víboras, alacranes, etc.) ☐
- j) Revigorización de pastizales (eliminación de malezas, rebrote del pasto, etc.) ☐
- k) Facilitar la invasión de predios del Estado ☐
- l) Reafirmar, por parte de invasores, la posesión de predios invadidos al Estado ☐
- m) Cambiar el uso del suelo, por ejemplo, de forestal a ganadero o agrícola ☐
- n) Propiciar el fracaso de planes o programas de reforestación desarrollados en la cuenca con fines conservacionistas ☐
- o) Explotar madera u otros productos del bosque ubicados en áreas protegidas ☐
- p) Para atraer a los bomberos y otras personas con el fin de atracarlos ☐
- q) Obtener trabajo en labores de restauración ☐

- r) Forzar a las autoridades al establecimiento de convenios o acuerdos de protección ambiental con las organizaciones comunitarias locales ☐
- s) Otro ☐ ¿Cuál? _____

7. Según usted, ¿Cuál es el principal receptor de los impactos que generan los incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal en la Cuenca del Río Cali? (señale solo uno):

- a) La flora ☐
- b) La fauna ☐
- c) El suelo ☐
- d) Las fuentes de agua (desección de nacimientos, etc.) ☐
- e) El clima (incremento de la temperatura local, etc.) ☐
- f) Los cultivos ☐
- g) Las construcciones (viviendas, establos, bodegas, etc.) ☐
- h) Los animales domésticos (ganado, aves de corral, etc.) ☐
- i) Las personas (salud, vida) ☐
- j) Otro ☐ ¿Cuál? _____

8. ¿Según usted, los incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal que ocurren en la Cuenca generan algún tipo de beneficios?

- a) No ☐ Continúe en 10. b) Si ☐ ¿Cuáles? _____

9. ¿A quiénes cree Usted que benefician los incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal en la Cuenca?

- a) A los agricultores b) A los ganaderos ☐ c) A los invasores de predios ☐
- d) A los políticos locales ☐ e) A otros. ☐
- ¿Quiénes?: _____

10. ¿Usted se considera afectado de alguna manera cuando ocurre un ICV en la Cuenca?

- No ☐ b) Si ☐
- ¿En qué?: _____

11. ¿Durante qué época del año, según usted, existe una MAYOR probabilidad de que se presenten incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal en esta Cuenca:

- a) Enero-marzo ☐ b) Abril-junio ☐ c) Julio-septiembre ☐
- d) Octubre-diciembre ☐

12. ¿Según Usted, la probabilidad de que ocurra un incendio o conato de incendio de cobertura vegetal cerca de su residencia, es:

- a) Alta ☐

 b) Nula ☐

¿Por qué?_____

13. ¿Sabría qué hacer en el caso de que se presentase un incendio forestal cerca de su residencia?

- a) No ☐

 b) Si ☐

¿Qué haría? _____

14. ¿Según usted, cuál es la vegetación más propensa a sufrir incendios forestales:

- a) Pastizales ☐

 b) Bosque natural ☐

 c) Rastrojos ☐
 c) Plantaciones de pinos o eucaliptos ☐

 d) Cultivos ☐

 e) Otra. ☐

¿Cuál?: _____

15. ¿Según usted, los incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal en la Cuenca del Río Cali durante los últimos cinco años se han incrementado o disminuido? (Pregunta solo para aquellos que lleven más de cinco años residiendo en la Cuenca):

- a) Incremento ☐

 b) Disminución ☐

¿Por qué? _____

16. ¿Considera que es posible llegar a una situación en donde no ocurran incendios forestales en la Cuenca?:

- a) No ☐

 b) Si ☐

¿Por qué?_____

17. ¿Qué tanto sabe sobre la manera de prevenir los incendios forestales?

- a) Nada ☐

 Poco ☐ Continúe en 19.
 b) Mucho ☐ Continúe en 18.

18. Lo que sabe, lo ha aprendido en:

- a) Campañas de capacitación de alguna institución del Gobierno ☐
 b) Campañas de Capacitación de alguna ONG (Fundación, etc.) ☐
 c) Por sus propios medios y experiencia ☐
 d) Otro ☐ ¿Cuál?_____

19. ¿Desearía conocer más sobre los incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal?

- a) No ☐ ¿Por qué? _____
 b) Si ☐ ¿Por qué? _____

20. ¿Sabe si provocar incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal tiene algún tipo de sanción policial o judicial?

- a) No ☐ Continúe en 21.
 b) Si ☐ Continúe en 22.

21. ¿Debería tenerlo?

- a) No ☐ ¿Por qué? Pase a 23
 b) Si ☐ ¿Por qué? Pase a 23

22. Conoce de alguien que haya sido sancionado por las autoridades por provocar incendios forestales?

- a) No ☐

 b) Si ☐

23. ¿Según Usted, de quiénes es la responsabilidad de prevenir los incendios?

- a) Del Gobierno ☐

 b) De las comunidades ☐

 c) De nadie ☐
 d) De todos ☐

 e) Otra ☐
 ¿Cuál?_____

25. ¿Cómo calificaría la gestión que hacen las autoridades ambientales en la prevención de los incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal en la Cuenca?

- a) Mala ☐

 c) Buena ☐

 e) No tiene la suficiente información para calificarla ☐

26. ¿Considera usted que las campañas de educación ambiental y de información desarrolladas por las autoridades ambientales para la prevención de incendios y conatos de incendios de cobertura vegetal en la cuenca son útiles?

- a) Si ☐

 b) No ☐
 ¿Por qué?_____

Anexo 1. Índices de gravedad propuestos

El índice propuesto permite establecer la gravedad para cada evento (*índice de gravedad individual*), la *gravedad acumulada* para un tipo de cobertura vegetal en una serie de tiempo y la *gravedad total* para una unidad geográfica determinada.

Las expresiones para el cálculo de los índices planteados, son:

a) Índice de gravedad individual (IGI):

$$\frac{\%superficie\afectada\ de\ la\ cobertura\ vegetal\ referencia\ \times\ Grado\ de\ impor\ tancia}{Superficie\ promedio\ de\ fragmentos\ de\ la\ cobertura\ vegetal\ referencia}$$

$$IGI = \frac{I}{S_f} \sum \left(\frac{S_Q}{S_{CVR}} \times 100 \right) \times IE \tag{Ecuación (2)}$$

Donde:

IGI: índice de Importancia Individual del ICV o CICV.

S_f: superficie promedio de los fragmentos de la cobertura vegetal afectada por el fuego.

S_Q: superficie quemada.

S_{CVR}: superficie total de la cobertura vegetal afectada por el fuego.

IE: nivel de importancia ecológica asignada, desde una valoración cualitativa en el respectivo contexto geográfico, a la cobertura vegetal afectada.

Se proponen cuatro niveles (1, 2, 3 y 4), en donde el mayor se le asigna a la cobertura más importante desde el punto de vista de su complejidad ecológica. Para el presente estudio se adoptó la siguiente escala: 1 = Pastizal; 2 = Plantaciones de pino, eucalipto o ciprés y rodales de caña brava, guadua o bambú; 3 = Rastrojo (fases sucesionales de hasta ocho o diez años); 4 = Sucesión intermedia-avanzada.

b) Índice de Gravedad Acumulada (IGA)

$$IGA = \frac{I}{a} \sum IGI_{\sigma} \tag{Ecuación (3)}$$

Donde:

IGA: índice de gravedad acumulada.

a: número de eventos de fuego considerados dentro de la serie de tiempo estudiada.

IGI_{CV}: índice de gravedad de cada uno de los eventos ocurridos en la cobertura vegetal de referencia dentro de la serie de tiempo estudiada.

c) Índice de Gravedad Total (IGT):

$$IGT = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^a IGI_{TCV}$$

Ecuación (4)

Donde:

IGT: índice de gravedad total para una espacio geográfico determinado.

a: número de eventos de fuego considerados dentro de la serie de tiempo estudiada.

IGI_{TCV}: índice de gravedad de cada uno de los eventos ocurridos -dentro de la serie de tiempo estudiada- en todas las coberturas vegetales afectadas por el fuego existentes en el espacio geográfico de referencia.

Agradecimientos

Los autores expesan sus agradecimientos a las siguientes personas e instituciones:

La Universidad Autónoma de Occidente, al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), por el apoyo finaniciero para la publicaciòn de la obra; a la Dirección de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico de la universidad Autónoma de Occidente y al Editorial Feriva, por el trabajo editorial realizado; Al personal del Centro de Información de la Universidad Autónoma de Occidente, por su valiosa colaboración en el suministro de la literatura requerido por los autores; al profesor Álvaro Lozano Urriago, por su apoyo en el trabajo de laboratorio; a los biólogos Andrés Giraldo Rodríguez y Gustavo Álvarez Saa y a los Administradores del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales José Fernando Granados Hurtado, Mauro Felipe Moncada Pereira - quienes apoyaron las labores de campo y de laboratorio- y Juan David Montoya Santacruz, quien además del trabajo de campo, participó en las labores de georreferenciación, dimensionamiento y registro fotográfico de los eventos ocurridos en los últimos cinco años en el área de estudio; al

ingeniero Jairo Rosero Narváez por el procesamiento de datos en SIG y la generación de la cartografía; al capitán Jairo de Jesús Soto Gil, Comandante de la Escuela Interamericana de Bomberos de Santiago de Cali, por proveer la información primaria sobre incendios y conatos de incendios de la cobertura vegetal; al economista Gustavo Adolfo González Palomino, por su apoyo al procesamiento de datos; al doctor Jorge Enrique Orejuela Garthner, director de la Fundación Jardín Botánico de Cali, por la lectura científica del documento; a la ingeniera Luz Stella Pulido Pérez, de la Dirección de Ecosistemas del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por el apoyo brindado para el desarrollo de la investigacion sobre la dinámica espacio-temporal; al ingeniero Fabio Calero Montealegre, Profesional Especializado de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC-, por las recomendaciones y sugerencias hechas para la obra. A los habitantes de la zona de estudio se les hace un reconocimiento especial por la información y el apoyo brindado durante la fase de campo.

El editor agradece especialmente al doctor Dante Arturo Rodríguez Trejo, de la Universidad Autónoma de Chapingo (México), por sus generosas palabras en el prólogo del presente tomo.



Los incendios y conatos de incendios de la cobertura vegetal constituyen en la actualidad uno de los temas de mayor registro en los medios de comunicación a nivel mundial, tanto por su incremento en frecuencia y área afectada, como por sus impactos. En los países del trópico americano como Colombia, el fenómeno muestra una tendencia a la alteración de sus ciclos naturales, afectando especialmente el potencial de producción de bienes y servicios ecosistémicos.

A pesar del panorama nacional de esta problemática, es muy poca la investigación científica publicada en el país orientada a comprender los diferentes aspectos involucrados en los contextos particulares de ocurrencia. La conveniencia de estimular el desarrollo de estudios sobre el tema por la vía de la publicación de sus resultados y, sobre todo, de suministrar insumos de información de base científica a las entidades encargadas de la gestión del riesgo involucrado, han motivado al Grupo de Estudios Ambientales para el Desarrollo Sostenible de la Universidad Autónoma de Occidente a iniciar una serie de publicaciones que recojan y socialicen los estudios que se realicen.

ISBN 978-958-8713-03-8

