



# Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos

Nelly Rodríguez-Eraso  
José Daniel Pabón-Caicedo  
Néstor Ricardo Bernal-Suárez  
Jorge Martínez-Collantes



# Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos

A la memoria de Jorge Anibal Zea Mazo (1948 - 2010)

Nelly Rodríguez-Eraso  
José Daniel Pabón-Caicedo  
Néstor Ricardo Bernal-Suárez  
Jorge Martínez-Collantes

Caídas de agua, Boyacá. Foto: Augusto Repizzo





©Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2010.

Los textos pueden ser utilizados total o parcialmente citando la fuente.

**Número de contribución IAvH 445**

**Coordinación editorial**

Claudia María Villa G.

**Cartografía**

Miguel Ángel Castiblanco

Juliana Rodríguez

**Fotografía**

Banco de Imágenes IAvH

**Diseño y diagramación**

Carlos González/John Khatib ([www.ediprint.com.co](http://www.ediprint.com.co))

**Impresión**

Alianza Ediprint Ltda. - Guerra Editores

1.000 ejemplares

Bogotá, D. C.; mayo de 2010

**Citación sugerida:**

Rodríguez-Eraso N., Pabón-Caicedo J.D., Bernal-Suárez N.R. y Martínez-Collantes J. 2010. Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. Bogotá, D. C., Colombia. 80 p.

ISBN: 978-958-8343-42-6

**Palabras clave:**

Cambio regional, cordillera Oriental, detección de cambios, climatología, NDVI, uso del suelo, Precis.

Esta publicación hace parte de los resultados del proyecto *Relaciones entre la dinámica del uso del suelo y la climatología regional como una evidencia de cambio climático en la región de los Andes* (Código 2245-452-21399), realizado gracias al apoyo financiero del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias y desarrollado por el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt y el Grupo de Investigación "Tiempo, clima y sociedad" del Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia.



Laguna Grande de la Sierra. Al fondo, el Cóncavo, Boyacá. Foto: José Mauricio Salcedo

**EUGENIA PONCE DE LEÓN**  
Directora General Instituto Humboldt

**MOISÉS WASSERMAN**  
Rector Universidad Nacional de Colombia

**JUAN FRANCISCO MIRANDA**  
Director Colciencias



---

## **Autores**

### **Nelly Rodríguez Eraso**

Ingeniera forestal, Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Especialista en Estadística, Universidad Nacional de Colombia  
Candidata a PhD en Diversidad y función de ecosistemas,  
Universidad Autónoma de Barcelona  
[neraso2000@gmail.com](mailto:neraso2000@gmail.com)

### **José Daniel Pabón Caicedo**

Meteorólogo  
PhD. Meteorología.  
Profesor Asociado Departamento de Geografía  
Universidad Nacional de Colombia  
[jdpabonc@unal.edu.co](mailto:jdpabonc@unal.edu.co)

### **Néstor Ricardo Bernal Suárez**

Estadístico, Universidad Nacional de Colombia  
M.Sc. Meteorología, Universidad Nacional de Colombia  
[nrbernals@gmail.com](mailto:nrbernals@gmail.com)

### **Jorge Martínez Collantes**

Matemático, Universidad Pedagógica Nacional  
Ph.D Estadística, Temple University, EE. UU.  
M.Sc. Estadística, Temple University, EE. UU.  
[jmartinezc@unal.edu.co](mailto:jmartinezc@unal.edu.co)



---

## Agradecimientos

Los autores agradecemos la colaboración de las entidades que hicieron posible el desarrollo del proyecto *Relaciones entre la dinámica del uso del suelo y la climatología regional como una evidencia de cambio climático en la región de los Andes* (Código 2245-452-21399): Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Agradecemos también a los investigadores que formaron parte del proyecto: Gustavo Galindo, Jenny Viviana Sánchez y Miguel Ángel Castiblanco, por su trabajo continuo y participación en la consecución, el manejo y análisis de la información. En el Instituto Humboldt agradecemos a Eugenia Ponce de León, por su interés y constante apoyo; a Eduardo Zea, que en calidad de supervisor del proyecto realizó sugerencias para su desarrollo; a Claudia María Villa, por sus comentarios editoriales, y a Samuel Díaz, por su empeño y apoyo administrativo. Al Ideam por suministrar la información meteorológica y su permanente colaboración, en particular a los funcionarios de la Subdirección de Meteorología, Ernesto Rangel y Carlos Rocha.

Finalmente, expresamos nuestro reconocimiento al Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia, por el préstamo de las instalaciones y el apoyo durante la ejecución del proyecto.



---

## Lista de siglas y acrónimos

Arima	Modelos autorregresivos integrados de medias móviles
AVHRR:	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
CBD:	Convenio de Diversidad Biológica
Enos:	El Niño Oscilación del Sur
Hants:	<i>Harmonic Analysis of a Time Series</i> , Análisis Armónico de Series de Tiempo
Ideam:	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
IPCC:	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> , Panel Intergubernamental de Cambio Climático
MEA:	<i>Millennium Ecosystem Assessment</i> , Evaluación de Ecosistemas del Milenio
NDVI:	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> , Índice de la Diferencia Normalizada de Vegetación
NOAA:	<i>National Oceanographic and Atmospheric Administration</i>
ONI:	<i>Oceanic Nino Index</i> , Índice Oceánico de El Niño
Precis <sup>®</sup> :	<i>Providing Regional Climates for Impact Studies</i>
ZCIT:	Zona de Confluencia Intertropical



---

# Contenido

<b>Resumen ejecutivo</b> . . . . .	13
<b>Introducción</b> . . . . .	17
<b>Conceptos básicos</b> . . . . .	21
Cambio local, regional y global . . . . .	23
Cobertura y uso del suelo . . . . .	23
Bases conceptuales de la relación cobertura y uso del suelo-clima . . . . .	24
Impactos globales y regionales del cambio climático y el cambio en la cobertura y uso del suelo . . . . .	25
La biodiversidad . . . . .	25
Impactos del cambio climático y la cobertura y uso del suelo sobre la biodiversidad . . . . .	26
Servicios ecosistémicos y bienestar humano . . . . .	27
<b>Clima, cambio climático y cobertura y uso del suelo en los Andes colombianos</b> . . . . .	29
El clima en los Andes colombianos . . . . .	31
Los ecosistemas y el uso del suelo en los Andes colombianos . . . . .	32
Las proyecciones del cambio climático para los Andes colombianos . . . . .	32
<b>Estudio de caso: sector nororiental de la cordillera Oriental</b> . . . . .	35
Área de estudio . . . . .	37
Fuentes de información . . . . .	38
Evidencias del cambio en la cobertura y uso del suelo . . . . .	38
Metodología . . . . .	40
Resultados . . . . .	40
Principales hallazgos . . . . .	44
Evidencias de cambio en el clima y la señal de cambio de uso del suelo mediante series de NDVI . . . . .	46
Metodología . . . . .	47
Resultados . . . . .	48
Principales hallazgos . . . . .	54
Modelamiento del efecto del cambio en la cobertura y uso del suelo en el clima local-regional . . . . .	54
Metodología . . . . .	55
Resultados . . . . .	56
Principales hallazgos . . . . .	60
Modelos de series de tiempo multivariadas y análisis factorial dinámico para evidenciar la relación entre cobertura y uso del suelo-clima . . . . .	60
Metodología . . . . .	61
Resultados . . . . .	61
Principales hallazgos . . . . .	66
<b>Conclusiones generales y referencias</b> . . . . .	69



Laguna glaciárica, Boyacá. Foto: José Mauricio Salcedo

Resumen ejecutivo



## Resumen ejecutivo

Teniendo en cuenta que el cambio climático se manifiesta en la escala global, regional y local, un enfoque adecuado para vincular la interacción entre cambio climático y cambio en el uso del suelo es identificar la señal local del cambio climático, vinculada con el cambio de cobertura y uso del suelo. Desde esta perspectiva, el proyecto “*Relaciones entre la dinámica del uso del suelo y la climatología regional como una evidencia de cambio climático en la región de los Andes*” abordó como pregunta de investigación la siguiente: ¿Cómo los cambios de uso del suelo en regiones específicas del territorio colombiano pueden estar influenciando la climatología local?. El proyecto hizo parte de la Convocatoria Nacional para la Financiación de Proyectos año 2008, Colciencias No. 452-2008 y fue ejecutado por el Instituto Humboldt, en asocio con la Universidad Nacional de Colombia.

Este estudio se desarrolló en dos escalas de trabajo: una regional, que abarca el sector nororiental de la cordillera Oriental con una extensión cercana a 2.600 km<sup>2</sup> y otra local, que corresponde al área de influencia de 22 estaciones climatológicas ubicadas bajo diferentes escenarios de conservación-transformación.

La dinámica de cambio de uso y cobertura del suelo se analizó mediante matrices de cambio entre 1975 y 2005 e información del Índice de la Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) para el período 1985-2005. En el ámbito regional se efectuaron experimentos climáticos y de sensibilidad climática para el período 1960-2000 usando un modelo climático regional (Precis®), y a nivel de las estaciones meteorológicas, se simuló la precipitación y temperatura a través de evidencias empíricas de cambio de cobertura y uso del suelo y clima mediante análisis de series de tiempo de precipitación, temperatura y NDVI, donde se abordaron modelos de funciones de transferencia, modelos multivariados y análisis factorial dinámico.

Los resultados indican que la tasa de deforestación del área del estudio (1,04% anual) es más alta que la reportada para los bosques andinos y altoandinos de la cordillera Oriental; pese a ello, al interior de la región, la configuración de la estructura espacial del paisaje, relacionada con el patrón de cobertura y uso del suelo, no presenta cambios considerables. Adicionalmente, se observó

que los valores más bajos de NDVI se asocian a las zonas secas del cañón del Chicamocha y la parte central del área (Altiplano Cundiboyacense), caracterizada por un intenso uso agrícola y pecuario y exhibe valores de NDVI entre 0,4 y 0,8.

Analizando los cambios detectados, tanto en promedio como en varianza en las anomalías de precipitación, se detectó que el mayor porcentaje de ellos se genera por su coincidencia temporal con las fases extremas de variabilidad climática interanual (eventos El Niño y La Niña) y posteriormente por cambios de cobertura y uso del suelo derivados de la señal del NDVI.

Con los experimentos efectuados a partir de modelamiento del clima regional fue posible establecer que, efectivamente, con cambios locales en el uso del suelo ocurren cambios de las variables climatológicas en la escala local. De igual manera, los cambios simulados fueron muy variados, aunque mostraron tendencias como la de poco cambio en ambientes naturales y aumento de la precipitación cuando se pasa a pastos.

Como resultado del estudio se evidenció que la dinámica de cambio de cobertura y uso del suelo ha generado un cambio en el clima en la escala local, el cual es diferencial tanto espacial como temporalmente. Esta evidencia se tradujo en la detección de cambios en el nivel de las series de anomalías de precipitación y en la longitud de regímenes, donde las estaciones con vecindad transformada mostraron mayor variabilidad, comparada con la variabilidad climática natural mejor representada en los ambientes con vecindad natural. Igualmente se concluyó que la diversidad en la respuesta a los cambios de uso del suelo usando Precis® puede resultar de la interacción de todos los cambios en diferentes lugares de la región, lo cual se debería corroborar con una exploración acerca de cómo funciona el modelo, en este caso los modelos climáticos regionales.

El desafío actual es encontrar el método más adecuado, o la combinación de métodos, para vincular la interacción entre cambio climático y uso del suelo a nivel regional-local. En este sentido, cualquier evaluación de la expresión local del cambio en el clima futuro debe considerar el uso de la tierra en las prácticas locales. Los estudios, particularmente en las regiones montañosas o andinas, darán pautas para avanzar en el conocimiento de la vulnerabilidad de estos ecosistemas a diferentes procesos de cambio con sus implicaciones ambientales, económicas y culturales.



Paisaje andino, Boyacá. Foto: José Mauricio Salcedo

|||||

# Introducción



## Introducción

Existe una creciente preocupación por el *cambio climático*, un tema que en los últimos años ha despertado el interés de investigadores de diversas disciplinas y tomadores de decisiones que buscan entender sus causas y evidenciar sus efectos. Los avances en esta materia permitirán tener una mejor comprensión de la interacción entre el medio ambiente y la sociedad y alcanzar un balance entre los sectores académico, técnico, científico, de tomadores de decisión y de opinión pública.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007) señala que algunas actividades antropogénicas generan un forzamiento radiativo, positivo o negativo, ocasionando el aumento o la disminución en la temperatura del aire. Así, las variaciones en la cobertura del suelo se constituyen en uno de los forzamientos naturales y antropogénicos que operan a diferentes escalas y que inciden en cambios en el clima regional y mundial (Brovkin *et al.*, 2006) y uno de los principales impulsores de la pérdida de diversidad biológica.

En Colombia existen estudios que evidencian los efectos que sobre el ambiente tiene el cambio climático. Como resultado de estos estudios se ha observado un marcado retroceso de los glaciares de montaña, aumento de la temperatura y cambios en la humedad y las lluvias, entre otros, que afectarán a mediano y largo plazo la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas, en términos de sus ciclos fenológicos, de nutrientes y agua y que, finalmente, incidirán en la prestación de bienes y servicios que los ecosistemas brindan a los seres vivos. No obstante, los esfuerzos por identificar la contribución de procesos de diversa escala a este cambio climático son aún escasos, a pesar de la utilidad práctica de este conocimiento particular.

Por lo anterior, el Instituto Humboldt, en asocio con la Universidad Nacional de Colombia, participó en la Convocatoria Na-

cional para la Financiación de Proyectos año 2008, Colciencias No. 452-2008, con el proyecto “Relaciones entre la dinámica del uso del suelo y la climatología regional como una evidencia de cambio climático en la región de los Andes”, con el objetivo de aportar a una mejor comprensión de los complejos procesos de las interacciones entre el cambio de cobertura y uso de la tierra y el cambio climático y dar pautas metodológicas para efectuar análisis integrados en los temas de clima y cobertura del suelo.

El Proyecto se desarrolló en dos escalas de trabajo. Una regional, que abarca el sector nororiental de la cordillera Oriental con una extensión cercana a 2.600 km<sup>2</sup>, y otra local, que corresponde al área de influencia de 22 estaciones climatológicas seleccionadas dentro del área de estudio para vincular las relaciones cobertura y uso del suelo-climatología bajo escenarios de conservación-transformación.

Resultado de lo anterior, este documento resume los análisis de la interacción entre la cobertura y uso del suelo y el clima en la escala local, aspecto de suma importancia para el entendimiento del cambio climático global, regional y local y la sustentación de medidas de mitigación o adaptación.

En este sentido, la publicación va dirigida a públicos técnicos, académicos y científicos, interesados en el tema que puedan adelantar nuevas investigaciones con el debido rigor que la temática amerita, ya que pese a que el cambio climático es un tema en boga, la evidencia acerca de cómo patrones de cambio en el paisaje o el ecosistema afectan la climatología regional y local es escasa, y antes de permear sectores generales de la sociedad, se debe fortalecer el conocimiento científico en la materia, a partir de análisis integrales que incluyan variables ecológicas, económicas y políticas, por mencionar sólo algunas.



Cultivo tradicional campesino en el Altiplano Cundiboyacense, Boyacá. Foto: José Mauricio Salcedo



# Conceptos básicos



---

## Conceptos básicos

Pese a los múltiples enfoques y definiciones que existen sobre cambio global regional y local, así como para definir la cobertura y uso del suelo, el presente estudio se desarrolló en el marco de los conceptos básicos que a continuación se exponen.

### Cambio local, regional y global

El clima es el resultado de factores y condiciones ambientales que operan en diferentes escalas, de tal manera que es posible hablar de clima local, clima regional y clima global.

El clima global es un concepto que considera las condiciones atmosféricas predominantes durante un período largo (meses, años, siglos, entre otros), que son generadas por una distribución heterogénea de la energía solar que ingresa al planeta y produce una circulación atmosférica y oceánica, la cual, a su vez, redistribuye esta energía (calor) y la humedad del aire, la nubosidad y la cantidad de lluvias.

El clima regional se refiere a las condiciones atmosféricas predominantes en una región<sup>1</sup>, las cuales son consecuencia de la modulación de las condiciones globales por los factores físico-geográficos que la caracterizan.

---

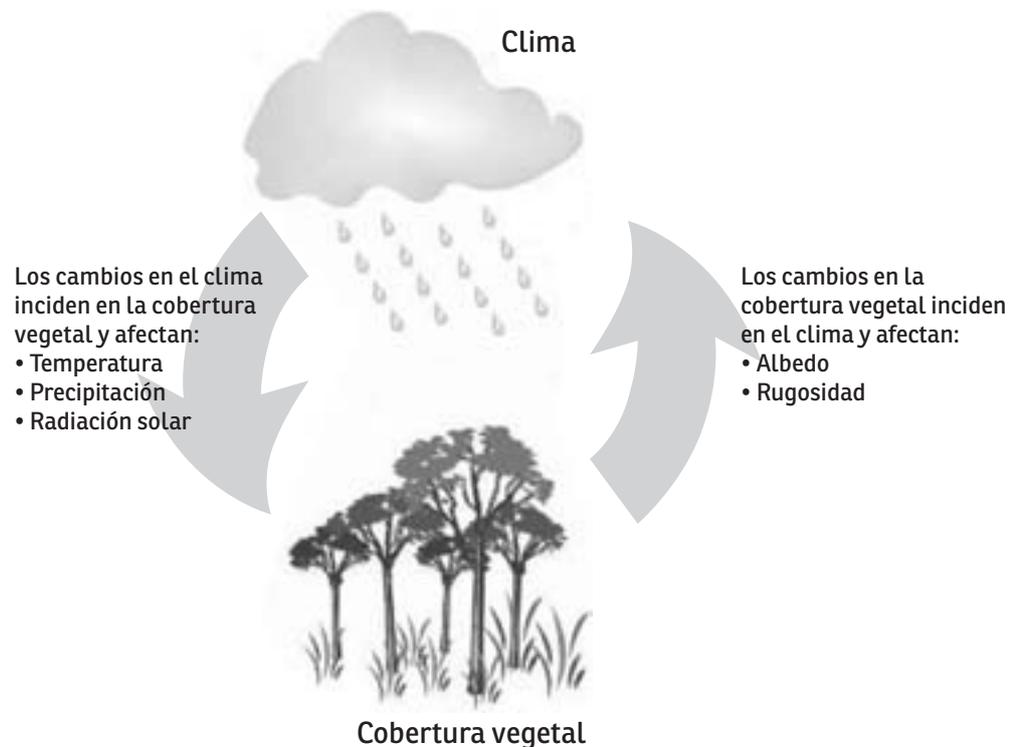
<sup>1</sup> Como región se considera un área con características físico-geográficas comunes tanto en la macroescala (América Tropical) como en escala subnacional (cuena alta del río Magdalena, por ejemplo).

El clima local hace referencia a las condiciones atmosféricas predominantes en un lugar donde las características de la cobertura del suelo (bosque, cultivos, espejo de agua, cemento-asfalto, entre otras) juegan un papel significativo en la modificación de las condiciones de fondo, generadas por la señal global y regional.

Las mediciones de variables climatológicas (temperatura y humedad del aire, precipitación, vientos, entre otras) tienen incorporadas las tres señales, esto es, lo global, lo regional y lo local. El cambio en estas variables está controlado por procesos en las tres escalas y su interacción. Aunque el aislamiento de una de ellas es una tarea difícil, el conocimiento acerca de cómo actúa cada escala es de gran valor para las decisiones locales sobre mitigación y adaptación al cambio climático en general.

### Cobertura y uso del suelo

La cobertura del suelo se refiere al tipo de cubierta (natural o producto del ser humano) que se encuentra en la superficie terrestre (pasto, cultivo, ciudad, entre otros), mientras que el uso es el conjunto de actividades que el ser humano desarrolla en relación con cierto tipo de cobertura, y está asociado con los fines sociales y económicos (agricultura comercial, ganadería intensiva, entre otros).



**Figura 1.** Interacciones biofísicas entre el clima y la cobertura vegetal (adaptado de Foley *et al.*, 2003).

En el ámbito global, los factores de mayor incidencia en los procesos de cambio de cobertura y uso del suelo<sup>2</sup> están asociados a la deforestación. En los trópicos la expansión de la agricultura y ganadería, la extracción de madera y el desarrollo de infraestructura vial (Geist & Lambin, 2001; Rudel, 2007) son impulsores directos de cambio, mientras que en América Latina, se ha identificado que las características geográficas, los factores socioeconómicos y los parámetros biofísicos son los agentes directos del cambio de uso del suelo.

Los cambios de cobertura y uso del suelo en escalas locales están ligados a una combinación específica de factores económicos, tecnológicos, institucionales, culturales y demográficos, que dependen de cada lugar y de cada contexto histórico, así como a la ubicación geográfica, topografía, geología, suelo, clima y factores antropogénicos como la historia del uso del

<sup>2</sup> Para efectos del presente estudio se usa como un único concepto, es decir, el tipo de cobertura asociado a determinado uso del suelo.

suelo y las tendencias socioeconómicas y demográficas (Geist & Lambin, 2002).

Los estudios sobre dinámicas de cambio de la cobertura y uso del suelo pueden orientar una toma de decisiones más acertada para el manejo de los ecosistemas, que va a depender de las diferencias intrarregionales que se dan en una región y se convierten en estudios claves del cambio ambiental global.

## Bases conceptuales de la relación cobertura y uso del suelo-clima

En las últimas décadas se han incrementado las investigaciones en el tema cobertura vegetal-clima, debido a que el clima es un factor primordial en la distribución de los patrones mundiales de los ecosistemas y, al mismo tiempo, los ecosistemas, a través de su cobertura vegetal y suelos, pueden afectar el sistema climático (Zhao *et al.*, 2001; Chapin *et al.*, 2000; Foley *et al.*, 2003). La relevancia de esta relación es tal que la conversión histórica del uso del suelo por parte del hombre puede haber causado una disminución de la temperatura entre 1 y 2 °C en latitudes medias y un calentamiento de 1 a 2 °C en áreas tropicales deforestadas.

El uso del suelo determina características de la superficie terrestre como la humedad de la capa superficial del suelo, la regulación del balance de radiación del sistema superficie-atmósfera, los flujos de masa (vapor de agua o CO<sub>2</sub>) y energía (calor) entre este sistema y la rugosidad que controla la energía cinética de la atmósfera, principalmente. La afectación del sistema climático, a través de la cobertura y uso del suelo, se resume en dos grandes categorías: procesos biogeoquímicos, que incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, y procesos biofísicos tales como la modificación del albedo<sup>3</sup> de la superficie del suelo (Recuadro 1) (Foley *et al.*, 2003; Feddema *et al.*, 2005; Brovkih *et al.*, 2006). La Figura 1 resume las interacciones que ocurren entre cobertura terrestre y el clima, indicando los impactos causados por un cambio en estas variables.

<sup>3</sup> El albedo es la cantidad de energía reflejada por una superficie.

Los resultados de investigaciones realizadas hasta el momento (Mahfouf *et al.*, 1987; Segal *et al.*, 1988; Pielke *et al.*, 1998; Lowry, 1998; Kalnay & Cai, 2003; Jáuregi, 2004, entre muchos otros), han establecido que los cambios en el uso del suelo (deforestación, creación de embalses, urbanización, cambio de tipo de cultivo y los diferentes sistemas de riego) modifican en la escala local los patrones de comportamiento de los fenómenos meteorológicos (frecuencia de eventos extremos como tormentas, granizadas, heladas, entre otros) y las variables climatológicas como la temperatura y humedad del aire, vientos (circulación atmosférica de mesoescala) y precipitación.

## Impactos globales y regionales del cambio climático y el cambio en la cobertura y uso del suelo

### La biodiversidad

Los cambios ambientales globales relacionados con la alteración del clima, los ciclos biogeoquímicos, el uso del suelo, la introducción de especies, entre otros, han cambiado la diversidad local y mundial del planeta, con importantes consecuencias sobre los sistemas ecológicos y sociales (Chapin *et al.*, 2000). El cambio de uso del suelo es uno de los principales impulsores del cambio de la diversidad biológica y se proyecta para el año 2100 como el de mayor impacto global, seguido del cambio climático (Sala *et al.*, 2000; Hansen *et al.*, 2001; Duraiappah *et al.*, 2005; Fischlin *et al.*, 2007).

La distribución de los ecosistemas está en gran medida determinada por el factor climático y los ecosistemas actuales y futuros son reflejo de una compleja interacción entre las variables biofísicas, tales como suelo, clima y uso de la tierra (Chapin *et al.* 2000; McKenzie *et al.*, 2003; Nitschke & Innes, 2008). El efecto del cambio climático, aunado a los efectos de la pérdida de hábitat y fragmentación de paisajes, posibilitarán que se modifique la composición de la mayoría de los ecosistemas, desplazándose los hábitats de muchas especies; de esta forma se aumentará el régimen de pérdida de algunas especies y se crearán oportunidades para el establecimiento de otras (IPCC, 2002) (ver Recuadro 2).

### RECUADRO 1

## Impactos del cambio del uso del suelo sobre el clima (Foley *et al.*, 2003)

### Feedbacks biofísicos

Afectación de los flujos de superficie mediante:

1. Modificación del albedo.
2. Cambios en la rugosidad de la superficie.
3. Desequilibrio entre la pérdida de calor sensible y latente.
4. Cambios en la estructura y distribución de los ecosistemas terrestres.

### Feedbacks biogeoquímicos

Alteración de:

1. Ciclos biogeoquímicos y cambio en la composición química de la atmósfera.
2. Capacidad de los ecosistemas terrestres para procesar carbono.
3. Procesos ecológicos y fisiológicos en el suelo y la vegetación.
4. Intercambio de gases: metano, óxido nitroso, isopreno, vapor de agua y CO<sub>2</sub>.
5. Equilibrio del carbono y por lo tanto de las tasas de fotosíntesis, respiración, mortalidad y perturbaciones de la vegetación.
6. En general, la sustitución de un bosque tropical por pastizales aumentará el albedo, disminuirá la rugosidad, el índice de área foliar y la profundidad de las raíces, como consecuencia, habrá un aumento de temperatura, una reducción de la evapotranspiración y cambios en el balance de energía y agua.

Finalmente, los cambios en la composición de las comunidades y la distribución de ecosistemas pueden producir reacciones que afectan al clima mundial y regional. Adicionalmente, los cambios en la intensidad y los patrones espaciales de uso de la tierra y el clima pueden llevar a la pérdida de importantes servicios de los ecosistemas y a la provisión de las demandas futuras de nuestra sociedad (Quétier *et al.*, 2009).

## Impactos del cambio climático y la cobertura y uso del suelo sobre la biodiversidad

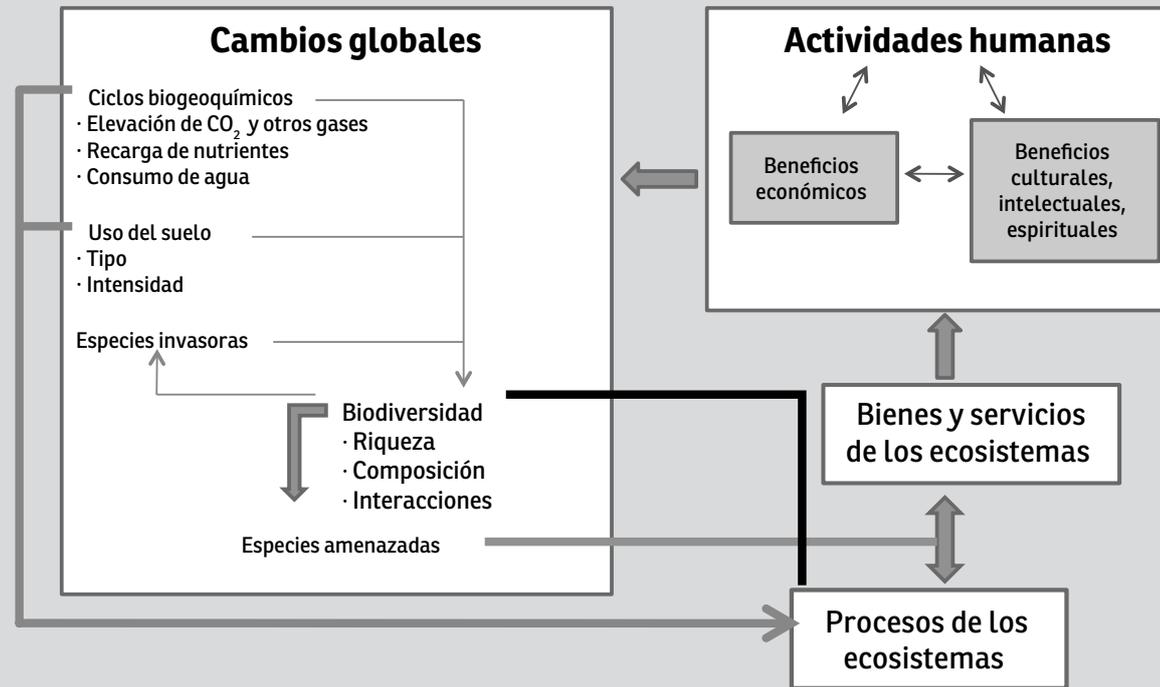
(Chapin *et al.*, 2000; IPCC, 2002; CDB, 2009)

1. Estructura y funcionamiento de los ecosistemas.
2. Patrones de distribución de los ecosistemas.
3. Modificación del tamaño y estructura de la población.
4. Cambios en la distribución de las especies.
5. Cambios en la composición de las especies (introducción de especies invasoras).
6. Cambios en las interacciones de las especies.
7. Cambios en la fenología de plantas y animales.
8. Extinción global de especies endémicas o especies con rangos restringidos.
9. Pérdida de la diversidad genética.
10. Modificaciones en la frecuencia e intensidad del régimen de perturbaciones.
11. Provisión de bienes y servicios de los ecosistemas para la sociedad.
12. Impactos sociales y económicos.

En el marco de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio se examina el futuro de la diversi-

dad biológica ante el cambio de tres conductores: cambio climático, cambio de uso del suelo y deposición de nitrógeno, sugiriéndose que el número de especies de plantas vasculares puede disminuir en abundancia relativa entre 12-16% para 2050, en relación con las especies reportadas en 1970; cerca del 80% de la pérdida de especies corresponde a cambios en el uso de la tierra (principalmente por deforestación) en los bosques tropicales y sabanas (Sala *et al.*, 2005).

Fuente: Chapin *et al.*, 2000



### **Servicios ecosistémicos y bienestar humano**

El bienestar humano depende de la naturaleza. Asimismo, los servicios del ecosistema (soporte, provisión, regulación y culturales) constituyen los beneficios que el ser humano recibe de ella. Este bienestar abarca los ámbitos sociales, económicos y ambientales, donde los cambios en el clima y el uso del suelo, como conductores directos de cambios en el ecosistema, alteran la cantidad, calidad y oportunidad de los flujos de servicios ambientales, y crean condiciones de vulnerabilidad para las personas, comunidades y sectores que dependen de ellos (MEA, 2005a y 2005b).

Entre los servicios que ofrecen los ecosistemas al ser humano, indispensables para su bienestar y salud, están los ciclos biogeoquímicos (agua, carbono), alimento, producción de madera, fibras, productos biológicos, regulación de enfermedades, servicios recreacionales, espirituales y culturales, regulación climática, entre otros. La presencia de fenómenos extremos como inundaciones, tormentas severas, incendios y sequías,

así como la deforestación, pueden alterar la producción e integridad de los ecosistemas y los patrones de enfermedades infecciosas en el tiempo, lo que, aunado a políticas y prácticas de manejo inadecuadas, incrementarán las desigualdades y disparidades entre los distintos grupos humanos (MEA, 2005b).

Para América Latina, el IPCC (2007) prevé que “la productividad de ciertos cultivos importantes disminuiría, así como la productividad pecuaria, con consecuencias para la seguridad alimentaria y el aumento del número de personas amenazadas de hambre”. Como estrategias a estos cambios se plantean opciones de adaptación y mitigación; las primeras implican reducir o revertir el proceso de cambio, mientras que las segundas pretenden aumentar la resistencia de los sistemas sociales y los ecosistemas a los impactos del cambio. Sin embargo, “la capacidad para adaptarse y para atenuar los efectos del cambio depende de las circunstancias socioeconómicas y medioambientales y de la disponibilidad de información y de tecnología” (IPCC, 2007).



Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá. Foto: José Mauricio Salcedo

|||||

# Clima, cambio climático y cobertura y uso del suelo en los Andes colombianos



---

## Clima, cambio climático y cobertura y uso del suelo en los Andes colombianos

La localización de los Andes colombianos entre el Ecuador geográfico y los 10°N, mayormente en la franja ecuatorial, los expone a la influencia de los Alisios y de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), situación que genera la condición climática de macroescala. La altitud sobre el nivel del mar y la interacción de los elementos de circulación mencionados, sumados a la orografía, produce la variedad de expresiones climáticas de menor escala que muestran patrones de comportamiento muy particulares de las variables climatológicas. Dichos factores, asociados a pisos altitudinales, se matizan por el efecto de la variabilidad espacial de la cobertura vegetal y de la diversidad de usos del suelo.

### El clima en los Andes colombianos

La distribución de la temperatura del aire en los Andes colombianos está relacionada principalmente con la altitud sobre el nivel del mar, de tal manera que los valores medios anuales descienden a razón de 0,55 (en sectores húmedos) – 0,65° (sectores secos) desde los 26–28°C en las zonas bajas hasta valores de 13–14°C en los 2.500 msnm o 0°C entre los 4.800–y los 5.000 msnm. La

amplitud del ciclo anual no sobrepasa 1°C, mientras que la del ciclo diario puede alcanzar 12–15°C en promedio.

La parte oriental de los Andes colombianos está expuesta directamente a los Alisios, causando que sea húmeda y lluviosa (valores anuales del orden de los 5.000 mm), en comparación con el valle del Magdalena. En la parte occidental (vertiente del Pacífico) actúa un sistema de circulación monzónica, que durante gran parte del año configura vientos provenientes del Oeste que llevan la humedad hacia la cordillera Occidental, propiciando condiciones extremadamente lluviosas (precipitación anual por encima de 5.000 mm, que en algunos sectores alcanza los 12.000–13.000 mm). Los valles interandinos, por su parte, son menos húmedos (precipitaciones anuales entre 1.000–3.000 mm).

La distribución de las lluvias durante el año también está influenciada por la exposición de determinado sector geográfico a los vientos dominantes y a la ZCIT. Por ejemplo, en los piedemontes orientales hay un comportamiento monomodal con el máximo a mediados de año; en el sector de los valles interandinos

el comportamiento es bimodal con los periodos de lluvia entre marzo-junio y septiembre-noviembre, mientras que la vertiente pacífica presenta lluvias abundantes en todos los meses, con un máximo a mediados de año.

Estos patrones de distribución espacio-temporal de las variables climatológicas se alteran recurrentemente por la variabilidad climática, particularmente por las fases extremas generadas por el ciclo Enos. Así, según el Ideam, en períodos El Niño el piedemonte llanero y amazónico registra lluvias por encima de lo normal, mientras que la parte interandina presenta déficit; el sector norte de la vertiente pacífica responde con déficit y el sector sur con exceso de precipitación. Conviene mencionar que el fenómeno La Niña trae anomalías contrarias a las descritas para El Niño.

De otra parte, se ha evidenciado que las variables climatológicas de la región presentan tendencias en el largo plazo que muestran que está ocurriendo un cambio climático. La evidencia más clara es el retroceso de los glaciares (Ceballos, 2009); sin embargo, también se ha estimado (Pabón, 2007) que la temperatura media anual del aire está aumentando entre 0,1 y 0,2 °C por decenio y que la precipitación presenta cambios variados (aumentos o disminuciones), dependiendo de la ubicación geográfica dentro de la región.

## Los ecosistemas y el uso del suelo en los Andes colombianos

Los Andes colombianos hacen parte de la ecorregión Andes del Norte, la cual es considerada dentro de los 200 sitios prioritarios para la conservación global de la biodiversidad, debido a su riqueza biológica y al alto grado de amenaza antrópica (Mittermeier *et al.*, 1999).

El ser humano ha tenido un papel importante en la historia de configuración de los paisajes andinos, ocasionando cambios en los ecosistemas a nivel estructural y funcional: alteración de los patrones espaciales de la vegetación, geometrización del territorio, alteración de los ciclos hidrológicos, reducción de la capacidad productiva de los suelos y alteración aparente de cambios

locales y regionales del clima, relacionados con factores extrarregionales (Etter *et al.*, 2006). Estos cambios han incidido en diverso grado en el clima local.

Históricamente en la región se ha desarrollado una intensa actividad antrópica desde épocas prehispanicas, datándose la ocupación humana de los Andes colombianos en al menos 13.000 DP (Van der Hammen, 1992). Etter y Van Wyngaarden (2000) y Etter *et al.* (2008) realizaron un análisis sobre los patrones de ocupación de los paisajes en Colombia, encontrando que los ecosistemas más afectados por el cambio de uso del suelo desde el año 1500 han sido los bosques andinos y secos, donde los impulsores directos de cambio están relacionados con la densidad poblacional y el establecimiento de actividades productivas intensas (café y ganadería).

La región se caracteriza en la actualidad por ser el centro de la actividad económica del país (85%) y por concentrar la mayor parte de la población (77,4%), donde la economía cafetera ha sido uno de los factores de su desarrollo (Rincón y Bernal 2007). En los últimos años, la región ha presentado un incremento de la actividad pecuaria atribuido a tendencias históricas orientadas al aumento de áreas en pastos para la ganadería, cuyos sistemas de producción tienden a ser de lechería en las zonas de altiplanos y altitudes entre 2.000 y 3.000 msnm; de doble propósito (carne y leche) en los climas medios (1.000 a 2.000 msnm) y páramos (>3.500 msnm) (Murgueito, 2002).

## Las proyecciones del cambio climático para los Andes colombianos

Las estimaciones de cambio climático para los Andes colombianos son una expresión regional del cambio climático global. Los cambios generados por la interacción de los procesos de diversas escalas, desde la local hasta la global, estarían dados por las estimaciones que se hacen para lugares específicos (estaciones climatológicas). Sin embargo, la señal generada por cada escala no estaría aislada, aunque se podría hallar la diferencia entre la estimación generalizada para la región y la obtenida para un lugar específico.

En el ámbito colombiano son pocos los trabajos que se han realizado con el fin de identificar el efecto que el cambio en el uso del suelo genera en el clima en escalas local y regional. Aunque se ha analizado el efecto de la urbanización en la sabana de Bogotá y se ha demostrado que el cambio en el uso del suelo asociado a este proceso genera cambios locales en la temperatura del aire, la humedad y la precipitación (Pabón *et al.*, 1998; Poveda, 2008), los cambios en el clima local y regional, causados por el cambio de cobertura vegetal o por otros cambios en el uso del suelo, han sido prácticamente inexplorados.

Mediante extrapolación de tendencias, con base en distintas metodologías, incluyendo el modelamiento numérico para la elaboración de escenarios climáticos, se han efectuado diversas proyecciones de cambio climático. Así, por ejemplo, se ha estimado que debido al aumento de la temperatura en 2,3°C, los páramos pueden ascender hasta 450 m arriba de su localización altitudinal actual con una pérdida de hasta el 97% de su área (Buitaert *et al.* 2006). Por su parte, los bosques de niebla, ubicados entre los 1.500 y los 3.000 msnm, son susceptibles de secarse a medida que los niveles de las nubes suben, presentándose un aumento hipotético de temperatura, aunado a que las especies endémicas de alta montaña son particularmente vulnerables a variaciones altitudinales (Foster, 2001). Poveda y Pineda (2009)

plantean que entre 2015 y 2020 no existirán casquetes de hielo en las montañas del país.

Según los escenarios de cambio climático realizados por Pabón (2007), hacia mediados del siglo XXI para la región de los Andes colombianos habría un incremento de temperatura anual del aire de entre 1,5 y 2,0°, por encima de las observadas en el período de referencia 1961-1990; así mismo, los cambios de la precipitación anual estarían entre +/-10%, con aumentos (hasta el 10%) en el sector del piedemonte oriental y en la vertiente pacífica y disminuciones (hasta -10%) en los altiplanos y valles interandinos. Estimaciones más recientes (Pabón, 2008; Ruiz, 2010), elaboradas para finales del siglo XXI, plantean un aumento de la temperatura del aire del orden de los 4°C, en relación con el clima de referencia, y reducciones de hasta el 50% de la precipitación anual en el altiplano; por su parte, en los piedemontes oriental y occidental (vertiente pacífica) habría aumento de la precipitación de hasta 30%.

No obstante, hay que tener en cuenta que las proyecciones señaladas consideran solamente el efecto de los procesos globales (aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera). Pero, ¿Cómo están actuando los procesos locales como el cambio en el uso del suelo? ¿Están acentuando o suavizando la señal global?



San Pedro de Iguaque, Boyacá. Foto: Francisco Nieto Montaña

Estudio de caso:  
sector nororiental  
de la cordillera Oriental



## Estudio de caso: sector nororiental de la cordillera Oriental

Teniendo en cuenta que el cambio climático se manifiesta en la escala global, regional y local, un enfoque adecuado para vincular la interacción entre cambio climático y cambio en el uso del suelo es tratar de extraer e identificar la señal local del cambio climático, vinculada con el cambio de cobertura y uso del suelo. Desde esta perspectiva, el proyecto “*Relaciones entre la dinámica del uso del suelo y la climatología regional como una evidencia de cambio climático en la región de los Andes*” abordó como pregunta de investigación ¿Cómo los cambios de uso del suelo en regiones específicas del territorio colombiano pueden estar influenciando la climatología local?

Para responder esta pregunta, en ejecución del Proyecto se escogió como estudio de caso el sector nororiental de la cordillera Oriental de los Andes colombianos. Este estudio de caso se desarrolló en dos escalas de trabajo:

- Regional, que abarca el sector nororiental de la cordillera Oriental con una extensión cercana a 2.600 km<sup>2</sup>.
- Local, que corresponde al área de influencia de 22 estaciones climatológicas seleccionadas para vincular las relaciones

uso del suelo-climatología bajo escenarios de conservación-transformación. Por ello, el área de influencia se estimó en 20 km<sup>2</sup> para cada estación.

### Área de estudio

Comprende la región norte de la cordillera Oriental, con una superficie de 2.594.742 ha (2.600 km<sup>2</sup>), abarcando 185 municipios que hacen parte de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Santander, Norte de Santander, Meta, Casanare y Arauca. El área es uno de los sectores importantes de la cordillera, debido a la presencia de los complejos de bosques y páramos del Cocuy, Pisba, Tota-Bijagual-Mamapacha, Guerrero y parte de Chingaza y Sumapaz, los cuales son considerados prioritarios para la conservación de la biodiversidad. Igualmente, esta región se caracteriza por una intensa actividad agropecuaria asociada con el Altiplano Cundiboyacense. Altitudinalmente, la zona se distribuye entre los 1.800 y 3.700 msnm y está conformada por las cuencas hidrográficas de los ríos Bata, Guachetá, Negro, Alto Guatiquía, Alto Upía, Chicamocha y Chitagá (Figura 2).



**Figura 2.**  
Localización del área de estudio

El clima del área se caracteriza por el contraste en los valores de la precipitación, desde zonas secas, con alrededor de los 700 mm año en los extremos norte del área, hasta zonas húmedas (vertiente occidental) y pluviales (vertiente oriental). Por lo general, el régimen de precipitación es bimodal, con dos períodos húmedos y dos secos. La mayor parte de los municipios tienen vocación agropecuaria, aunque datos provenientes de la Encuesta Nacional Agropecuaria (2002 a 2008) indican el cambio en los últimos años del uso del suelo, mostrando un mayor énfasis en uso del suelo para el sector pecuario, influenciado por el creci-

miento de la ganadería, actividad que ha venido cambiando la estructura del paisaje.

## Fuentes de información

Los datos climatológicos usados para evaluar las relaciones entre la dinámica del uso del suelo y la climatología regional como una evidencia de cambio climático fueron suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Como resultado, se contó con 22 estaciones con datos de precipitación mensual y seis de temperatura media mensual (Tabla 1), las cuales fueron categorizadas de acuerdo con la vecindad natural, seminatural o transformada.

En el tema de cambios de cobertura y uso del suelo se utilizó la información proveniente de la interpretación de imágenes de satélite para el periodo 1975-2005 e información del Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI), derivada del sensor AVHRR, proveniente de la National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) con una resolución espacial de 8 km x 8 km y una resolución temporal de diez días (<ftp://daac.gsfc.nasa.gov/data/AVHRR>), usando un set de datos desde 1982 hasta 2005.

## Evidencias del cambio en la cobertura y uso del suelo

Actualmente un tercio de la superficie terrestre está cubierto por pastos o cultivos donde los procesos de mayor transformación han ocurrido en últimos trescientos años (Houghton, 1994; Brovkin *et al.*, 2006). El cambio en el uso del suelo, especialmente la expansión de las tierras agrícolas y de pastos, ha contribuido entre el 15 -20% a las emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial (IPCC, 2000) y a la pérdida de la diversidad biológica y fragmentación de hábitats (Chazal & Rounsevell 2009; Fahrig, 2003; Lambin *et al.*, 2003; Duraiappah *et al.*, 2005).

Los estudios sobre el cambio del uso del suelo están dirigidos principalmente a (i) investigar la tasa de cambio ocurrida en

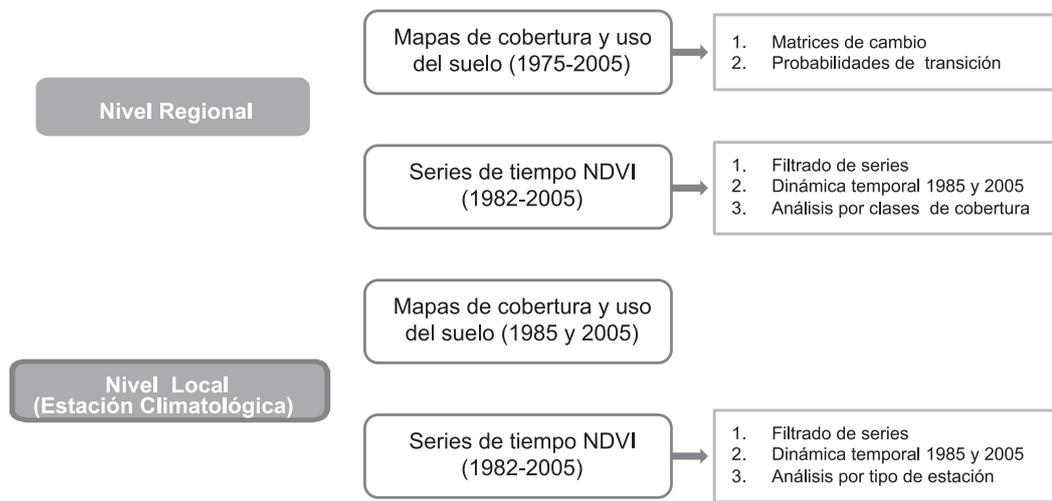
Tipo	Estación	Altura	Departamento	Municipio	% del área en coberturas naturales
Natural	Amoladero	2963	Cundinamarca	Guatavita	89,1
	Monfort	1100	Meta	El Calvario	80,6
	Susumuco	1000	Cundinamarca	Guayabetal	78,5
	Sitio Presa	1210	Boyacá	Santa María	71,7
	Presidente	3320	Norte de Santander	Chitagá	70,7
	Las Palomas	2003	Cundinamarca	Gachalá	68,3
	Susa	3080	Santander	Onzaga	65,4
Seminatural	El Cardón	3590	Boyacá	Socota	60,8
	Santa María	1850	Boyacá	Santa María	51,8
	Garrocho	3100	Boyacá	Toca	48,4
	Manzanares	1200	Meta	Acacias	47,8
Transformada	Gloria	1845	Cundinamarca	Ubala	33,6
	Casa Amarilla	3200	Boyacá	Toca	23,3
	Silos	2765	Norte de Santander	Silos	19,1
	Surbata Bonza	2485	Boyacá	Duitama	15,2
	Las Minas	2003	Cundinamarca	Gachalá	14,5
	Molagavita	2150	Santander	Molagavita	11,3
	A. Alberto Lleras	2500	Boyacá	Sogamoso	7,24
	Gama	2210	Cundinamarca	Gama	7,13
	Almeida	2120	Boyacá	Almeida	4,41
	UPTC	2690	Boyacá	Tunja	3,43
	Sativanorte	2594	Boyacá	Sativanorte	0,0

**Tabla 1.**  
Listado de las estaciones meteorológicas y tipo de vecindad.

una región (cuánto), (ii) investigar las causas subyacente de ese cambio de uso de la tierra, a menudo relacionadas con factores económicos y políticos (por qué) y (iii) caracterizar la ubicación de estos cambios (dónde) (Lambin, 1997).

Para responder estas preguntas existe una amplia gama de métodos que varían en escala, resolución espacial, extensión, agentes, complejidad espacial y temporal (ver Agarwal *et al.*, 2002), que se pueden sintetizar en dos tipos de modelos: estocásticos, basados en matrices de transición y cadenas de Markov, y de optimización, que incluyen modelos

socioeconómicos, de simulación (autómatas celulares), basados en agentes y empíricos (Aspinall, 2004). De otra parte, datos provenientes de sensores remotos como AVHRR-GIMMS, particularmente el NDVI, han sido usados para analizar patrones globales de la vegetación (De Fries *et al.*, 1995), cambios climáticos relacionados con variaciones en la fotosíntesis y fenología en diferentes tipos de coberturas (Tucker *et al.*, 2005; Cleland, 2007), así como para encontrar tendencias interanuales de la dinámica de la vegetación frente a cambios ambientales (Xu *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2004; Piao *et al.*, 2006).



**Figura 3.** Esquema metodológico del análisis de la dinámica de cobertura y uso del suelo

### Metodología

El enfoque metodológico se realizó mediante i) la elaboración de los mapas de cobertura y uso del suelo (años 1975, 1985, 1995 y 2005) y su análisis de cambio a partir de matrices de cambio en la región y mapas de cobertura de los años 1985 y 2005 para el área de influencia de las estaciones meteorológicas y, ii) el análisis de series de tiempo de NDVI. Para esto se estimaron las probabilidades de transición entre clases de cobertura y uso del suelo, utilizando análisis de cadenas de Markov de primer orden.

Los modelos espaciales markovianos (Wood *et al.*, 1997) explícitamente consideran el cambio tanto temporal como espacial para explicar las dinámicas en el uso del suelo. Es un método probabilístico ampliamente usado para hacer comparaciones de cambios de uso del suelos (Cabral, 2008), donde los resultados de una determinada clase de cobertura o uso en un tiempo  $t$  específico dependen estrictamente de los estados anteriores del modelo  $t-1$  (Popp *et al.*, 2009) y no considera los agentes o los factores humanos que llevan a cabo esos cambios así como la variabilidad espacial (Huang *et al.*, 2007).

Por su parte, el NDVI es un índice espectral usado para monitorear y evaluar las respuestas de la cobertura vegetal frente a cambios antropogénicos y naturales, es decir, se utiliza para dis-

criminar la influencia de las actividades humanas de los factores climáticos y naturales (Paruelo *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2004). Adicionalmente, se aplicó el algoritmo Hants (Harmonic Analysis of a Time Series) a los datos de NDVI-GIMMS, en periodos anuales, para poder filtrar las trazas de nubes y de niebla de la señal asociada a la vegetación fotosintética.

La Figura 3 sintetiza el esquema metodológico utilizado para el desarrollo de este apartado.

## Resultados

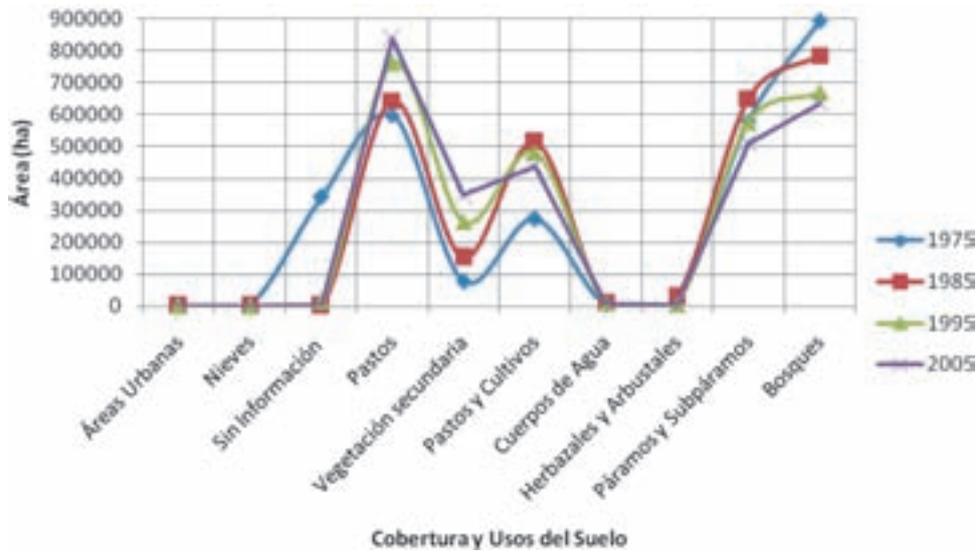
### Dinámica de la cobertura y uso del suelo

#### Nivel regional

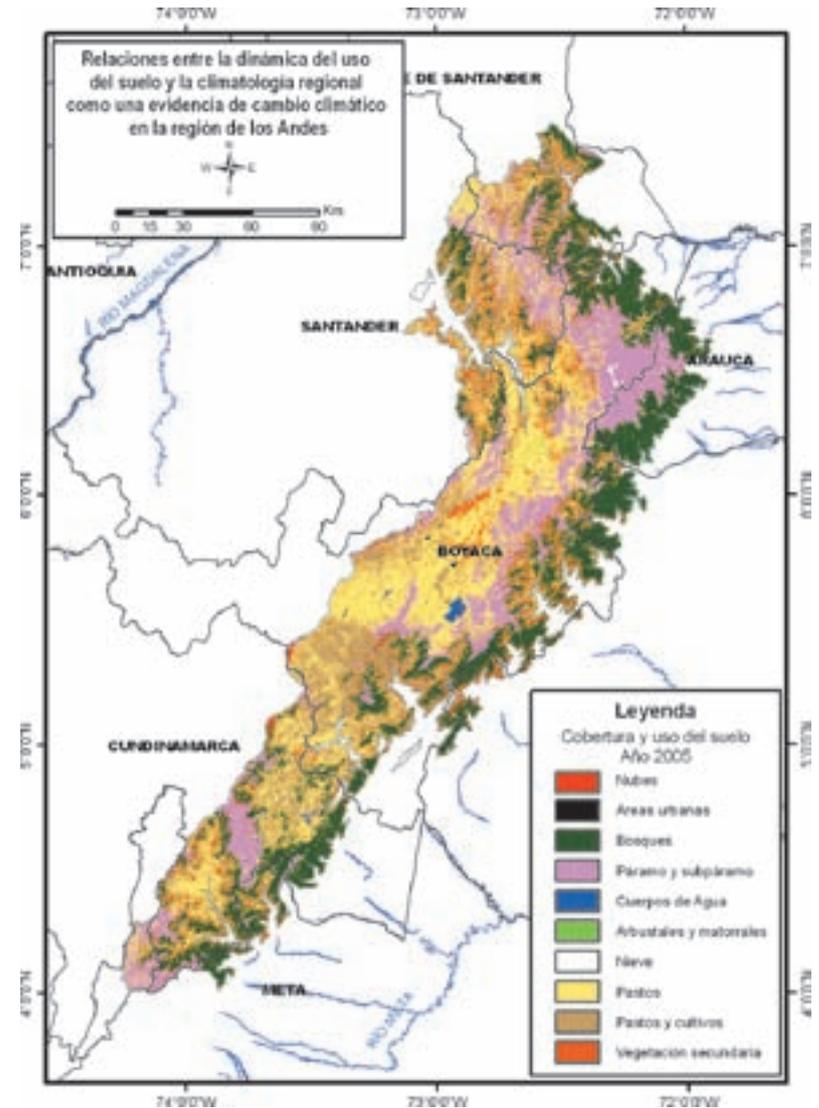
Los resultados indican que para el área de estudio la tasa de deforestación entre el periodo 1985-2005 (1,04% anual) es más alta que la reportada para los bosques andinos y altoandinos de la cordillera Oriental, que es de 0,8% (Cabrera y Ramírez, 2007). Esto se debe a que en esta área se reportan los mayores cambios dentro del contexto de la cordillera Oriental. Pese a ello, al interior de la región de estudio, la configuración de la estructura espacial del paisaje, relacionada con el patrón de cobertura y uso del suelo, no presenta cambios considerables, ya que la mayor parte de las probabilidades de transición se mantienen (Figura 4).

Durante el periodo 1975-1985 el cambio de mayor relevancia ocurrió en los glaciares ubicados en el páramo del Cocuy, donde cerca del 46% de su área se perdió. Esta década se considera crítica para la pérdida de los glaciares, tal como lo referencian los estudios de Vuille *et al.*, (2008), según los cuales en los últimos 50 años ha habido de forma paralela una reducción rápida de los glaciares tropicales andinos y un cambio en el clima en los Andes. Este último cambio puede influenciar el equilibrio del balance energético del glaciar, a través de cambios en la humedad atmosférica, la precipitación, la nubosidad y la temperatura del aire, con consecuencias en la disponibilidad del recurso hídrico.

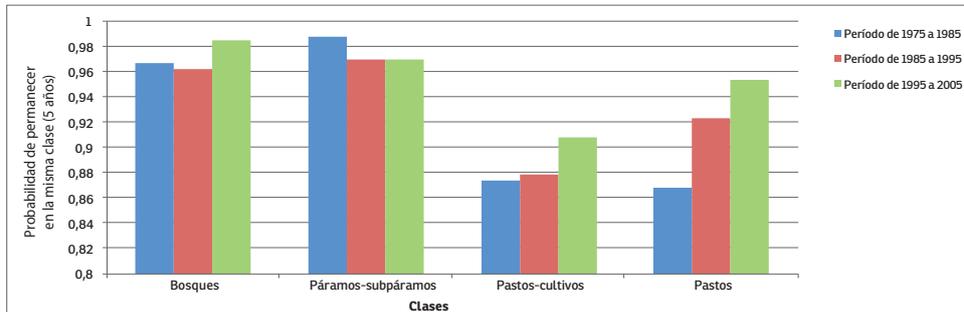
Para el año 2005, cerca del 41% de la región de estudio se encontraba compuesta por coberturas naturales representadas principalmente por bosques andinos y páramos (Figura 5), los cuales, durante el periodo comprendido entre 1975 y 2005, perdieron



**Figura 5.**  
Mapa de cobertura año 2005



**Figura 4.**  
Tendencias en cobertura y uso del suelo (tomado de Galindo *et al.*, 2010)



**Figura 6.**  
Probabilidad de permanencia de diferentes categorías de cobertura

cerca del 12% de su extensión. Por otra parte, el reemplazo de coberturas naturales (bosques, páramos y herbazales), así como tierras dedicadas netamente a la agricultura por pastizales, es un patrón histórico de cambio de uso en la región andina, debido a la introducción específicamente de pasto kikuyo, en alturas superiores a 1.500 m (Etter y vanWyngaarden, 2000; Etter *et al.*, 2008); esto se evidencia especialmente en los sectores de Pisba, El Cocuy (Chita, El Cocuy) y Sumapaz (Bogotá, Chipaque y Une) donde se presentaron los mayores cambios en el uso del suelo.



**Figura 7.** Área de influencia de las estaciones climatológicas correspondientes a cada uno de los escenarios del Proyecto. Composición de imágenes Landsat ETM 4, 5, 3 del año 1985. (a) Amoladero (vecindad natural), (b) Santa María (vecindad seminatural) y (c) Alberto Lleras (vecindad trasformada). Los colores rojizos representan áreas de bosques, los colores verdes áreas de páramo y subpáramos, el color azul cuerpos de agua, los colores verde-azulosos zonas de pastos y los colores naranjas zonas de cultivos-pastos y vegetación secundaria.

Teniendo en cuenta las matrices de transición, se observa cómo la probabilidad de transición (estimada para lapsos de tiempo de cinco años de acuerdo con CGER, 2000) de que un píxel de bosque permanezca en su mismo estado cambia dependiendo del lapso de tiempo considerado. La mayor probabilidad de permanencia en la misma clase ocurrió en el período comprendido entre 1995 a 2005, mientras que las mayores probabilidades de transición a otras clases corresponden al período 1985-1995. Para la categoría de páramos hay evidencia de transición generalmente a pastos desde 1985, así mismo, las categorías de mayor dinámica de transición son los pastos y pastos y cultivo (Figura 6).

#### Nivel de estación climatológica

Para el año de referencia 1985, las estaciones climatológicas, con su área de influencia compuesta por coberturas naturales, tenían un promedio de cobertura boscosa y de páramos de 74,7%, presentando una ligera disminución (2,2%) para el año 2005, es decir, las tasas de cambio promedio son inferiores a 0,15%, evidenciando un patrón constante de uso del suelo. Para las estaciones seminaturales, el proceso de cambio de uso del suelo es más acentuado, donde en promedio se han perdido cerca de 300 ha, es decir, una tasa de cambio equivalente al 0,43% anual.

Para este mismo periodo (año 1985), en las estaciones transformadas el 51% de la cobertura del suelo estaba conformada por pastizales y el 27% por áreas dedicadas a la agricultura tradi-

cional. Para el año 2005, el porcentaje de pastos era similar, con un pequeño aumento de (3%) de áreas dedicadas a misceláneos de cultivos. Se resalta que dentro del área de influencia de la estación Minas en 1992 entró en operación la represa del Guavio.

La Figura 7 muestra la composición y configuración del paisaje asociado a una estación climatológica representativa de cada vecindad analizada dentro del Proyecto. Como se puede apreciar en la Tabla 2, para la categoría de eco-

sistemas naturales, la tendencia de conservar su área es similar en todas las estaciones; los cambios más acentuados ocurren en las estaciones Monfort (vecindad natural) que se asocia a la intervención de los bosques y aumento de pastos y cultivos; El Cardón (vecindad seminatural), donde la pérdida de ecosistemas de páramos es alta, y Alberto Lleras, Casa Amarilla y Silos (vecindad transformada), asociadas a una intensa actividad productiva, particularmente las dos primeras estaciones, debido a que sus áreas circundantes están ubicadas en cercanías a importantes centros poblados (Tunja y Sogamoso).

Las categorías de pastos y cultivos son más dinámicas en el tiempo, sobre todo la categoría de pastos que es la que exhibe la mayor variabilidad en particular en las estaciones con vecindad seminatural, seguidas de las estaciones con vecindad trasformada.

#### Dinámica del NDVI

##### Nivel regional

A diferencia de lo encontrado para Suramérica, donde hay un incremento general del 1,3% del NDVI en los últimos veinte años, en el área del Proyecto, los valores de NDVI tienden a disminuir; sin embargo, para Suramérica existen diferencias respecto a la magnitud y el signo de los cambios, los cuales están influenciados por el tipo de bioma y el tipo de política de manejo de cada país (Paruelo *et al.*, 2004) y específicamente para nuestra área en escala del continente los cambios son mínimos.

La mediana del NDVI anual (1982 a 2006) presenta valores entre 0,5 y 6,5 para el periodo analizado y la mayor diferencia intercuar-til corresponde a los años de 1983, 1984, 1994 y 2003 (Galindo *et al.*, 2010). Las áreas con los valores promedio más bajos de NDVI se encuentran relacionadas con las zonas de los páramos de Cocuy, Chingaza y Sumapaz y en ciertas áreas transformadas, tales como las aledañas a Tunja o la cuenca del río Chicamocha, donde las condiciones climáticas son contrastantes en el ámbito de la región (valores bajos en el régimen pluviométrico).

Adicionalmente, se observa para la región de estudio, que los valores más bajos de NDVI se asocian a las zonas secas del cañón del Chicamocha y algunos sectores de los municipios de Somondoco y Macanal donde la respuesta es inferior a 0,2 y la temperatura es superior a los 16°C. En la parte noreste de la región (municipios de Guicán, El Cocuy, La Uvita, Chita y Jericó), se encuentra una respuesta de NDVI entre 0,2 y 0,6 y la cobertura se relaciona con la presencia de bloques continuos de bosques y páramos y el clima se caracteriza por tener los mayores rangos de precipitación de la región de estudio; en este sector se encuentran entremezclados los mayores valores de NDVI. La parte central del área (Altiplano Cundiboyacense), caracterizada por un intenso uso agrícola y pecuario, exhibe valores de NDVI entre 0,4 y 0,8 y es justamente en esta área donde se observa la mayor variabilidad en los patrones de distribución del NDVI y las condiciones climáticas presentan rangos de temperatura entre 12 y 16°C y una precipitación que oscila entre 1.000 y 2.000 mm anuales. En el sector norte y algunos sectores del occidente del área se presentan valores de NDVI superiores a 0,6, principalmente en el año 1985, donde la cobertura y uso del suelo la conforman un mosaico intrincado de vegetación natural, secundaria, pastos y cultivos.

Los años con NDVI promedio con valores más bajos se encuentran en los periodos 1983-1984, 1991-1992, 1994, 1997 y 2003, que corresponden a periodos de ocurrencia de fenómenos El Niño. Poveda *et al.*, (2000 y 2002) indican que las épocas más secas en los Andes, se asocian a los mecanismos físicos que operan en la región durante El Niño e influyen en los bajos contenidos de humedad en el sistema suelo-planta. Estos autores, al analizar los datos de NDVI, que encuentran la presencia de fuertes anomalías negativas durante la ocurrencia de El Niño y este de-

Estación	TCCN	TCP	TCC
Amoladero	-0,01	0,05	0,00
Monfort	-0,70	0,18	-0,09
Susumuco	-0,18	-0,42	0,00
Sitio Presa	0,24	-0,89	0,00
Presidente	-0,18	-0,29	0,74
Palomas	-0,03	-1,10	-3,69
Susa	-0,21	-2,45	-1,39
El Cardón	-1,01	4,90	-0,22
Santa María	-0,25	1,72	-2,93
Garrocho	-0,20	-0,24	1,44
Manzanares	-0,30	0,27	0,00
Gloria	-0,63	1,52	-1,38
Casa Amarilla	-0,79	1,35	-1,47
Silos	-0,91	-0,63	3,67
Surbata Bonza	-0,56	0,69	0,17
Las Minas	-0,61	-4,52	1,43
Molagavita	-0,54	0,75	-0,06
A. Alberto Lleras	-1,20	-0,03	0,49
Gama	0,16	-0,35	0,29
Almeida	0,48	-0,61	0,00
UPTC	-0,47	-0,67	1,61
Sativanorte	0,00	0,45	-0,02

TCCN: tasa de cambio de coberturas naturales; TCP: tasa de cambio de pastos; TCC: tasa de cambio de cultivos.

crecimiento en la actividad fotosintética (NDVI) es consistente con las anomalías negativas encontradas en la precipitación, los caudales de los ríos y posiblemente en la evaporación. Los estudios realizados por Barbosa *et al.*, (2006) en Brasil, corroboran una fuerte respuesta de los valores medios del NDVI al Enos.

Al realizar el análisis a nivel de cobertura dominante (bosques, páramos, pastos y cultivos), entre 1985-2005, se observan disminuciones en los valores de NDVI para todas las clases, existiendo una evidencia significativa de cambio en el tiempo al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis ( $p < 0.001$ ). Se puede observar una mayor dispersión (Figura 8 a y b) en la categoría de páramo donde hay presencia de valores atípicos, seguida de la

**Tabla 2.** Tasas de cambios de las principales categorías de cobertura y uso del suelo a nivel de estación climatológica

categoría de bosques. La clase que presenta menor variabilidad es la de pastos, donde la actividad pecuaria está asociada al establecimiento de gramíneas introducidas (pasto kikuyo).

#### Nivel estación meteorológica

Aunque se trabajaron series suavizadas o filtradas con el uso del método Hants para eliminar los valores bajos y fluctuantes que

pueden estar relacionados con variaciones atmosféricas y no con la dinámica natural o antrópica en las coberturas de la tierra, aún se encuentran valores bajos y fluctuantes que no pueden ser explicados por dinámicas de uso del suelo.

En términos generales, las series de NDVI para las estaciones, cuya vecindad es predominantemente de coberturas transformadas, tienen una tendencia lineal decreciente, mientras que para las estaciones con vecindad de coberturas naturales, solamente hay tendencias incrementales en los valores de NDVI para las estaciones de El Cardón (vecindad a páramo), Susumuco (vecindad a bosques), El Amoladero (vecindad a páramo y bosque) y Presidente (vecindad a páramo).

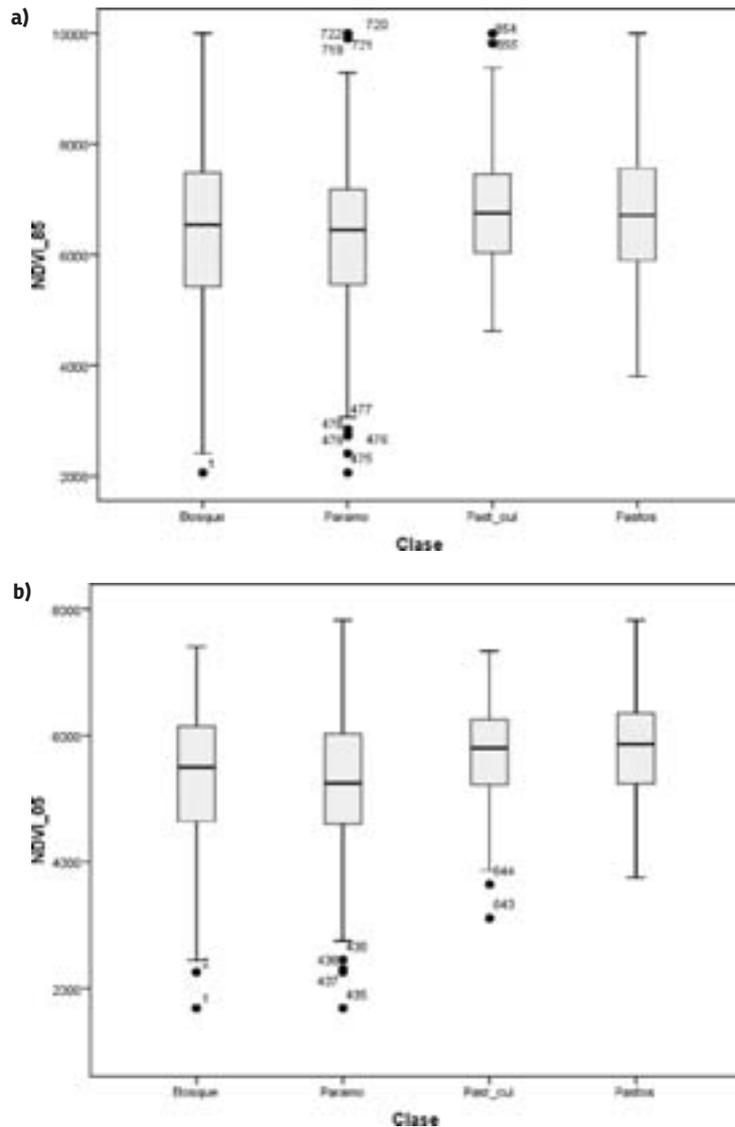
La amplitud de los rangos anuales de NDVI es menor para la vecindad de las estaciones transformadas de Sativanorte, Mola-gavita, Silos y UPTC. En las estaciones con vecindad a bosques, el rango de los valores anuales fluctúa de 0,1 a -1, seguramente debido a que todavía hay un efecto atmosférico que no ha sido eliminado. Los valores máximos anuales de la serie quincenal de NDVI para las estaciones analizadas se presentan con mayor frecuencia en los periodos que corresponden a los meses de menor precipitación (diciembre-febrero).

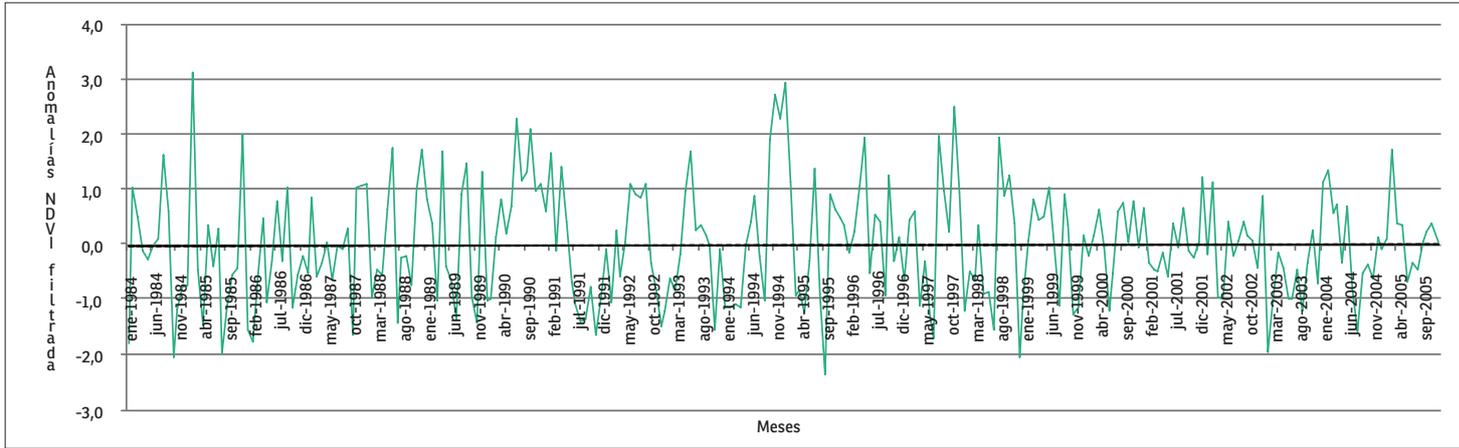
Las figuras 9, 10 y 11 muestran el comportamiento temporal del NDVI en las diferentes estaciones, de acuerdo con su grado de transformación. En las estaciones naturales no se evidencia una tendencia de nivel de la serie, mientras que para las series seminaturales y transformadas hay una tendencia decreciente en los valores.

#### Principales hallazgos

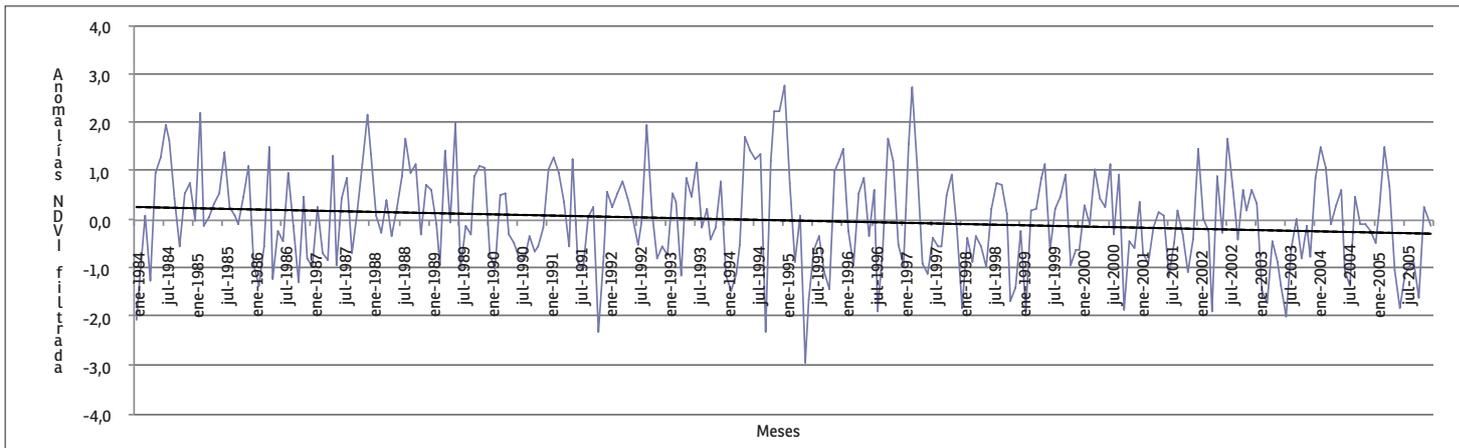
En la región existe una variabilidad en la velocidad de pérdida de bosques y páramos, siendo el período 1985-1995 donde se presentaron las mayores probabilidades de cambio entre categorías de cobertura y uso del suelo. Pese a esto, los patrones espaciales de cobertura y uso del suelo (composición y configuración) no presentan cambios considerables a la escala del estudio, ya que la mayor parte de las probabilidades de transición al interior de las clases naturales se mantienen.

**Figura 8.**  
Comparación de los valores de NDVI a nivel de clases en (a) 1985 y (b) 2005.

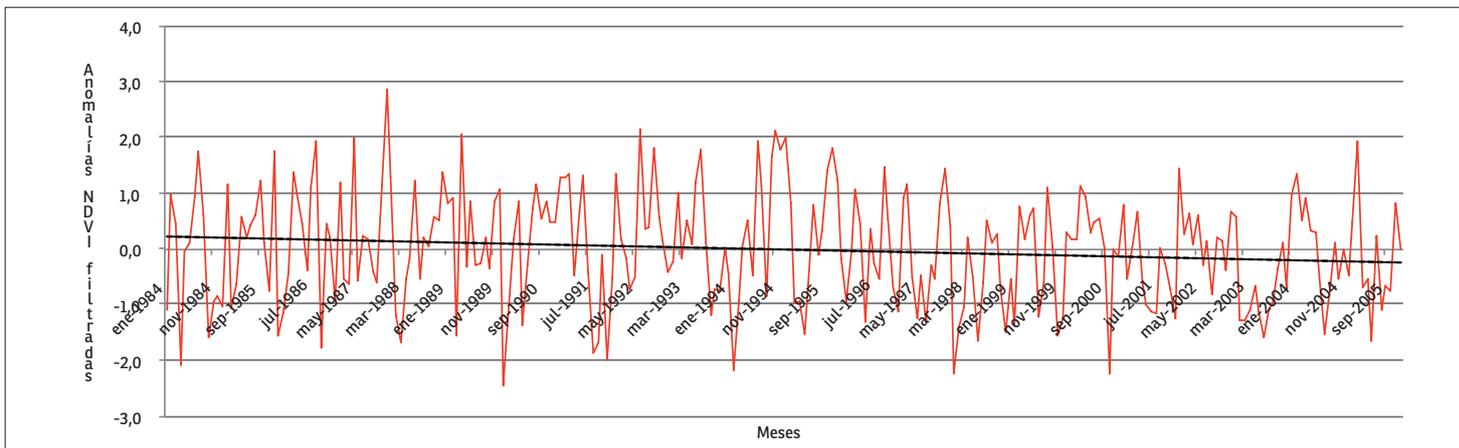




**Figura 9.** Serie de tiempo de la primera componente principal de anomalías de NDVI filtradas (método de función de transferencia) en estaciones con vecindad **natural**.



**Figura 10.** Serie de tiempo de la primera componente principal de anomalías de NDVI filtradas (método de función de transferencia) en estaciones con vecindad **semi-natural**.



**Figura 11.** Serie de tiempo de la primera componente principal de anomalías de NDVI filtradas (método de función de transferencia) en estaciones con vecindad **transformada**.

Uno de los factores que puede incidir en la presencia de esta composición y configuración homogénea del paisaje a través del tiempo está relacionado con el hecho de que la matriz dominante en el área de estudio durante las últimas décadas ha sido de uso agrícola y pecuario. Así mismo, la mayor dinámica de cambio ocurre entre clases transformadas, donde los pastos tienden a aumentar.

A nivel de estación climatológica, los resultados son coincidentes con el patrón de cambio de cobertura y uso regional y las estaciones con vecindad natural tienen bajas tasas de cambio (0,15% anual), en comparación con las estaciones con vecindad seminatural (0,43% anual). Para las estaciones transformadas hay una mayor variabilidad en las categorías de pastos y cultivos.

Por su parte, conviene tener presente que el cambio en la cobertura y uso del suelo en el área de estudio es un proceso dinámico que no puede ser explicado solamente por las condiciones de su estado inicial. Así, los modelos markovianos de dinámica en el uso del suelo ayudan a determinar tendencias y permiten realizar análisis exploratorios sobre la cobertura y el uso del suelo; sin embargo, hay variaciones temporales en la dinámica del cambio, que hacen necesario indagar en los factores socioeconómicos, de política o de variaciones en las condiciones naturales que puedan estar induciendo la velocidad del cambio de uso en determinada región.

En relación con la tendencia en los valores del NDVI en los años de análisis, ésta se mantiene para las estaciones naturales y hay un leve decrecimiento en los valores para las estaciones seminaturales y transformadas. Los resultados arrojados por la prueba Kruskal-Wallis, considerando un valor de significancia del 5%, muestran que existen diferencias significativas en los valores de NDVI para las categorías de bosques, páramos, pastos y pastos y cultivos, indicando que hay evidencias del cambio en la cobertura y uso del suelo en la región.

Finalmente, con respecto a la dinámica del NDVI dentro de la región, al parecer ésta puede tener una influencia tanto de la precipitación media anual como también de las fases extremas de la variabilidad interanual, al igual que de los cambios derivados de las prácticas de manejo del suelo. Conviene mencio-

nar que pese a trabajar con series filtradas (donde el efecto de la precipitación se reduce) y encontrar diferencias entre los valores de NDVI para las principales categorías de cobertura del suelo, resulta complejo explicar las diferencias dentro de la región de estudio de este índice, donde la precipitación tiene una fuerte influencia.

## Evidencias de cambio en el clima y la señal de cambio de uso del suelo mediante series de NDVI

Considerando las series de tiempo climatológicas y de NDVI como un insumo para entender la variabilidad climática y las relaciones clima-uso del suelo, se hace necesario emplear métodos estadísticos que contribuyan a detectar cambios en la estructura temporal de las series y asociarlos de esta forma al análisis de la dinámica de uso del suelo. Un enfoque para realizar estos estudios lo constituyen los análisis de intervención (Lütkepohl, 2005; Reinsel 1993; Peña, 2005; Wei, 2006); en este contexto, McDowall *et al.*, 2000 clasifican los patrones de impacto de una serie en cambios cuyo lapso de duración es temporal o permanente, al igual que clasifican el impacto por el tipo de aparición de los eventos que generan el cambio, identificando aquellos que son de aparición gradual y otros de aparición abrupta y algunas técnicas estadísticas de suavizamiento de series de tiempo relacionadas con ciclos y tendencias (Wang, 2003; Wang & Feng 2007; Montgomery *et al.*, 1990; Giannitrapani *et al.*, 2005), modelos aditivos generalizados y técnicas de análisis de homogeneidad de series de tiempo (Wang, 2003; Wang & Feng 2007).

Teniendo en cuenta que las series de tiempo meteorológicas, vinculadas con las dinámicas de uso del suelo, pueden analizarse a diferentes escalas, Montealegre y Pabón (2001) hacen referencia a que el análisis de la variabilidad climática se puede abordar en escalas estacional, intraestacional, interanual y interdecadal. Por su parte, Ramírez *et al.*, 2009 describen la necesidad de aislar señales, como por ejemplo las escalas interanuales de las decadales en el análisis de la precipitación y su relación con la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña.

Autores como Storch y Zwiers (1999) enfocan la detección de cambios desde la perspectiva de identificar señales en los datos observados, relacionadas con la ocurrencia de eventos extremos, donde el interés radica en conocer si el estado de la atmósfera durante y después del evento es diferente al del clima normal.

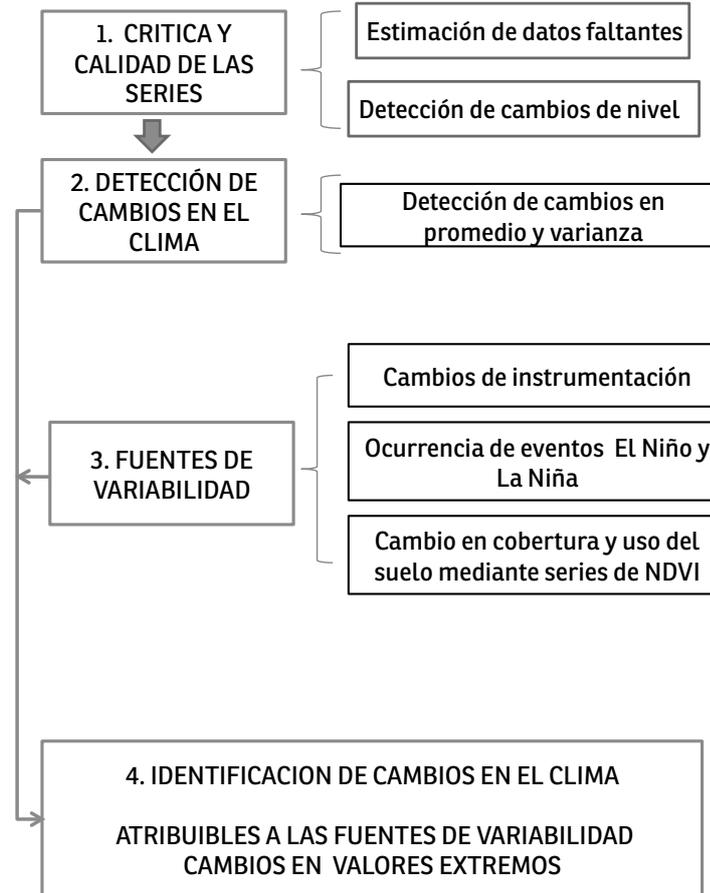
## Metodología

La finalidad de detectar cambios probables en la serie de precipitación (en promedio y varianza), a partir del enfoque de Rodionov (2004) y cambios en el nivel de la serie, se relaciona con cuatro fuentes principales de variación:

- Cambios atribuibles a la estación meteorológica, por ejemplo cambio de ubicación de la estación o cambios en el instrumento de medición (revisión de las hojas de inspección para cada estación meteorológica a partir de información archivada por el Ideam).
- Cambios atribuibles a la señal de variabilidad climática interanual vinculada con la ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña; para identificar esta señal se emplea el Índice ONI (Oceanic Niño Index, NOAA, 2009).
- Cambios atribuibles a cambios de uso del suelo, donde la evidencia empírica de estos cambios se deduce de los cambios en la serie de NDVI, definiendo dos indicadores. El primero es el promedio móvil de 60 meses de la serie de anomalías de NDVI y el segundo, la serie de tiempo de la desviación estándar de 60 meses de la series de anomalías de NDVI. Las series de anomalías fueron previamente filtradas, descontando el efecto de la señal de precipitación a través de modelos de funciones de transferencia.
- Cambios atribuibles al cambio climático en la escala global, donde las series de tiempo de precipitación evidencian tendencias positivas o negativas, que se traducen en excesos o déficits respecto al régimen pluviométrico normal; de igual forma, los cambios en esta escala global probablemente también generan modificaciones en los valores extremos de precipitación en lo referente a su intensidad y frecuencia.

Teniendo en cuenta la descripción, conviene resaltar que el método de Rodionov no permite identificar la señal atribuible al cambio climático a la escala global; por ello el análisis se restringe a las primeras tres fuentes de variabilidad.

En consecuencia, la metodología empleada contempló el desarrollo de las siguientes etapas: i) homogenización de las series, ii) detección de cambios en promedio y iii) detección de cambios en varianza (Figura 12). En la primera etapa se estimaron los datos faltantes en las series empleando un modelo Arima y el enfoque de valores atípicos aditivos (Gómez y Marawall, 1994); posteriormente se detectaron cambios en el nivel de las series de anomalías empleando las pruebas de Pettitt y Alexanderson, implementadas en el software Anclim® (Štěpánek, 2007).



**Figura 12.** Descripción de las etapas metodológicas para la identificación de cambios en promedio y varianza de series de tiempo de precipitación y su relación con fuentes de variabilidad.

Finalmente se detectaron cambios de promedio y varianza en las series de anomalías de precipitación bajo el enfoque propuesto por Rodionov (2006).

Las etapas anteriormente enunciadas se aplicaron a series de precipitación ya que sólo seis estaciones de la zona del proyecto poseían información de temperatura. Adicionalmente, se tomó como período de análisis 1984-2005, debido a que a partir de este periodo hay cubrimiento completo de las fuentes de variabilidad analizadas.

## Resultados

### Detección de cambios en promedio y longitudes de regímenes<sup>4</sup>

Al comparar la longitud de regímenes por tipo de vecindad, se observa que las estaciones con vecindad natural tienden a tener longitudes y variabilidad de regímenes menores que aquellas cuya vecindad es seminatural; para el grupo de estaciones naturales, el valor de la mediana de longitud alcanzó un valor de 22 meses con desviación estándar de 50,6, mientras que para el grupo de estaciones seminaturales, 62 meses y una desviación estándar de 98 meses y para las transformadas 20,5 meses y 116, respectivamente.

Así mismo, se evidencia una correlación inversa y significativa (95% de confianza) entre el promedio de longitud de régimen y el indicador de transformación de cada estación (coeficiente de Spearman = -0,44); esto significa que para aquellas estaciones cuya porcentaje del área en bosque-primario, páramo-subpáramo es alto, por ejemplo en las estaciones Amoladero, Monfort y Susumuco, la longitud promedio del régimen tiende a ser baja, comparada con aquellas estaciones cuya vecindad es transformada; en contraste, para estas últimas estaciones, cuyo valor del indicador es bajo, la longitud promedio de ré-

4 Un régimen se define como una sucesión de meses en los cuales la precipitación posee un mismo nivel. Como las series analizadas están expresadas en el índice de anomalías, los regímenes pueden ser básicamente de tres tipos: (i) cuando la precipitación se mantiene en el valor de la normal climatológica, (ii) cuando la precipitación evidencia excesos respecto a la normal climatológica y (iii) cuando la precipitación evidencia déficits respecto a la normal climatológica.

gimen es alto (estaciones UPTC, Surbata Bonza y Sativanorte) (Figura 13 a y b).

Desde el punto de vista meteorológico, estos resultados indican que las estaciones con vecindad natural poseen un patrón diferente respecto a la longitud de regímenes, evidenciándose series de tiempo homogéneas. En este contexto, las estaciones con vecindad natural resultan ser más adecuadas para el análisis del clima local.

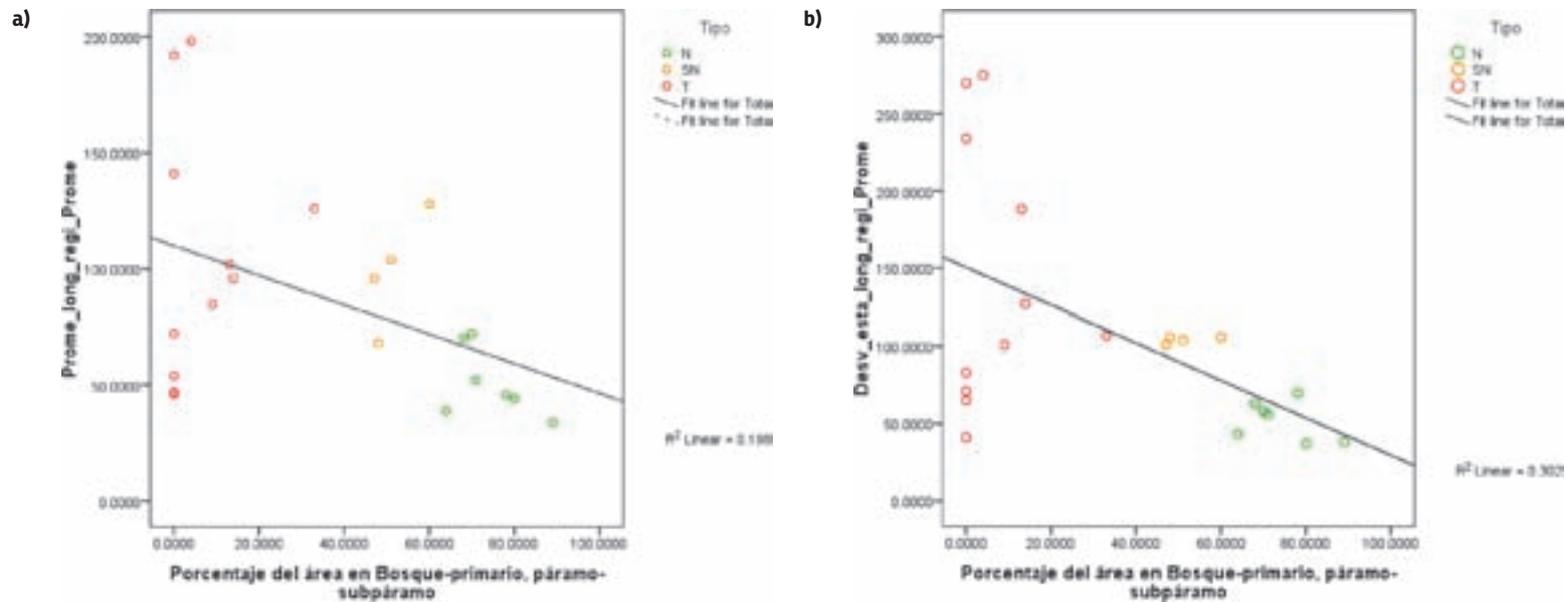
### Detección de cambios en varianza y longitudes de regímenes<sup>5</sup>

Al comparar la longitud de regímenes identificados por cambios de varianza, los valores de la mediana para los tipos de vecindad natural y transformada es aproximadamente igual a 20 meses, mientras que para el caso de las estaciones seminaturales este valor equivale a 28 meses. Respecto a la variabilidad en la longitud de regímenes, las menores desviaciones estándar correspondieron a las estaciones con vecindad transformada y naturales, con valores de desviaciones estándar de 55 y 62, respectivamente; en contraste, para el caso de las seminaturales este valor ascendió a 80,7 meses. No se evidenció una correlación entre el indicador de transformación y la longitud promedio de régimen y la desviación estándar de la longitud de régimen.

### Evidencias de cambios de cobertura-uso del suelo y series de NDVI

Considerando algunas de las probabilidades de transición que representan la dinámica de cambio en la cobertura y uso del suelo en el ámbito regional (Tabla 3), y con la intención de vincular este cambio al análisis local mediante las series de tiempo de NDVI filtradas para los períodos i) 1984 a 1985, ii) 1986 a 1995 y iii) 1996 a 2005, se observa que para el grupo de estaciones naturales el número de meses identificados como valores atípicos se ha incrementado al comparar los tres período-

5 El significado de los regímenes desde el punto de vista de la varianza indica una sucesión de meses consecutivos que poseen una varianza común, en este sentido, se pueden evidenciar tres tipos de regímenes, que son situaciones análogas a las definidas anteriormente para el caso del promedio.



**Figura 13.** Gráfico de dispersión entre el indicador de transformación: porcentaje del área con bosques-primarios, páramos y subpáramos (a) la longitud promedio y (b) desviación estándar de régimen respecto a los cambios detectados en el promedio

dos. Para el caso de las estaciones Monfort, Susumuco y Presidente se evidencia un ligero cambio en el valor de la mediana entre el primer período y el último periodo (Figura 14); para el resto de estaciones naturales los valores de NDVI filtrados tienden a ser similares.

Para el grupo de estaciones seminaturales se observa que los valores de la mediana de NDVI filtrados disminuyeron para algunas estaciones (Santa María y Garrocho), al comparar el primer período con el tercero (Figura 15), mientras que en el grupo de estaciones transformadas se detectaron un mayor número de valores atípicos de NDVI al ser comparados el primer y tercer periodo; adicionalmente, se observa que para las estaciones de Almeida, Gama, Sativanorte y Surbata Bonza, los valores de la mediana de NDVI filtrado disminuyeron en el mismo periodo (Figura 16).

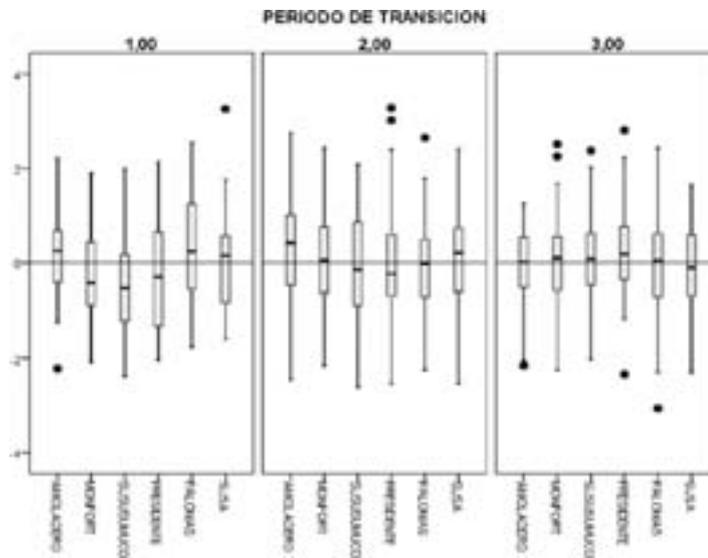
Como síntesis de los resultados anteriormente presentados, se puede señalar que los cambios regionales de cobertura y uso del suelo, cuantificados mediante las probabilidades de transición, generan diferencias en los valores de NDVI filtrados en la escala local (estación meteorológica), pues al comparar los valores de NDVI para los períodos de análisis se eviden-

**Tabla 3**  
Probabilidades de transición para toda la zona de estudio de la clase bosques y páramos a las clases pastos y pastos-cultivos

Período	Clase inicial	Clase final	Probabilidad de transición
1975 a 1985	Bosques	Pastos	0,07
1985 a 1995	Bosques	Pastos	0,06
1995 a 2005	Bosques	Pastos	0,02
1975 a 1985	Bosques	Pastos y cultivos	0,03
1985 a 1995	Bosques	Pastos y cultivos	0,03
1995 a 2005	Bosques	Pastos y cultivos	0,01
1975 a 1985	Páramos	Pastos	0,04
1985 a 1995	Páramos	Pastos	0,07
1995 a 2005	Páramos	Pastos	0,08
1975 a 1985	Páramos	Pastos y cultivos	0,01
1985 a 1995	Páramos	Pastos y cultivos	0,03
1995 a 2005	Páramos	Pastos y cultivos	0,01

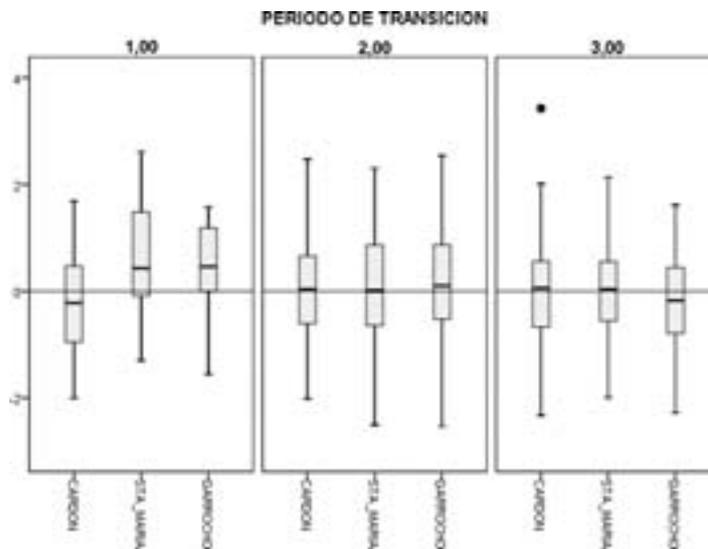
**Figura 14**

Gráficos de caja del NDVI filtrado para **estaciones naturales** para tres períodos: 1: 1984 a 1985, 2: 1986 a 1995 y 3: 1996 a 2005.



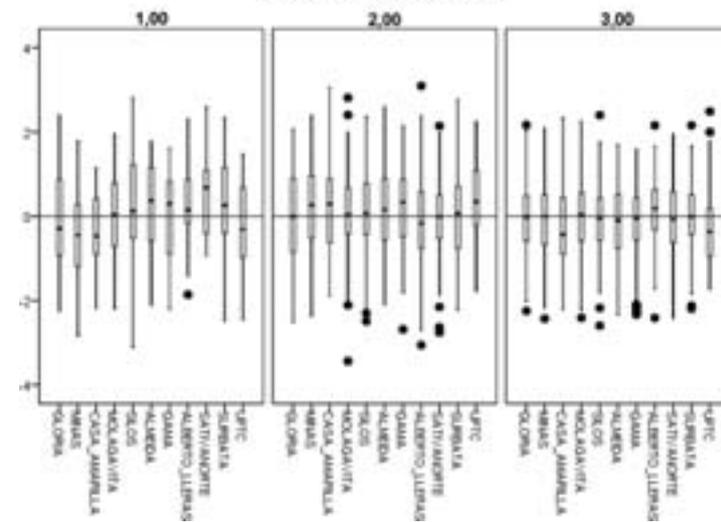
**Figura 15**

Gráficos de caja del NDVI filtrado para **estaciones seminaturales** para tres períodos: 1: 1984 a 1985, 2: 1986 a 1995 y 3: 1996 a 2005.



cian aumentos o disminuciones en su valor, principalmente entre los períodos 1984 a 1995 y 1995 a 2005. Adicionalmente, es preciso acotar que el patrón de cambio no es homogéneo para todas las estaciones, pues, los cambios se observan para estaciones focalizadas, indicando que existe un vínculo entre las variaciones detectadas a nivel regional, con evidencia de cambios en la escala local.

**PERIODO DE TRANSICION**



**Figura 16**

Gráficos de caja del NDVI filtrado para **estaciones transformadas** para tres períodos: 1: 1984 a 1985, 2: 1986 a 1995 y 3: 1996 a 2005.

## Identificación de cambios en el clima a partir de diversas fuentes de variabilidad

Teniendo en cuenta que una de las fuentes de variabilidad de las anomalías de precipitación está relacionada con la ocurrencia de los fenómenos El Niño y La Niña, es preciso señalar que para el período de análisis 1984 a 2005 se presentaron cuatro eventos Niña y cinco eventos Niño, identificados mediante el ONI (NOOA, 2009).

A continuación se describen los cambios detectados en promedio y varianza para las series de anomalías de precipitación para los grupos de estaciones naturales, seminaturales y transformadas.

### Estaciones naturales

**Estación Susumuco:** No se evidencian cambios en las anomalías de precipitación ni el promedio, ni en la varianza; sin embargo, de acuerdo con el indicador de desviación estándar móvil de NDVI, se evidencian cambios en el uso del suelo y cobertura después de 1995 (Figura 17).

*Estación Palomas:* Se detectan dos cambios en el promedio de la serie; uno de ellos coincide con la finalización de un evento Niño (May-94 a Mar-95). Desde el punto de vista de cambios detectados en la varianza, se detectan ocho puntos de cambio, uno de ellos coincide con el inicio de un evento Niño (Mar-97 a May-98) y el otro con un período intermedio de ocurrencia de un evento Niña (Jul-98 a Jun-00). Mediante el indicador de desviación estándar móvil de NDVI, se evidencia un cambio de uso del suelo entre 1985 y 1989 y entre 1992 y 1996, de los siete cambios en varianza, tres de ellos coinciden con la segunda época de cambios de uso del suelo y cobertura (Figura 18).

#### Estaciones seminaturales

*Estación El Cardón:* No se evidencian cambios en las anomalías de precipitación; sin embargo, teniendo en cuenta el indicador de promedio móvil de NDVI, entre el año 1990 y 1996 se evidencian cambios en el uso del suelo y cobertura (Figura 19).

*Estación Garrocho:* Se detectan tres cambios de nivel en la serie de anomalías de precipitación; uno de ellos coincide con la finalización de un evento Niño (Mar-97 a May-98); desde el punto de vista de cambios en la variabilidad de la serie se detectan cuatro cambios, los cuales coinciden aproximadamente con épocas de ocurrencia de dos eventos Niña (Sep-95 a Mar-96) y (Jul-98 a Jun-00). De acuerdo con el indicador de promedio móvil de NDVI (línea azul), se evidencian cambios en el uso del suelo y cobertura desde el año 1993 (Figura 20).

#### Estaciones transformadas

*Estación Sativanorte:* Se detectan tres cambios de varianza en la serie de anomalías de precipitación, dos de ellos coinciden con los meses de finalización de un evento Niño (May-94 a Mar-95) y el con el mes de inicio de un evento Niño (Mar-97 a May-98); se evidencian cambios de uso del suelo y cobertura desde el año 1985, donde tres de los cambios en varianza señalados no sólo coinciden con épocas Niño, sino también con un período con evidencias de cambios de uso del suelo y cobertura (Figura 21).

*Estación Surbata Bonza:* Sólo se detecta un cambio de promedio en la serie de anomalías y éste coincide con período de ocurrencia de un evento Niña (May-88 a May-89). De acuerdo con el indicador de desviación estándar móvil de NDVI, se evidencia un cambio de uso del suelo y cobertura desde el año 1994 (Figura 22).

Considerando los resultados presentados anteriormente, para las estaciones naturales se observa que sólo en la estación Susumuco no se detectaron cambios en la serie de anomalías de precipitación. Para este grupo de estaciones se evidencian cambios de uso del suelo y cobertura, principalmente desde el año 1990, excepto en la estación Sitio Presa que no evidenció cambios en el uso del suelo.

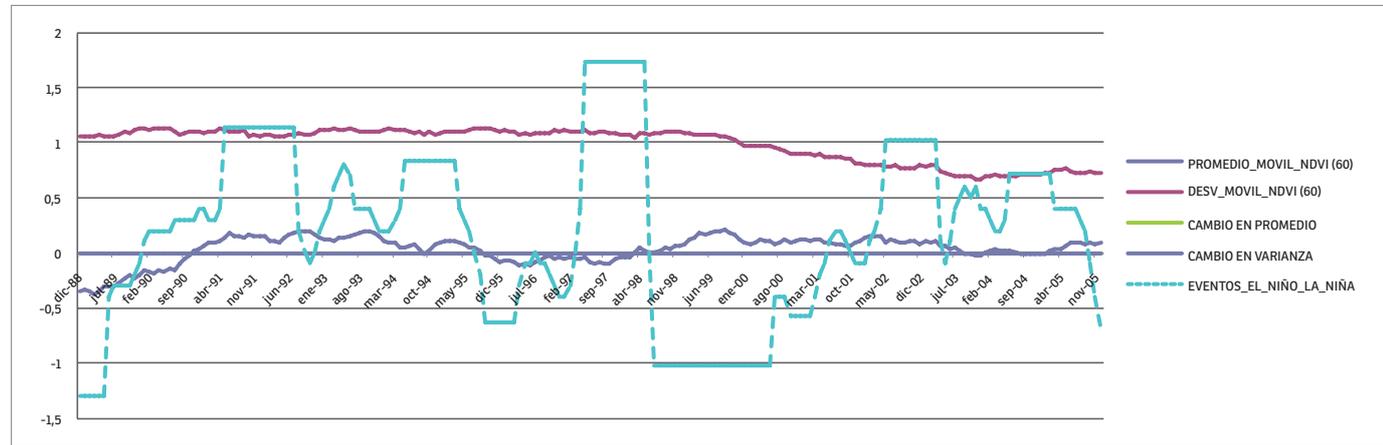
Dentro de estaciones seminaturales, las estaciones El Cardón y Manzanares no evidenciaron cambios en las anomalías de la precipitación; en general todas las estaciones evidencian cambios en el uso del suelo y cobertura desde el año 1990, la excepción fue Manzanares, estación para la cual no se detectó cambio en el uso del suelo.

Considerando el grupo de estaciones transformadas, sólo para las estaciones de Molagavita y Casa Amarilla no se detectaron cambios en las anomalías de precipitación. Desde el punto de vista de los cambios de uso del suelo y cobertura para las estaciones La Gloria y Molagavita y Sativanorte se evidenciaron cambios desde 1984, 1985 y 1986, respectivamente, para las otras estaciones se identificaron cambios después del año 1993.

Ahora bien, un aspecto que fue común a los tres grupos de estaciones es que existe una superposición de señales en el clima local, aquellas señales derivadas de la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña y aquellas vinculadas con los cambios de cobertura y uso del suelo. Es probable que algunos cambios en el uso del suelo generen un impacto en el clima después de transcurrido un lapso de tiempo, pues algunos cambios detectados en las anomalías de precipitación no se vincularon directamente con la variabilidad climática interanual asociadas a las fases extremas de Niño y Niña.

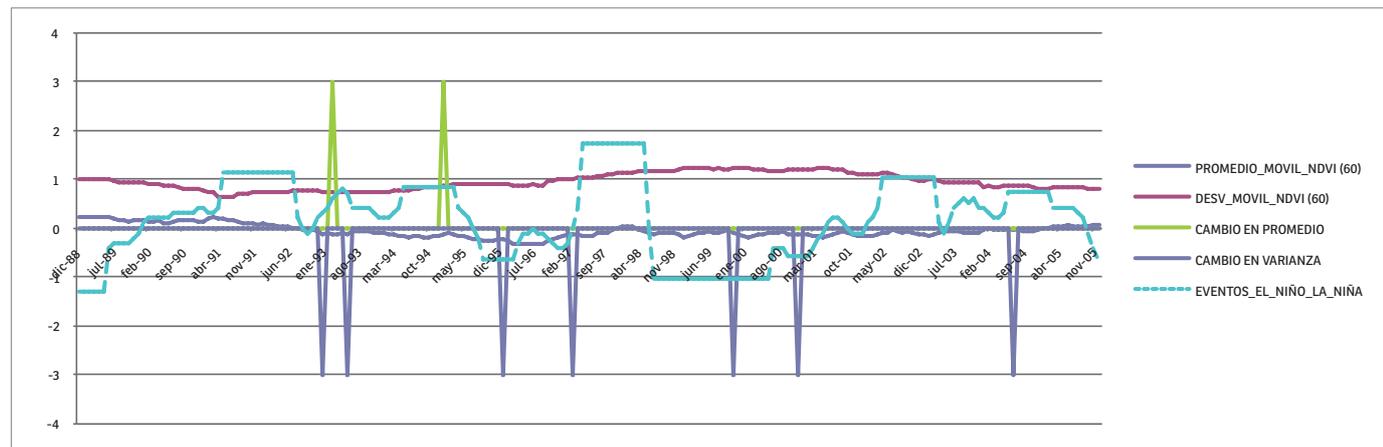
**Figura 17**

Detección de cambios en promedio y varianza en precipitación y fuentes de variabilidad, estación **Susumuco**.



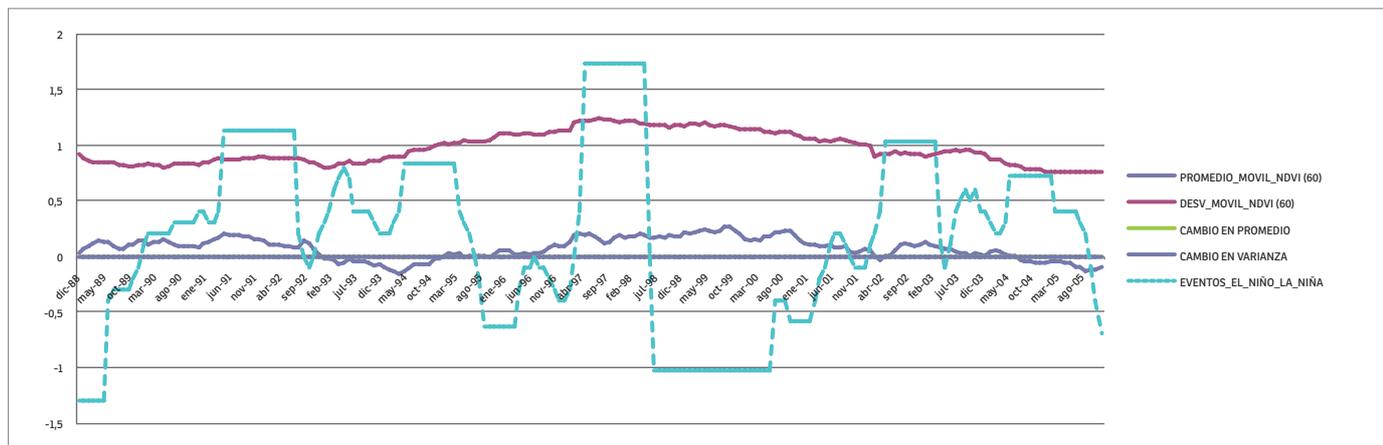
**Figura 18**

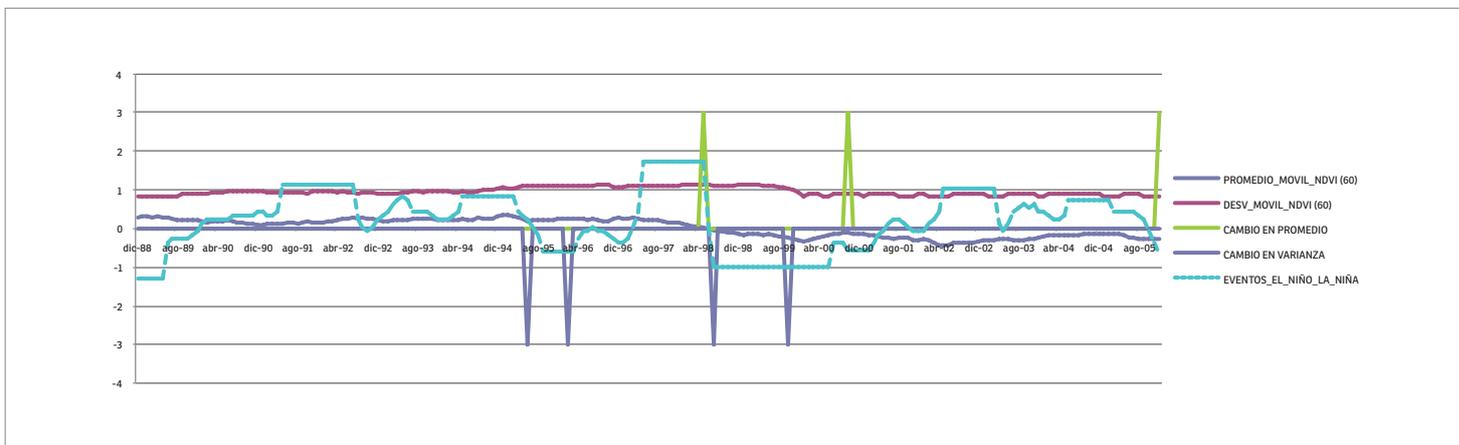
Detección de cambios en promedio y varianza en precipitación y fuentes de variabilidad, estación **Palomas**.



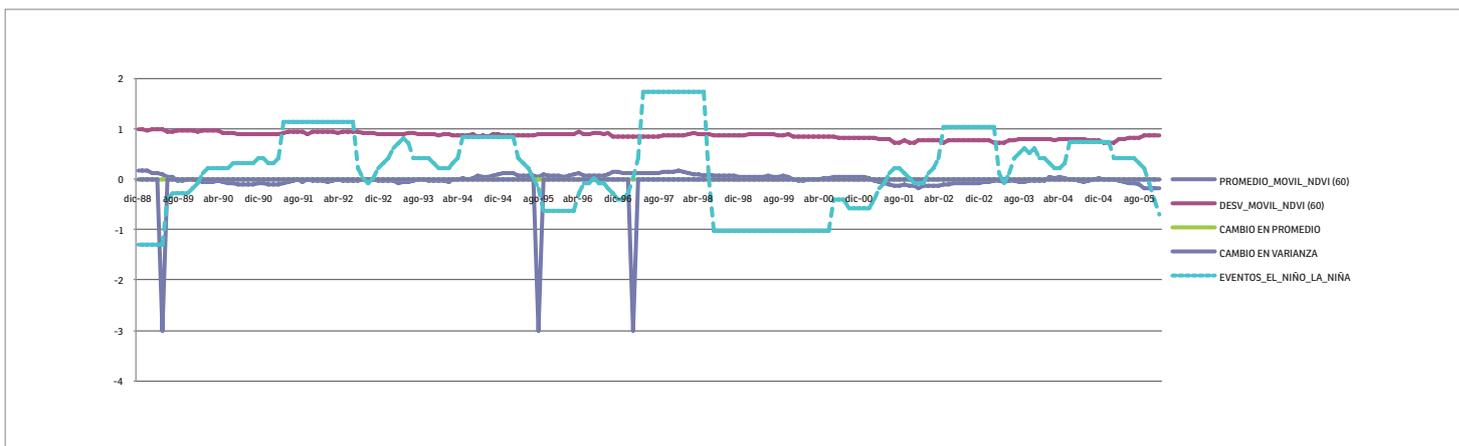
**Figura 19**

Detección de cambios en promedio y varianza en precipitación y fuentes de variabilidad, estación **El Cardón**.

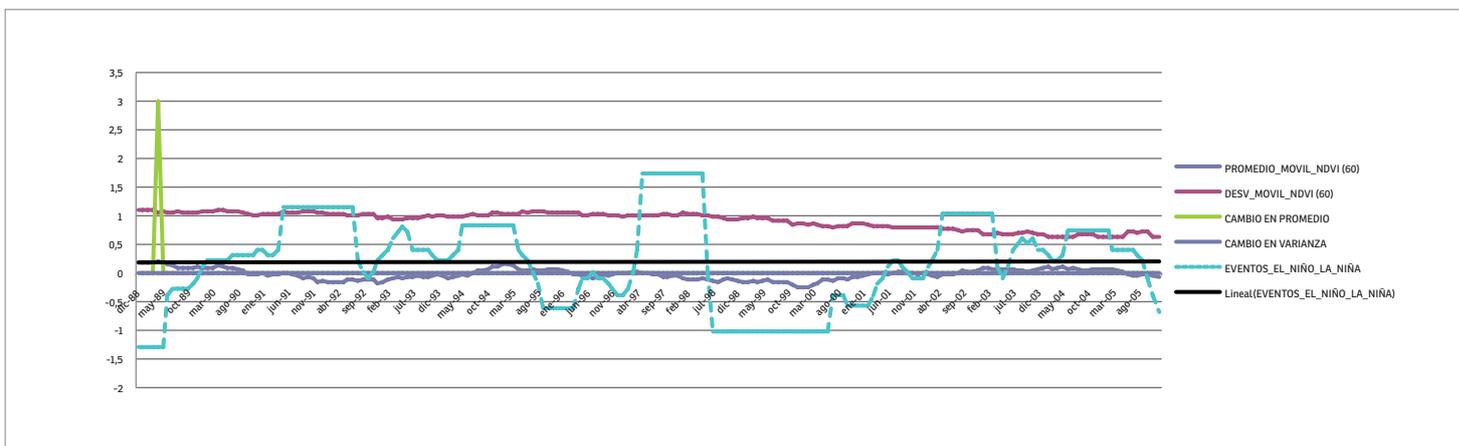




**Figura 20**  
 Detección de cambios en promedio (línea verde) y varianza (línea morada) en precipitación y fuentes de variabilidad, estación **Garrocho**.



**Figura 21**  
 Detección de cambios en promedio y varianza en precipitación y fuentes de variabilidad, estación **Satiavanorte**.



**Figura 22**  
 Detección de cambios en promedio y varianza en precipitación y fuentes de variabilidad, estación **Surbata Bonza**.

## Principales hallazgos

El enfoque metodológico planteado por Rodionov (2006) contribuye a la identificación de puntos de cambios en promedio y varianza de una forma sencilla en las series climáticas de anomalías de precipitación. Por otra parte, identificando regímenes de precipitación (meses consecutivos en un mismo estado de precipitación), en las estaciones analizadas se evidenció que dichos puntos de cambio coinciden con períodos de ocurrencia de eventos El Niño y La Niña y dinámicas de cambios de cobertura y uso del suelo, por ello se vislumbra como reto de investigación avanzar en el análisis de estas señales, pues se identificaron estaciones en las cuales ocurren simultáneamente ambas señales.

Los resultados de detección de cambios en el promedio de las series de anomalías de precipitación permiten identificar discontinuidades en las series de tiempo y localizar “tramos” en ellas (anomalías positivas o negativas). Por su parte, para las estaciones naturales los regímenes detectados evidencian series más homogéneas en comparación con las transformadas, es por ello que las estaciones con vecindad natural resultan ser lugares que experimentalmente favorecerían la realización de estudios relacionadas con la variabilidad climática natural en la escala local.

De acuerdo con los tipos de cambios identificados en las anomalías de precipitación, se evidencia que algunos de los regímenes identificados corresponden a cambios temporales en la serie generados por la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña. Desde la perspectiva de los cambios de cobertura y uso del suelo, estos generarían cambios de tipo gradual en las anomalías de la precipitación; sin embargo, este tópico requiere mayor investigación, pues la transformación de zonas naturales probablemente genera impacto en el clima de forma gradual a corto plazo (cinco años) y a largo plazo, considerando la interacción suelo (vegetación) – atmósfera en la escala local.

Analizando los cambios detectados tanto en promedio como en varianza en las anomalías de precipitación de 1984 a 2005 y las fuentes de variabilidad consideradas aquí, para las estaciones naturales se detectó que el mayor porcentaje de ellos se genera por su coincidencia temporal con las fases extremas de varia-

bilidad climática interanual (eventos El Niño y La Niña), posteriormente por cambios de cobertura y uso del suelo derivados de la señal del NDVI, en conjunto con la señal de cambio climático global. El 35% de estos cambios están relacionados con eventos El Niño (35%), seguido de aquellos derivados de ocurrencia de eventos La Niña (34,5%). El 30% restante es atribuible a cambios de uso del suelo y cobertura en combinación con la señal de cambio climático en la escala global. En las estaciones transformadas, un 31,8% de los cambios corresponden a ocurrencia de La Niña, un 9,4% son atribuibles a El Niño y un 3% está vinculado con modificaciones en los instrumentos de medición. Cerca del 56% de los cambios detectados estarían vinculados de manera conjunta con las dinámicas de transformación de cobertura y uso del suelo y la señal de cambio climático global.

Con respecto a la dinámica de cambio en la escala regional se identificó la mayor dinámica de *bosques a pastos* entre 1975 a 1985, mientras que de *páramos a pastos* en el período 1995 a 2005. En la escala local, los valores de NDVI filtrados mostraron un cambio al comparar los períodos 1984-1985 con 1995-2005, lo cual muestra un cambio en el uso del suelo y cobertura en la escala local.

## Modelamiento del efecto del cambio en la cobertura y uso del suelo en el clima local-regional

En evaluaciones ambientales, que se abordan para diversos propósitos, surge la necesidad de hacer el análisis del clima local y explicar los cambios que ocurren en el mismo. Dado que los cambios del clima en la escala local-regional son el resultado de la interacción de procesos globales, regionales y locales, generalmente se cae en el sesgo de atribuir los cambios mencionados a uno de los factores, lo que puede inducir errores en las conclusiones y en la toma de decisiones relacionadas con la solución de los problemas ambientales y la minimización de sus impactos.

De otra parte, los escenarios de cambio climático simulado con modelos climáticos regionales (MCR), por lo general, se centran en los procesos que son importantes para el clima a gran escala, siendo necesario incluir información sobre los cambios

climáticos locales tales como efectos orográficos, modificaciones del paisaje, respuestas fisiológicas, entre otros (Betts, 2005).

Lo anterior plantea la necesidad de indagar acerca de la proporción en la cual estarían actuando los factores de diversa escala que inciden en el cambio climático local. No obstante, aislar las señales local y global del cambio climático es una tarea compleja, la cual algunos investigadores han intentado abordar de diversas maneras, demostrando que tales cambios pueden afectar el clima en grandes regiones, a veces más que los cambios esperados de calentamiento global (Foley *et al.*, 2003). Adicional a lo anterior, en el ámbito colombiano son pocos los trabajos que se han realizado con el fin de identificar el efecto del cambio en el uso del suelo en el clima en escalas local y regional. Aunque se ha analizado el efecto de la urbanización (Pabón *et al.*, 1998; Poveda, 2008), los cambios en el clima local y regional causado por el cambio de cobertura vegetal han sido prácticamente inexplorados.

## Metodología

Con base en modelamiento, la identificación de la señal del efecto del cambio del uso de suelo en el clima de la región se realizó mediante las siguientes actividades:

- Simulación del clima de la región de estudio.
- Validación de las simulaciones del clima regional mediante comparación con datos provenientes de mediciones en estaciones climatológicas.
- Realización de los ajustes correspondientes para reducir las diferencias entre el clima real y el simulado.
- Simulación del clima cambiando en el modelo PreciS el uso del suelo utilizado en las primeras simulaciones.
- Comparación de los resultados del clima inicial y del clima con intervención en el uso del suelo.

## El modelo PreciS® y la simulación del clima regional

PreciS® (Providing Regional Climates for Impact Studies) es un modelo climático regional usado para elaborar escenarios de

cambio climático (Bashkaran *et al.*, 1996; Arnell *et al.*, 2003; Cao *et al.*, 2007; Alves & Marengo, 2009) en evaluación de impactos del cambio climático, en diferentes regiones del mundo. Este modelo permite simular la interacción de la superficie (suelo-cobertura vegetal) y la atmósfera, a través de la inclusión de las particularidades regionales vinculadas con los procesos de balance radiativo, dinámica de la circulación atmosférica en la mesoescala, ciclo de los sulfatos, formación de nubes y precipitación, así como la transferencia de masa y energía desde la cobertura vegetal y la capa del suelo a la atmósfera. Este modelo fue usado para realizar la simulación del clima en los Andes colombianos y los experimentos relacionados con cambio de cobertura y uso del suelo a escala local.

Para el componente de la superficie, PreciS® considera diferentes tipos de cobertura; así, en la simulación del clima regional se trabajó con el WHS (Wilson & Henderson-Sellers, 1985). Por otra parte, la información de las variables climatológicas (cuadrícula de 25 x 25 km) para el período 1960-2000 se obtuvo para el territorio colombiano; para efectos del presente trabajo se extrajeron los datos mensuales de temperatura y precipitación correspondientes a la región estudiada.

## Validación y ajuste de los resultados de la modelación con PreciS®

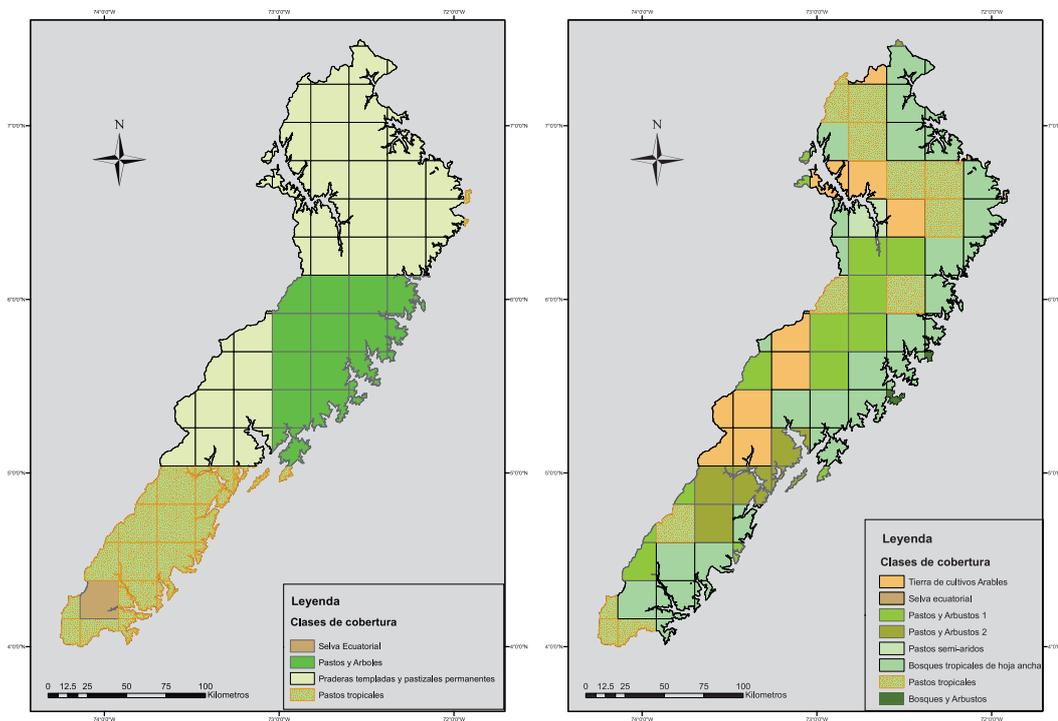
De los datos generados por el modelo se obtuvieron valores multianuales y las series de datos mensuales para el período 1961-1990 para 2 puntos con temperatura del aire y 22 con precipitación. La validación se efectuó a través de la comparación entre lo observado 1961-1990 (OBS) y lo simulado por PreciS® (SIM) para ese período. De esta forma, se compararon los valores multianuales, la distribución espacial de las variables, el ciclo anual y la variabilidad interanual. Igualmente, se calcularon los coeficientes de correlación entre las series observadas y las simuladas para establecer en cuáles puntos (lugares) se obtiene la mejor aproximación. Las series simuladas se ajustaron, reduciendo la diferencia de los valores medios de las dos series (observada y simulada), mediante la aplicación de un coeficiente obtenido a partir de la simple relación observado/simulado.

## Simulación de efecto del cambio de uso del suelo en el clima regional

Para establecer el efecto del cambio en el uso del suelo, se simuló el clima regional, reemplazando el uso del suelo WHS por el obtenido por el proyecto para el año 1985. La comparación de las dos coberturas se presenta en la Figura 23. La cobertura inicial (según WHS) es de baja resolución y se compone de cuatro categorías: (i) praderas templadas y pastizales permanentes, (ii) pastos y árboles, (iii) pastos tropicales y (iv) un área pequeña de selva ecuatorial. La cobertura incorporada para la simulación de la respuesta del clima al cambio de la cobertura y uso del suelo presenta mayor variabilidad y comprende ocho categorías, donde se resalta la presencia de la categoría “tierra de cultivos arables”. Con este cambio en el uso del suelo se realizó una nueva simulación del clima regional, estableciéndose las diferencias que podrían ser la señal del efecto del cambio en el uso del suelo en el clima local.

### Figura 23.

Visualización de la cobertura de Wilson & Henderson-Seller (izquierda) y la identificada por el estudio para el año 1985 (derecha), a partir de las cuales se realizó el modelamiento del clima con Preci<sup>s</sup>.



## Resultados

### Distribución de la temperatura observada y simulada

En la Figura 24 se presenta la comparación de la distribución espacial de la temperatura media anual del aire según las observaciones del período 1961-1990. En términos generales, se observa que el modelo alcanza a representar satisfactoriamente las distribuciones espaciales de esta variable, aunque se sobrestiman los valores.

Para la temperatura del aire, el mapa simulado no presenta los detalles del mapa observado porque Preci<sup>s</sup> tiene una orografía suavizada, pero muestra altas temperaturas para las zonas bajas y menores valores para las zonas altas.

La Figura 25 compara el comportamiento interanual de dos series de temperatura media anual observada y simulada, así como las series resultantes luego del ajuste realizado (lamentablemente sólo se contó con dos estaciones con observaciones de temperatura del aire con datos completos). El modelo simula satisfactoriamente el comportamiento interanual para la estación Surbatabonza, mientras que para la segunda estación (UPTC) hay una sobrestimación sistemática; no obstante, en esta última las variaciones también alcanzan a ser señaladas por el modelo. Asimismo, el coeficiente de correlación entre series observada y simulada es de 0,55, que es relativamente alto, mostrando un satisfactorio grado de cercanía entre realidad y modelo.

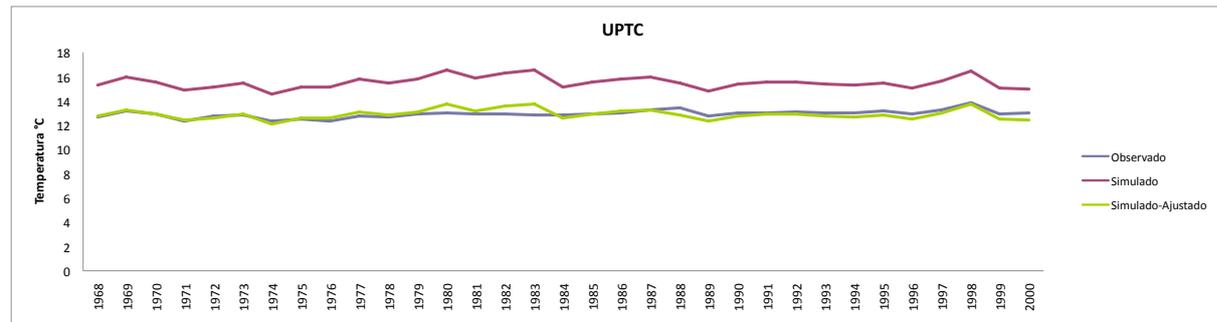
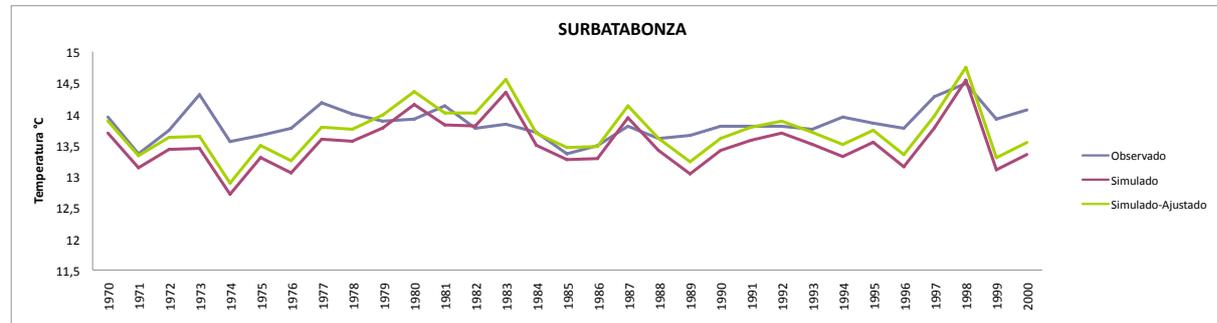
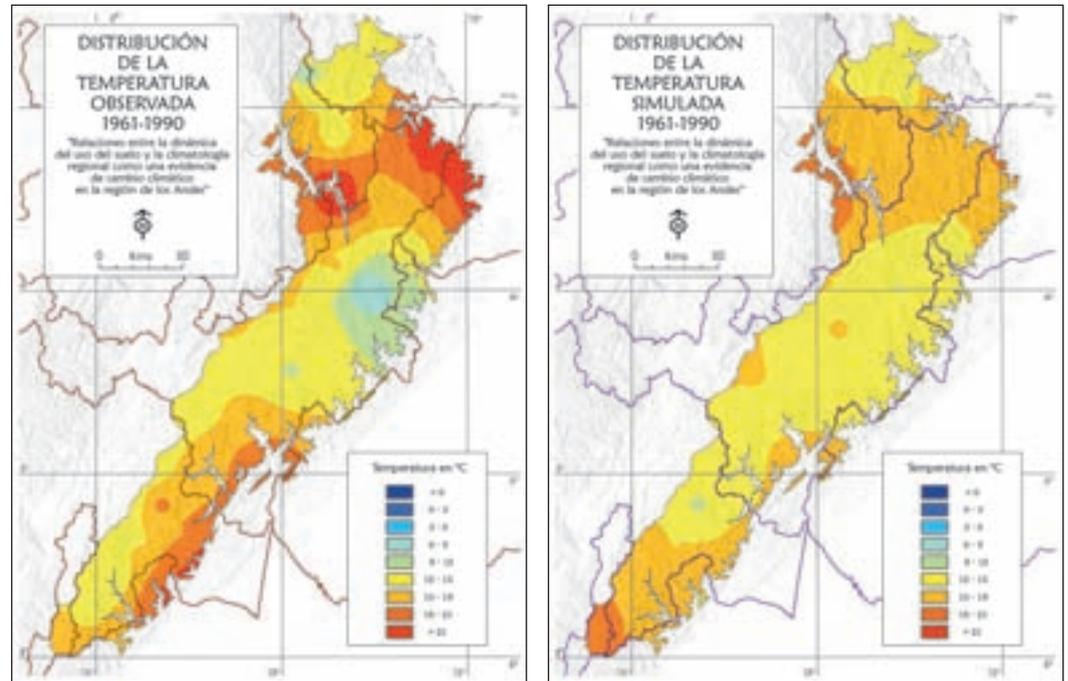
### Distribución de la precipitación observada y simulada

Es muy notorio que la precipitación es sobrestimada por Preci<sup>s</sup> (Figura 26), pero se puede apreciar una distribución espacial similar: las zonas muy lluviosas generadas por el modelo están en las zonas lluviosas observadas, las menos lluviosas sobre las secas. El coeficiente de correlación entre las dos distribuciones (observada y simulada) de la precipitación es 0,84, valor bastante alto que resulta de la similitud de estas dos distribuciones espaciales.

En la Figura 27 se presentan las series de precipitación para algunas de las estaciones analizadas, donde se aprecia la sobreestimación que ocurre que en la mayor parte de puntos. Aunque en la mayor parte las fases extremas (los picos) de la variabilidad interanual no coinciden, hay puntos en donde se logra una buena coincidencia (por ejemplo UPTC). En el caso de la estación La Gloria, la comparación pone en evidencia los problemas de la serie de mediciones entre 1975 y 1984.

La Tabla 4 presenta el coeficiente de correlación de series de precipitación. Sólo en dos estaciones los coeficientes alcanzan a sobrepasar un valor de 0,4. Al observar la distribución espacial de estos coeficientes, es posible detectar los sectores (en rojo y anaranjado) donde el acercamiento de lo modelado a lo observado podría ser satisfactorio (Figura 28).

Los resultados del análisis de los cambios en la temperatura del aire y en la precipitación generados por el cambio del uso del suelo en el modelo indican que la temperatura (datos de comprobación en cuatro estaciones) responde mayormente con descenso, aunque hay ligeros aumentos antes y después

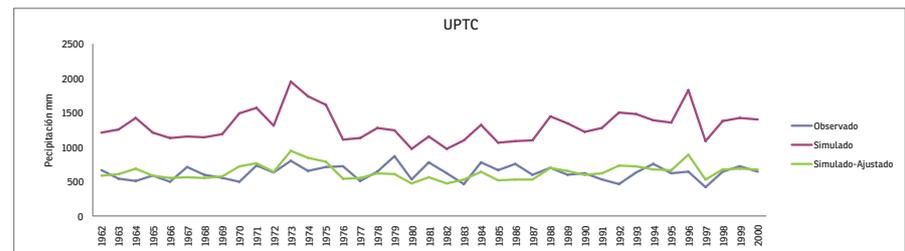
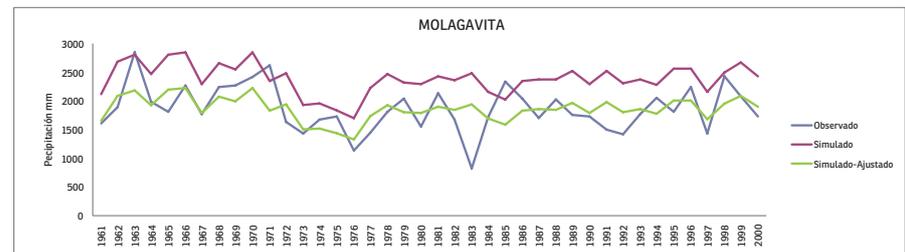
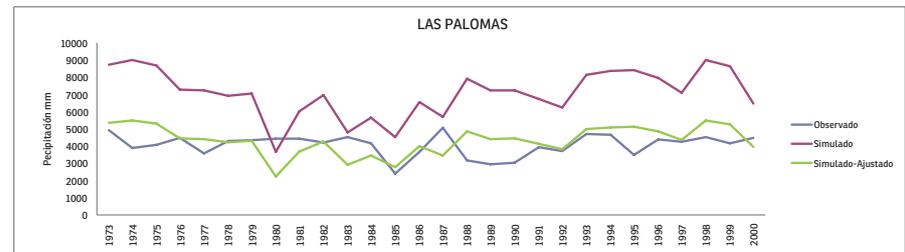
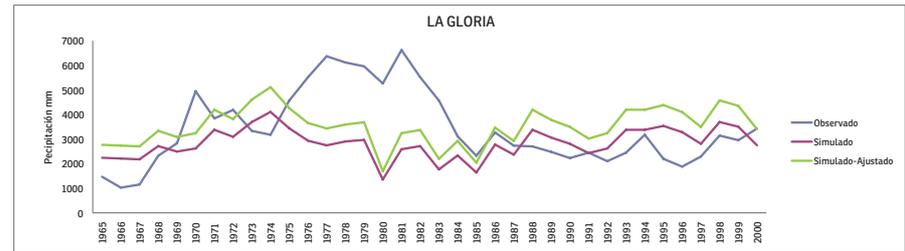
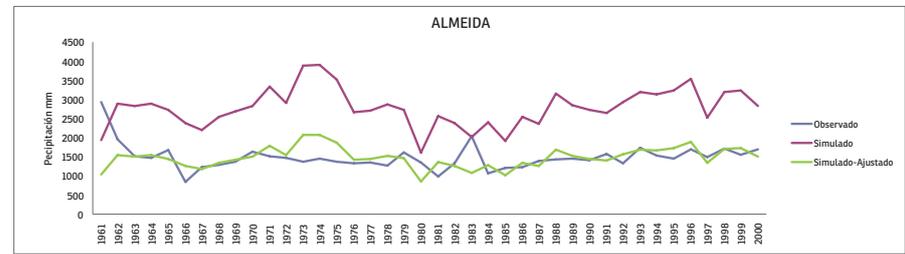
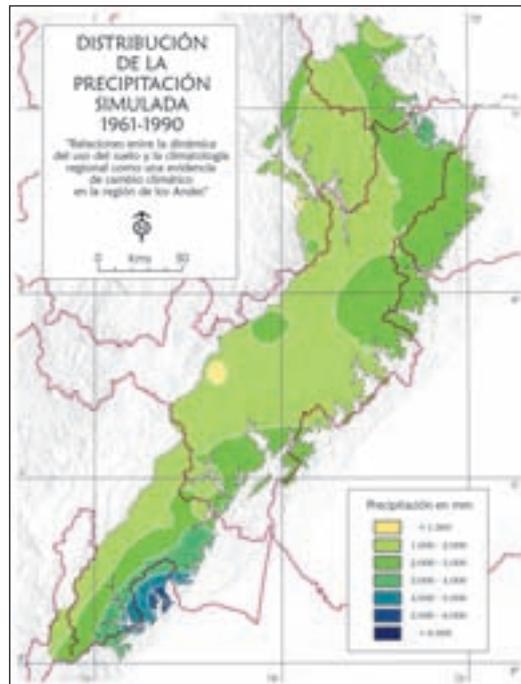
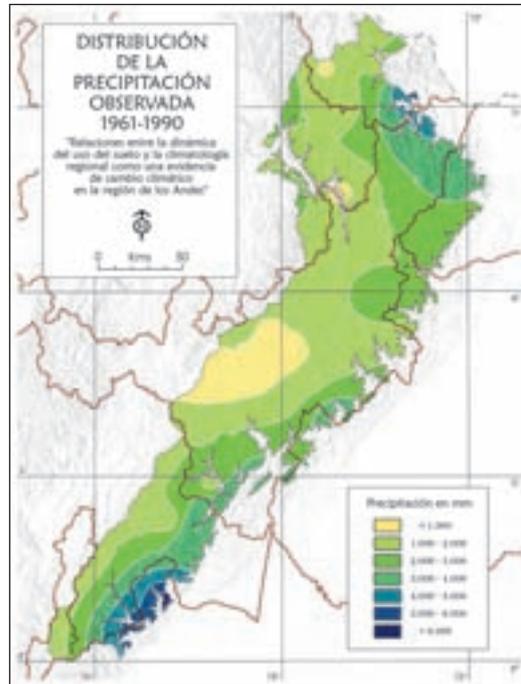


**Figura 24**  
Comparación de las distribuciones de temperatura media anual del aire observadas en el período 1961-1990 y la simulada para ese período con el modelo Precis®.

**Figura 25**  
Comparación de la variabilidad de la temperatura media anual del aire observada y simulada con Precis® para el período 1960-2000 y la correspondiente serie ajustada.

**Figura 26**

Comparación de las distribuciones de precipitación media anual del aire observadas en el período 1961-1990 y la simulada para ese período con el modelo PreciS®.



**Figura 27**

Comparación de la variabilidad de la precipitación media anual del aire observada y simulada con PreciS® para el período 1960-2000 y la correspondiente serie ajustada.

**Tabla 4**

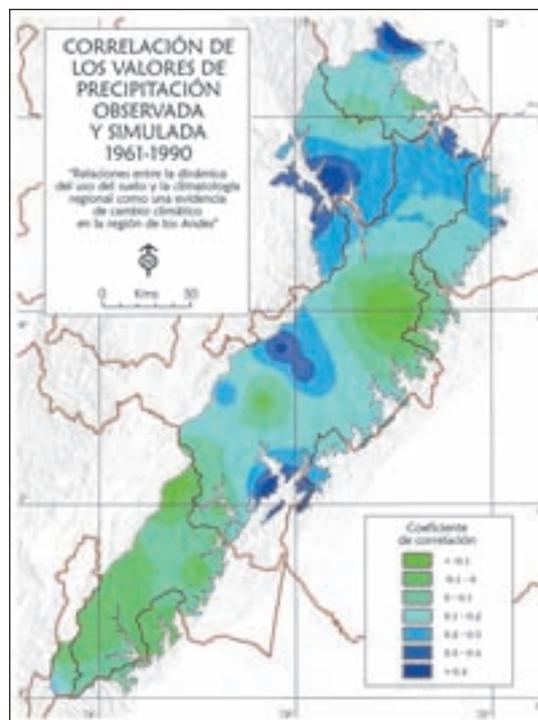
Coefficientes de correlación entre las series observadas y simuladas de las estaciones utilizadas para el análisis de la precipitación.

Estación	Coefficiente de correlación	Estación	Coefficiente de correlación
Almeida	-0,03	Molagavita	0,479
Apto. Alberto Lleras	0,365	Monfort	-0,062
Casa Amarilla	-0,124	Presidente	0,023
Amoladero	0,037	Santa María	0,17
El Cardón	-0,356	Sativanorte	-0,015
El Garrocho	0,009	Silos	0,133
Gama	0,093	Sitio Presa	0,199
La Gloria	-0,013	Surbata Bonza	0,426
Las Minas	-0,15	Susa	0,238
Las Palomas	0,09	Susumuco	-0,034
Manzanares	0,107	UPTC	0,255

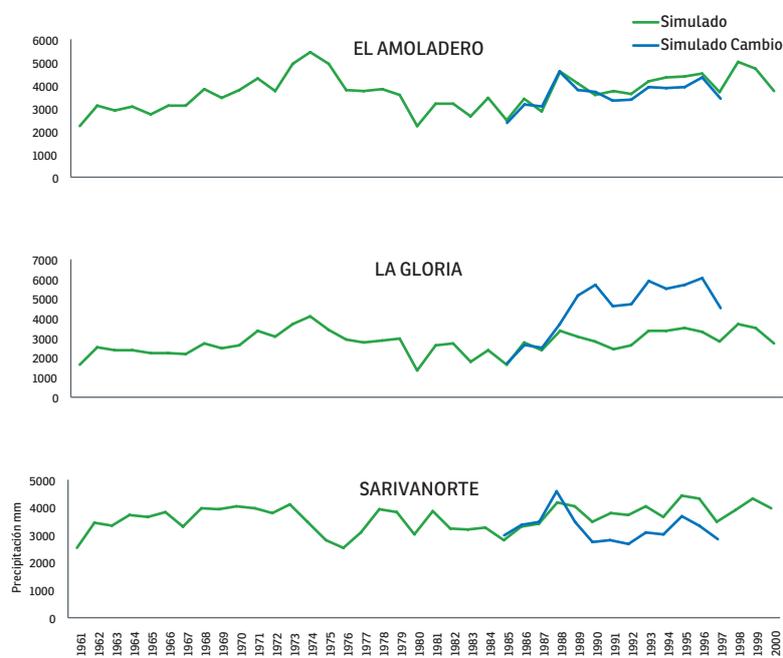
del descenso. Para la precipitación no hay un patrón general y los cambios son muy variados, pero se puede constatar que cuando se pasa de *tierra de cultivos arables* a *bosques tropicales de hoja ancha* tiende a aumentar la precipitación. En el cambio marcado de *pastizales y árboles* o *pastos tropicales* a *tierras de cultivos arables* el cambio no es en una única forma, pero tiende a llevar a aumento de la precipitación.

Un análisis de la distribución espacial de cambios en la precipitación permite establecer que en el sector centro-occidental y norte se ubican los aumentos. Llama la atención que esta zona es la que presenta el mayor cambio en las simulaciones: se cambia de “pastos y árboles” y de “praderas templadas y pastizales permanentes” a “tierra de cultivos arables”, resultado contrario a lo que generalmente se cree que ocurre cuando se pasa a cultivos.

El análisis de los cambios agrupados por medio del tipo de vecindad de cada estación “natural”, “seminatural” y “transformado” permite ver que en las áreas con ambiente natural,

**Figura 28**

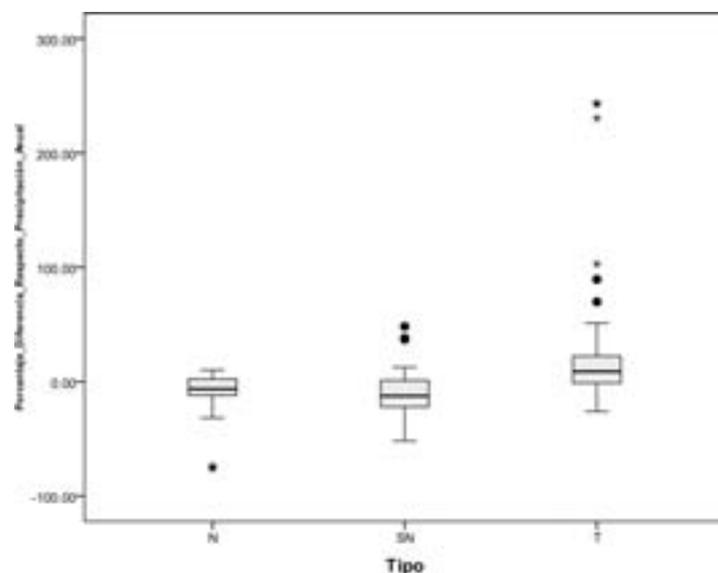
Distribución espacial de los coeficientes de correlación entre las series observadas y simuladas de las estaciones utilizadas para el análisis de la precipitación.

**Figura 29**

Secuencias comparativas de las series simuladas con el uso del suelo WHS y la serie generada con la intervención de otra cobertura vegetal diferente en 1985, para estaciones en ambiente “natural” (arriba), “seminatural” (en el medio) y “transformado” (abajo).

**Figura 30**

Gráficos de caja del porcentaje de cambio cuando se comparan la simulación con cobertura general con la cobertura detallada de acuerdo con las clases de Precipis®



los cambios en la precipitación no son tan grandes, mientras que en el seminatural” son bastante marcados. La Figura 29 resume este comportamiento y muestra cómo en las estaciones que se mantienen en el medio “natural”, los cambios son muy pequeños.

Lo anterior igualmente se corrobora mediante análisis estadístico de las diferencias resultantes de los dos simulaciones (con uso del suelo WHS y con uso del suelo del presente proyecto) agrupadas por categorías “natural”, “seminatural” y “transformada”. En la Figura 30 se presentan los *box-plot* para los cambios que ocurren en cada grupo de estaciones. Es posible constatar efectivamente que los menores cambios ocurren en las estaciones que se mantienen en ambiente natural y los mayores en transformado.

### Principales hallazgos

Con los experimentos efectuados a partir de modelamiento del clima regional fue posible establecer que, efectivamente, con cambios locales en el uso del suelo ocurren cambios de las variables climatológicas en la escala local. De igual manera, los cambios simulados fueron muy variados, aunque mostraron tendencias como la de poco cambio en ambientes naturales,

aumento de la precipitación cuando se pasa de *pastos y árboles* a *bosques tropicales de hoja ancha* y de *pastos y árboles* a *tierras con cultivos arables*. La diversidad en la respuesta a los cambios de uso del suelo puede resultar de la interacción de todos los cambios en diferentes lugares de la región, lo cual se debería corroborar con una exploración acerca de cómo funciona el modelo en este caso.

### Modelos de series de tiempo multivariadas y análisis factorial dinámico para evidenciar la relación entre cobertura y uso del suelo-clima

Existen varios acercamientos en la búsqueda de examinar las relaciones entre la cobertura de la Tierra y los cambios en el clima y en la escala global. Algunos estudios abordan esta interacción a partir de modelos, como en el caso de Brovkin *et al.*, (2006) que estiman el efecto del cambio de cobertura histórica (años 1000 a 1990), vinculada a la deforestación sobre el clima. Para ello emplean el modelo Climber-2 y los resultados indican que el cambio histórico de cobertura ha generado un enfriamiento de la superficie de la Tierra, en comparación con la cobertura natural en la escala global. Por su parte, Voltaire (2006) compara el impacto del cambio de uso del suelo en el clima y el cambio derivado por la emisión de gases de efecto invernadero, empleando el modelo de circulación general ARPEGE-Climat; este estudio concluyó que para la escala regional los cambios del uso del suelo pueden representar hasta un 30% del impacto generado por los gases efecto invernadero, y que los cambios del suelo son relevantes para el análisis de cambios probables sobre el clima.

En la escala local, y considerando la información de las estaciones meteorológicas, el uso de métodos estadísticos constituye una herramienta importante, pues permite analizar la variabilidad temporal de las series de tiempo de precipitación y temperatura, como también buscar el vínculo con el NDVI. Desde el punto de vista meteorológico, los métodos estadísticos no sólo han abordado los análisis de las series de tiempo y su interpretación física, sino también han aportado al análisis

de estructuras de datos multivariados, con el fin de estudiar la covariabilidad de procesos, al igual que la identificación de patrones espaciales y temporales (Storch y Zwiers, 1999; Wilks, 1995; Zwiers y Storch, 2004).

Para integrar los análisis de las series de NDVI, indicador proxy de cambio de cobertura y uso del suelo (Paruelo *et al.*; 2004), con las series de precipitación, algunos autores (Anyamba y Tucker (2005), Li *et al.* (2004), Serrano *et al.*, (2003), entre otros), han analizado las diferencias espaciales del NDVI y su relación con variables meteorológicas, principalmente precipitación. Para ello han empleado técnicas estadísticas basadas en coeficientes de correlación y comparación de patrones espaciales y temporales entre ambas series (Quiroz y Jong, 2005; Poveda *et al.*, 2000).

## Metodología

Para el establecimiento de las relaciones entre las series de precipitación con la serie del NDVI, como un índice de cambio en la cobertura y uso del suelo, se propusieron tres procedimientos estadísticos: análisis de series tiempo usando funciones de transferencia, análisis factorial dinámico para series de tiempo y análisis de series de tiempo usando modelos multivariados. Con el primer método se buscó establecer la relación existente entre NDVI y precipitación para cada estación. En el proceso se utilizaron series filtradas de NDVI (descontándose el componente de precipitación) y posteriormente, para el análisis de resultados, se generaron series de desviación estándar móvil de 60 meses tanto de NDVI filtrada como de precipitación, expresadas en anomalías.

El segundo método consistió en el análisis factorial dinámico, utilizando las mismas series, para identificar los factores comunes de tendencia temporal (Zuur y Pierce, 2004) y establecer si estos pueden discriminar las series que corresponden a estaciones con diferentes vecindades (naturales y transformadas). Posteriormente, se empleó el mismo método con cada subgrupo de series de NDVI filtradas y precipitación (naturales y transformadas) incluyendo sólo las estaciones que evidenciaron el mayor contraste en sus valores de NDVI y anomalías de precipitación

Finalmente, para analizar la interacción entre las dos series, se emplearon modelos de series multivariadas (VAR), los cuales permiten analizar el efecto marginal de un impacto unitario de la serie NDVI en la serie de precipitación usando la función respuesta al impulso, tal como lo define Lütkepohl (2005).

Es importante señalar que algunos análisis se efectuaron con las series de NDVI filtradas (descontando la variabilidad derivada de precipitación) y otros análisis se desarrollaron con las series de anomalías de NDVI sin filtrar (modelo de series multivariadas). Los resultados se ilustran con cuatro estaciones meteorológicas: Las Palomas y Susumuco (vecindad natural) y Sativanorte y Surbata Bonza (vecindad transformada), que evidenciaron contrastes en sus anomalías de NDVI y precipitación y que se vinculan con su estado natural y transformado.

## Resultados

### Modelos de función de transferencia

La Tabla 5 presenta los resultados de los modelos de funciones de transferencia para las estaciones analizadas. Para el componente de precipitación se observa que los rezagos varían entre 1 y 12 meses, y para las estaciones Amoladero, Monfort, Presidente y Susa, se evidenció una relación contemporánea (relaciones coincidentes en el mismo rango de tiempo) entre la serie de NDVI y precipitación, identificadas como rezago cero. Los rezagos para las estaciones seminaturales varían entre 2 y 14 meses para precipitación y en la estación El Cardón se estableció una relación contemporánea entre NDVI y precipitación. En las estaciones transformadas, los rezagos para precipitación varían entre 1 y 12 meses y en las estaciones Silos, Almeida y Gama se estimaron coeficientes de rezago cero.

Lo anterior evidencia que las series de NDVI no sólo poseen la señal derivada de la cobertura vegetal, sino que también contienen un componente climático representado en la precipitación. El hecho de que se encuentren rezagos, de orden cero y de orden 1, muestra que el NDVI está relacionado fuertemente de manera sincrónica con la precipitación y posee un efecto autorregresivo del mes anterior. Los coeficientes para el componente NDVI, principalmente de orden 1, evidencian un pa-

**Tabla 5**

Coefficientes estimados para los modelos de funciones de transferencia para las estaciones del área de estudio.

Tipo	Estación	Precipitación		NDVI		
		Coefficientes autoregresivos	AR (rezago)	Coefficientes autoregresivos	AR (rezago)	
Natural	El Amoladero	-0,11	0	0,21 0,14	1 3	
	Monfort	-0,11 -0,10	0 12	0,17	1	
	Susumuco	-0,14	11	0,16 -0,18	1 6	
	Sitio Presa	-0,17	1	0,18	1,00	
	Presidente	-0,19 0,14	0 1	0,19 0,10	1,00 3,00	
	Las Palomas	0,13 -0,17	12 4	-0,11 0,19	15,00 1	
	Susa	Susa	-0,22	0	0,19	1
			0,13	5	-0,13 -0,12 0,15	2 8 11
Seminatural	El Cardón	-0,17	0	0,24 -0,11	1 7	
	Santa María	0,10	11	0,18	1	
	El Garrocho	El Garrocho	0,21	2	0,30	1
			0,15	3	0,18	5
	Manzanares	0,12	14	-0,14 0,20 0,13	6 1,00 10,00	
Transformada	La Gloria	La Gloria	-0,14	5	0,15	1
			-0,12	3		
	Las Minas	0,14	2	-0,19	13	
	Casa Amarilla	Casa Amarilla	-0,11	12	0,27	1
			0,17	1	0,28	1
	Molagavita	Molagavita	0,17	1	0,22	1
			-0,14	2		
	Silos	Silos	0,15	12	0,14	1,00
			-0,09	0	-0,12	2,00
	Almeida	Almeida	-0,19	3	0,14	3,00
			-0,12	0	-0,13	4,00
	Gama	Gama	-0,21	0	0,32	1
			-0,10	4	0,26	1,00
	A. Alberto Lleras	A. Alberto Lleras	-0,13	7	-0,12	9,00
			0,23	1	0,21	1
	Sativanorte	Sativanorte	-0,21	0	-0,12	11
0,17			1	0,16	1	
Surbata Bonza	Surbata Bonza	0,24	2			
		0,19	1			
UPTC	UPTC	0,13	3	0,20	1,00	
		-0,11	6	-0,11	2,00	
UPTC	UPTC	0,14	10			
		-0,10	12			
UPTC	UPTC	0,18	1			
		0,20	2	0,35	1,00	
UPTC	UPTC	0,14	3	0,13	8,00	
		-0,15	6			

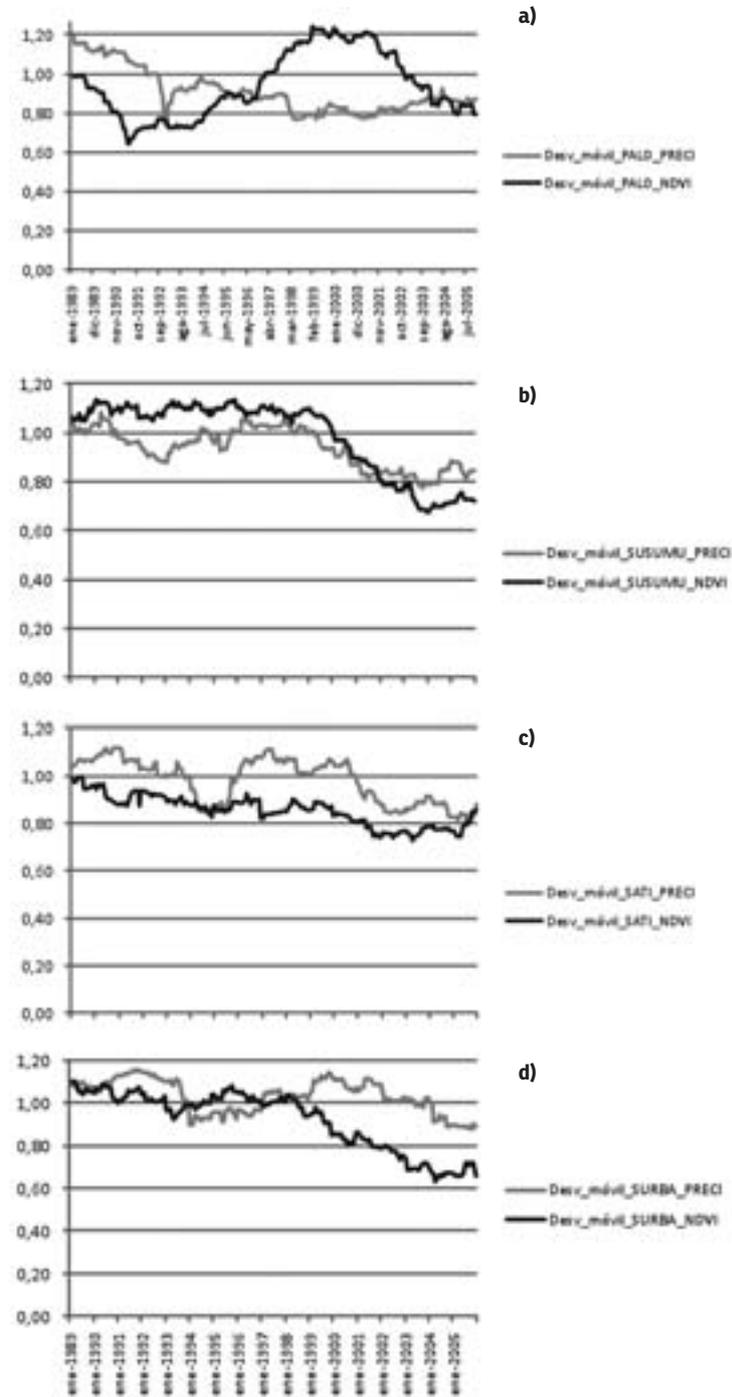
trón autorregresivo coincidente con la modelación de algunas variables meteorológicas como precipitación y temperatura.

Con respecto a la relación entre las series de NDVI filtradas y precipitación, la Figura 31 presenta la media móvil de la desviación estándar de las series de anomalías. En la estación Las Palomas la correlación es de  $-0,55$ , es decir, que mientras la precipitación disminuye en la variabilidad, el NDVI tiende a aumentar; adicionalmente se observa un cambio de direccionalidad en la desviación estándar después del año 1992. Por su parte, en la estación Susumuco hay una correlación positiva de  $0,85$  entre las series; esto significa que las dos series covarían y se detecta que después de 1993 la pendiente cambia, es decir, después de este año se generó una disminución mayor en la variabilidad, comparado con el período 1984 a 1992, y después del año 1999 se observa un ligero aumento en la variabilidad.

De otra parte, en la estación Sativanorte (correlación de  $0,70$ ), la serie de precipitación evidencia cambios ligeros en la variabilidad aproximadamente en los años 1990 y 1991. Para la estación Surbata se evidencia una correlación de  $0,39$  entre las dos series presentándose un cambio de la variabilidad aproximadamente en el año 1993, pues para el período previo 1984 a 1992 la variabilidad aproximadamente permaneció constante en ambas series.

Teniendo en cuenta que la serie de desviación estándar móvil de NDVI es un indicador proxy de cambio de cobertura y uso del suelo, los puntos de cambio de esta serie indican precisamente fechas de cambio en la cobertura. Para tres de las cuatro estaciones analizadas los períodos asociados a esta dinámica de transformación corresponden a 1992 y 1993, donde se evidenciaron dinámicas de pérdida de ecosistemas naturales (Susumuco) y una conversión hacia sistemas con predominancia en pastos (Sativanorte y Surbata).

Adicionalmente, los diferentes grados de correlación entre estos pares de series revelan cómo las dinámicas de cambio de uso del suelo modulan la variabilidad de la precipitación, sin desconocer que la precipitación genera valores particulares de NDVI en períodos de tiempo de ocurrencia de El Niño y



**Figura 31**  
Series de desviación estándar móvil de anomalías de precipitación y NDVI filtrada (promedio móvil orden 60), estaciones (a) Las Palomas (b) Susumuco, (c) Sativanorte y (d) Surbata.

La Niña, concluyendo que las relaciones entre estas series son complejas e interdependientes.

### Análisis factorial dinámico con series temporales

Al abordar el análisis factorial dinámico con las series de anomalías de precipitación, se presentó un agrupamiento de las estaciones seleccionadas en el estudio, en función de su intensidad de transformación, discriminando las estaciones naturales y transformadas. En el primer grupo se incluyó casi la totalidad de las estaciones con vecindad natural y seminatural (Palomas, Susumuco, Amoladero, Monfort, Santa María y El Cardón) y en el segundo grupo gran parte de estaciones con vecindad transformada (UPTC, Surbatá, Molagavita, Aeropuerto Alberto Lleras, Sátiva Norte, Silos y Casa Amarilla); el valor que permite discriminar estos dos grupos de estaciones respecto al factor 2 es 0,375.

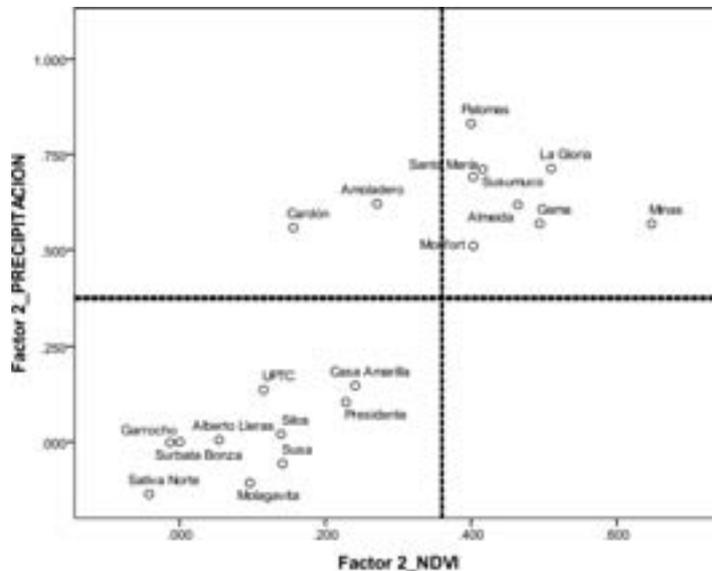
Para el caso de NDVI, el poder discriminatorio no es tan fuerte debido a que la variabilidad temporal de estas series tiende a ser similar en las estaciones con vecindad natural y transformada, aún cuando el NDVI previamente había sido filtrado. Esto revela que estas series probablemente poseen varias señales de tipo climatológico que el método de filtrado no alcanza a eliminar.

Conviene tener presente que las series de NDVI conforman también dos grupos. El primero, compuesto tanto por estaciones naturales (Amoladero, Monfort, Susumuco y Palomas) como por estaciones transformadas (Las Minas, Gama, Almeida, La Gloria), y el segundo con predominancia de estaciones transformadas (UPTC, Surbatá, Molagavita, Alberto Lleras, Sátiva Norte, Silos y Casa Amarilla). El valor que permite discriminar estos dos grupos de estaciones respecto al factor 2 es 0,36.

La Figura 32 presenta el ordenamiento de las estaciones de acuerdo con el valor del segundo factor obtenido con las series de anomalías de precipitación (eje vertical) y NDVI filtrado (eje horizontal), respectivamente. Según estos resultados, se observan dos patrones de estaciones; el primero conformado por tres estaciones con vecindad natural (Susumuco, Palomas y Monfort) y el segundo por siete estaciones con vecindad transformada (Sativanorte, Surbata, UPTC, Alberto Lleras, Silos, Casa Amarilla y Molagavita).

De acuerdo con el resultado anterior, y a efectos de identificar el contraste temporal entre las estaciones naturales y las transformadas, se aplicó el análisis factorial dinámico a estos dos grupos de estaciones. En la Figura 33 se muestran los valores estimados para las series de anomalías de precipitación (línea negra) y las series de anomalías de NDVI (línea roja) para las estaciones con vecindad natural, donde se observa que el patrón temporal de las series de NDVI estimadas es homogéneo, indicando que la dinámica de cambio de cobertura y uso del suelo en estas localidades es baja, pues su valor promedio de tasa de cambio anual de coberturas naturales entre 1985 y 2005 sólo alcanzó el  $-0,30\%$  y las conversiones a pastos y cultivos fueron bajas (entre  $-0,44\%$  y  $-1,26\%$  anual). Para este escenario la evidencia empírica muestra que el patrón temporal correspondiente a las series de anomalías de precipitación oscila aproximadamente entre  $-1,5$  y  $1,5$ .

De otro lado, en la Figura 34 se ilustran los resultados para el grupo de estaciones transformadas, donde las series de NDVI estimadas son series heterogéneas; ello significa que la dinámica de transformación ha sido acelerada, pues la tasa de cambio de coberturas naturales fue de  $-0,64\%$  anual y las conversiones a pastos y cultivos alcanzaron valores positivos de tasas anuales



**Figura 32**

Plano factorial de las estaciones meteorológicas basado en las series de tiempo de anomalías de precipitación y NDVI filtradas.

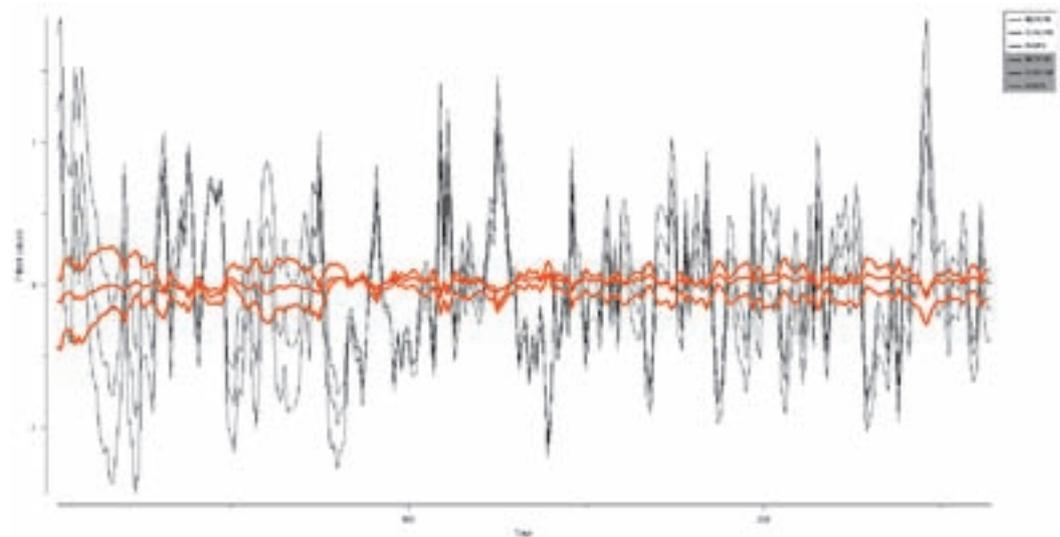
de 0,27 y 0,63%. Para este escenario, las anomalías de precipitación fluctúan aproximadamente entre -1,5 y 2, es decir, que el ambiente circundante de estas estaciones está caracterizado por un patrón de precipitación temporal con mayor amplitud en las anomalías de precipitación, comparado con las estaciones de vecindad natural.

Como conclusión, la señal de cambio de uso del suelo y cobertura, representada por las series estimadas de NDVI, se ve reflejada en series heterogéneas para condiciones transformadas, y las anomalías de precipitación poseen un ligero aumento en su amplitud, manifestándose anomalías positivas (excesos de precipitación) que alcanzan valores de hasta 2 para las estaciones transformadas, mientras que para las estaciones naturales estos valores no superaron el valor de 1,5.

### Modelos de series multivariadas

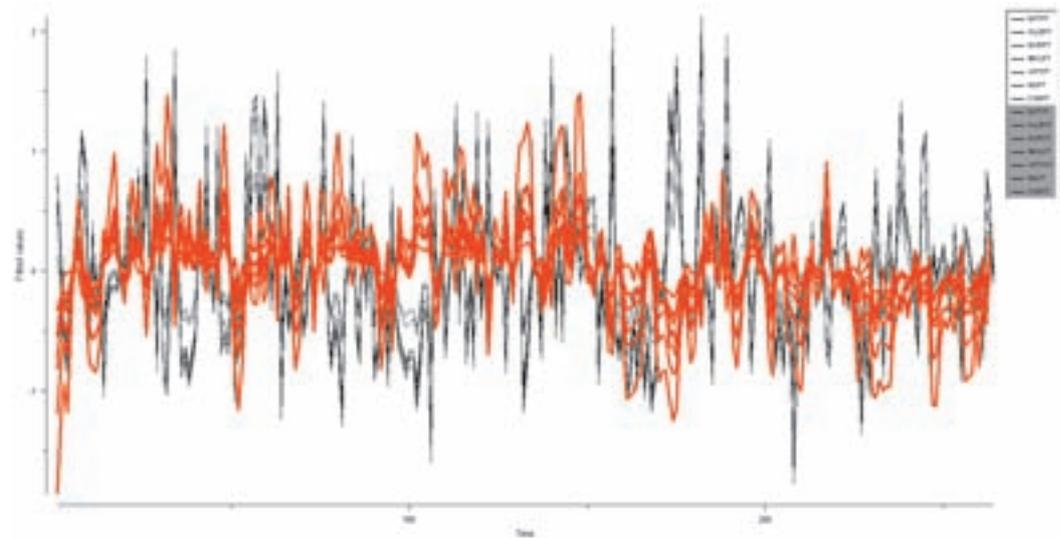
Para las estaciones naturales se encontraron coeficientes significativos en precipitación que corresponden a los rezagos 1, 2 y 6, mientras que para las estaciones transformadas estos coeficientes de precipitación son del orden de 4 y 6. La relación precipitación – NDVI en estaciones naturales evidenció un coeficiente con rezago de orden 5, mientras que para la estación Sativanorte no se detectaron coeficientes significativos y para Surbata se identificaron coeficientes del orden de 3 y 5. Respecto a los coeficientes de NDVI, los más significativos en las estaciones con vecindad natural son del orden de 1 y 6, mientras que para las estaciones con vecindad transformada son de rezago 1 y 2.

Considerando el enfoque de la función de respuesta a impulso, en las estaciones con vecindad natural se evidencia una respuesta intermitente en los primeros cinco meses en la precipitación, es decir, que los cambios de cobertura y uso del suelo, expresados en la serie de NDVI, modulan la variabilidad de la precipitación con tendencia a generar anomalías negativas, principalmente cinco meses después. Para las estación Sativanorte y Surbata (vecindad transformada), se evidencia que, al generar cambios en NDVI, la respuesta en la precipitación tiende a aumentar seis meses después, produciendo anomalías positivas (figuras 35 y 36).



**Figura 33**

Valores estimados de anomalías de precipitación (línea negra) y anomalías de NDVI filtradas (línea roja) para el grupo de **estaciones naturales**.

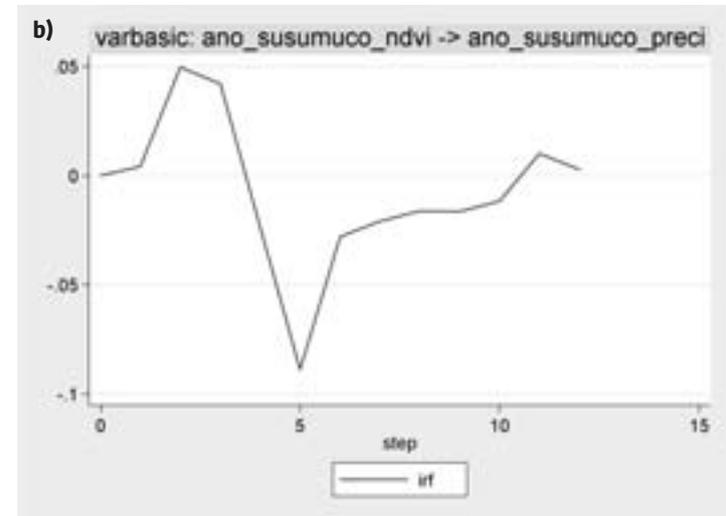
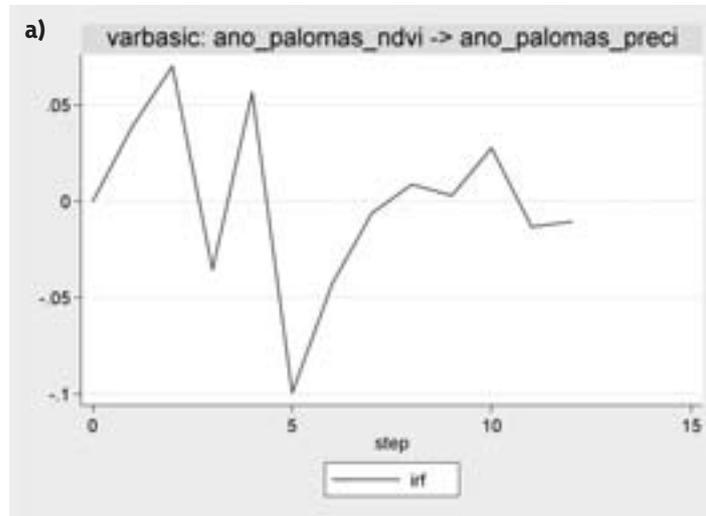


**Figura 34**

Valores estimados de anomalías de precipitación (línea negra) y anomalías de NDVI filtradas (línea roja) para el grupo de **estaciones transformadas**.

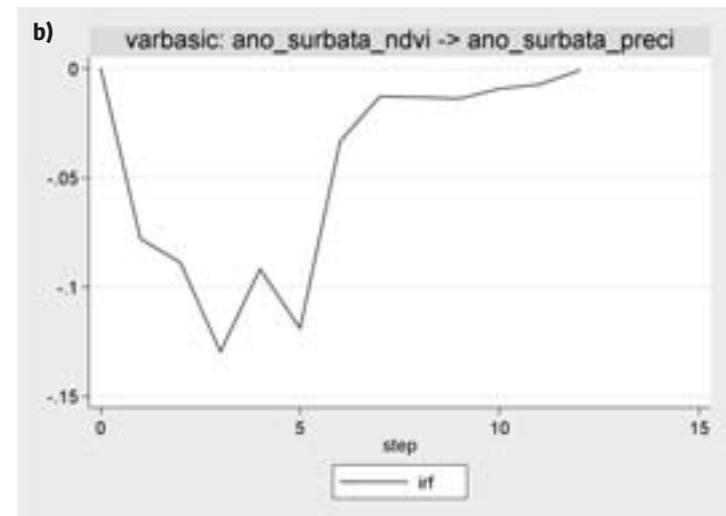
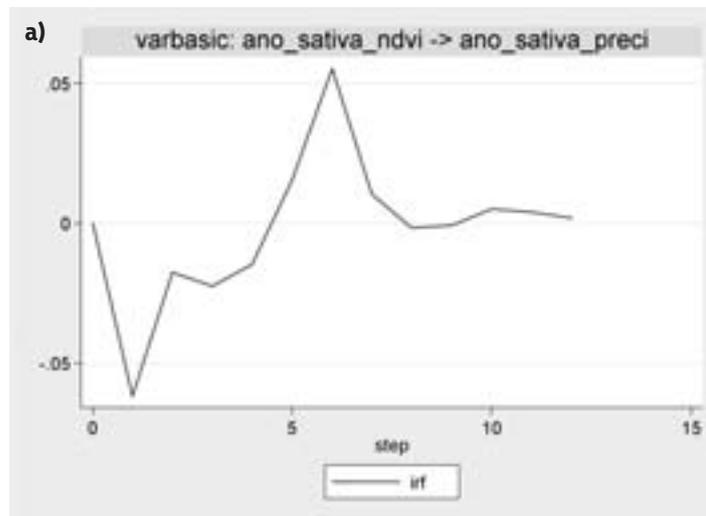
**Figura 35**

Función de respuesta al impulso, serie respuesta: anomalías de precipitación y serie impulso: anomalías de NDVI no filtrada (a) Las Palomas, (b) Susumuco.



**Figura 36**

Función de respuesta al impulso, serie respuesta: anomalías de precipitación y serie impulso: anomalías de NDVI no filtrada (a) Sativanorte, (b) Surbatá.



De lo anterior se concluye que la alteración en el uso y la cobertura del suelo genera un cambio en la precipitación de manera rezaga, es decir, que cambios actuales en el uso del suelo tendrían efectos sobre la precipitación entre uno y tres meses después en esta escala de análisis. Vale la pena acotar que esta metodología mostró ser muy sensible al cambio del impulso generado por el NDVI sobre la precipitación.

### Principales hallazgos

Desde el punto de vista de las funciones de transferencia se logró identificar diferentes grados de correlación entre NDVI y precipitación y la interdependencia de estas dos series; por un lado, las series de NDVI modulan parte de la variabilidad de la precipitación y al mismo tiempo, en particular en épocas de ocurrencia de eventos El Niño y La Niña, se generan cambios importantes

en los valores de NDVI. La evidencia empírica mostró que el indicador de la desviación estándar móvil detectó puntos de cambio en el NDVI que revelan cambios de cobertura y uso del suelo, principalmente para los años 1992 y 1993, proceso que genera un cambio en las fluctuaciones de precipitación.

Adicionalmente, mediante el análisis factorial dinámico se identificaron dos grupos de estaciones con situaciones contrastantes respecto a las anomalías de precipitación que coinciden con estaciones con vecindad natural y transformada, mientras que para las anomalías de NDVI la discriminación entre las mismas estaciones no es clara. Lo anterior reafirma que en las series de NDVI filtradas aún persisten señales que no sólo dependen del uso del suelo, sino también de otros factores.

Las estaciones transformadas con una dinámica de cambio mayor presentan series de NDVI de mayor heterogeneidad, es-

timadas bajo el enfoque del modelo factorial dinámico; desde el punto de vista climático, para este grupo de estaciones se detectó que la amplitud de las anomalías de precipitación es ligeramente mayor que la de las estaciones con un ambiente natural. Estos resultados son coherentes con lo hallado en el tema de detección de cambios y caracterización de las longitudes promedio de regímenes para las estaciones naturales y transformadas.

Los enfoques metodológicos contribuyeron básicamente a avanzar en dos aspectos vinculados con la pregunta de investigación del Proyecto: i) el ordenamiento parcial de las estaciones analizadas respecto a la variabilidad temporal de precipitación y de NDVI y ii) la evaluación de la respuesta de la precipitación generada por cambios de cobertura y uso del suelo representados en el NDVI filtrado (impulso).



Caída de agua, Boyacá. Foto: José Mauricio Salcedo

|||||

# Conclusiones generales y referencias



---

## Conclusiones generales

Como resultado del estudio se evidenció que la dinámica de cambio de cobertura y uso del suelo ha generado un cambio en el clima en la escala local, el cual es diferencial tanto espacial como temporalmente. En consecuencia, los cambios en el clima se traducen en la detección de cambios en el nivel en las series de anomalías de precipitación, cambios en la variabilidad y cambios en su amplitud, provocando series heterogéneas.

No obstante, la señal de cambio de uso del suelo, y su correspondencia con la modificación en el clima local, no se presentó de manera homogénea en las 22 estaciones meteorológicas analizadas en el estudio. Para el caso de las estaciones con vecindad natural sólo el 43% evidenció un contraste en sus valores de NDVI y precipitación; para las estaciones transformadas, el 63% permitió detectar estos contrastes.

Así mismo, se pudo establecer que bajo el enfoque de Rodionov en las anomalías de precipitación, la señal de cambio de uso del suelo se manifiesta de forma particular en la escala local, generando cambios en las anomalías de la precipitación en lapsos de tiempo posteriores a los momentos de detección de cambio de uso del suelo. Estos lapsos pueden fluctuar desde pocos meses hasta períodos que superan cinco años; sin embargo, esta identificación de señales de cambio de uso del suelo puede superponerse con la señal derivada de la ocurrencia de las fases extremas de la variabilidad climática (eventos El Niño y La Niña).

Igualmente, al contrastar estaciones con vecindad natural y transformada, desde este enfoque, se identificaron longitudes de regímenes promedio diferentes, donde las estaciones con vecindad transformada evidencian mayor variabilidad, lo cual significa que los procesos de transformación de la cobertura y uso del suelo provocan una dinámica del clima local más heterogénea, comparada con la variabilidad climática natural mejor representada en los ambientes con vecindad natural.

La señal relacionada a las fases extremas de variabilidad climática interanual en la escala local resultó ser más sensible en estaciones naturales que en transformadas. Esto significa que la señal vinculada con cambios de cobertura y uso del suelo (escala regional y local), en conjunto con el cambio climático global (escala global), se ve más reflejada en las estaciones transformadas, donde los cambios relacionados con estos dos procesos alcanzaron valores de 55,8%, mientras que para las estaciones naturales el valor fue del 30%.

Con respecto a las tasas de cambio y al ordenamiento de las estaciones naturales y transformadas en función de series de NDVI y precipitación, se detectó que en las estaciones transformadas la tasa de cambio fue del doble (valor promedio  $-0,63\%$  anual) de las estaciones naturales (valor promedio  $-0,30\%$ ). Esta situación se vio reflejada en la heterogeneidad de las series de NDVI y en la amplitud de las anomalías de precipitación.

De igual manera, se evidenció una alta sensibilidad en los efectos marginales de la precipitación al cambio en la variación del NDVI (modelo impulso-respuesta). En este contexto, se requiere investigar cómo la dinámica de transformación de cobertura y uso del suelo puede generar cambios en el clima local de manera rezagada y de manera gradual en el tiempo.

De otra parte, los métodos estadísticos que fueron abordados para responder la pregunta de investigación de este estudio, como el enfoque de Rodionov y el análisis factorial dinámico, resultaron ser útiles para analizar e identificar regímenes en las anomalías de precipitación en la escala local, y buscar un ordenamiento de las estaciones en función de la cobertura y uso del suelo y algunas variables climatológicas como precipitación.

Por otro lado, a partir del modelamiento del clima regional fue posible establecer que, efectivamente, con cambios locales en el uso del suelo ocurren cambios de las variables climatológicas en la escala local. De igual manera, los cambios simulados fueron muy variados, aunque mostraron tendencias de poco cambio en

ambientes naturales. También se concluyó que la diversidad en la respuesta a los cambios de uso del suelo puede resultar de la interacción de todos los cambios en diferentes lugares de la región, lo cual se debería corroborar con una exploración acerca de cómo funciona el modelo en este caso.

El desafío actual es entonces encontrar el método más adecuado, o la combinación de métodos para vincular la interacción entre cambio climático y uso del suelo a nivel regional-local, que integre las diferentes propiedades de la atmósfera y la superficie, los procesos fisiológicos de cultivos, las escalas espaciales y temporales, y también consideren al ser humano como un tipo de intervención directa representada por la modificación de la cobertura y uso del suelo. En este sentido, cualquier evaluación de la expresión local del cambio en el clima futuro debe tener en cuenta el uso de la tierra en las prácticas locales. Los estudios, particularmente en las regiones montañas o andinas, darán pautas para avanzar en el conocimiento de la vulnerabilidad de estos ecosistemas a diferentes procesos de cambio con sus implicaciones ambientales, económicas y culturales.

---

## Referencias

- Agarwal, C., Green, G.M., Grove, J.M., Evans, T.P. & Schweik, C.M. (2002). A Review and Assessment of Land Use Change Models: Dynamics of Space, Time, and Human Choice. CIPEC Collaborative Report No. 1. USFS Publication GTRNE 297. Joint publication by the Center for the Study of Institutions, Population, and Environmental Change (CIPEC) at Indiana University–Bloomington and the USDA Forest Service. Burlington, Vt.: USDA Forest Service Northeastern Forest Research Station. URL: [http://nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr\\_ne297.pdf](http://nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_ne297.pdf).
- Alves, L.M. & Marengo, J. (2009). Assessment of seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. *Theor. Appl. Climatol.*, DOI 10.1007/s00704-009-0165-2 [http://precis.metoffice.com/Useful\\_Links/Publications/Alves\\_2009.pdf](http://precis.metoffice.com/Useful_Links/Publications/Alves_2009.pdf)
- Anyamba, A. & Tucker, C.J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA–AVHRR NDVI data from 1981–2003. *Journal of Arid Environments* 63:596–614
- Arnell, N. W., Hudson, D.A. & Jones, R.G. (2003). Climate change scenarios from a regional climate model: estimating change in runoff in southern Africa. *J. Geophys. Res.*, 108(D16), pp. 4519–4536.
- Aspinall, R.J. (2004) Modelling land use change with generalized linear and generalized additive models – a multi-model analysis of change between 1860 and 2000 in Gallatin Valley, Montana. *Journal of Environmental Management*, 72, 91–103.
- Barbosa, H.A., Huetea, A.R. & Baethgenb, W.E. (2006). A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. *Journal of Arid Environments* 67:288–307.
- Betts, R. A. (2005). Integrated approaches to climate–crop modelling: needs and challenges. *Phil. Trans. R. Soc. B* (2005) 360, 2049–2065
- Bhaskaran, B., Jones, R.G., Murphy, J.M. & Noguera, M. (1996). Simulations of the Indian summer monsoon using a nested regional climate model: domain size experiments. *Clim. Dyn.*, 12, pp. 573–587.

- Brovkin, V., Claussen, M., Driesschaert, E., Fichefet, T., Kicklighter, D., Loutre, M. F., Matthews, H. D., Ramankutty, N., Schaeffer, M. & Sokolov, A. (2006). Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity. *Climate Dynamics*
- Buytaert, W., Celleri, R., De Bievre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean paramos. *Earth Science Reviews* 79, 53–72.
- Cabral, P. (2008). Markov processes in modeling Land Use and land Cover Change in Sintra–Cascais (Portugal).
- Cabrera, E. y Ramírez, D. (2007). Estado actual y cambio en los ecosistemas de los Andes Colombianos: 1985–2005. pp. 39–63. En: Armenteras, D. y Rodríguez, N. (Eds.). 2007. Monitoreo de los ecosistemas andinos 1985–2005: Síntesis y perspectivas. Instituto de Investigación Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia. 174 p.
- Cao L.J., Dong W.J., Xu Y.L., Zhang, Y. & Sparrow M. (2007). Validating the runoff from the PRECIS model using a large-scale routing model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24 (5), pp.855–862.
- CDB – Secretariat of the Convention on Biological Diversity. (2009). Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change. Montreal, Technical Series No. 41. 126 p.
- Ceballos, J. (2009). Manifestación del Cambio Climático “Los glaciares en Colombia”. *Calentamiento Global, mas ciencia, mejores políticas*. Revista La Tadeo 63.
- CGER, Committee to Evaluate Indicators for Monitoring Aquatic and Terrestrial Environments. (2000). Appendix B, Markov matrices of Landscape Change. *Ecological Indicators for the Nation*, National Academy Press, 2101 Institution Ave., N.W., Box 285, Washington, DC 20055 198 pp. Disponible en línea en: [http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=9720&page=159](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=9720&page=159).
- Chapin, F.S., III, Zaveleta, E.S., Eviner, V-T., Naylor, R.L., Vitousek, S P., Lavorel, M., Reynolds, H.L., Hooper, D.U., Sala, O.E., Hobbie, S.E., Mack, M.C. & Diaz, S. (2000). Consequences of changing biotic diversity. *Nature* 405: 234–242.
- Cleland, E.E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H.A. & Schwartz, M. D. (2007) Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(7): 357–365.
- De Chazal, J. & Rounsevell, M. (2009). Land-use and climate change within assessments of biodiversity change: A review. *Global Environmental Change* 19 306–315
- DeFries R., Hansen M., & J. Townshend. (1995). Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR Pathfinder data. *Remote Sensing of Environment* 54:209–222.
- Duraiappah, A., Naeem, S., Agardi, T., Ash, N., Cooper, D., Díaz, S. and others (eds.). (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Island Press, Washington, DC, 100 pp.
- ENA, Encuesta Nacional Agropecuaria. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Corporación Colombia Internacional. (2008). *Sistema de Información de la Oferta Agropecuaria, Forestal Pesquera y Acuicola*. ENA. 187 P. Bogotá, Colombia.

- Etter, A. & Wyngaarden, V. (2000). Patterns of Landscape Transformation in Colombia, with Emphasis in the Andean Region. *Ambio* Vol. 29 (7): 432–439.
- Etter, A., McAlpine, C. & Possingham, H. (2008). Historical Patterns and Drivers of Landscape Change in Colombia Since 1500: A Regionalized Spatial Approach
- Etter, A., McAlpine, C., Wilson, L., Phinn, S. & Possingham, H. (2006). Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114: 369–386
- Fahrig, L. (2003). Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 34: 487–515.
- Feddema, J., Oleson, K., Bonan, G., Mearns, L., Buja, L., Meehl, G. & Washington, W. (2005). The Importance of Land-Cover Change in Simulating Future Climates *Science*, Vol 310: 1674–1678
- Fischlin, A. & Midgley, G.F. (2007). Ecosystems, their properties, goods and services. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.).
- Foley, J.A., Heil Costa, M., Delire, C., Ramankutty, N. & Snyder, P. (2003). Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Front Ecol Environ* 2003; 1(1): 38–44
- Foster, P. (2001). The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth-Science Reviews* 55:73–106
- Galindo, G., Rodríguez, N. y Bernal, N.R. (2010). Dinámica de la cobertura y uso del suelo en el sector nororiental de los Andes colombianos: 1975–2005. Informe final proyecto “Relaciones entre la dinámica del uso del suelo y la climatología regional como una evidencia de cambio climático en la región de los Andes”. Instituto Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Colciencias.
- Geist H. J. & Lambin, E. F. (2001). What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational case study evidence.
- Geist, H.J. & Lambin, E.F. (2002). Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. *BioScience*, 52(2):143–50.
- Giannitrapani, M., Bowman, A.W. & Scott, E.M. (2005). Additive models for correlated data with applications to air pollution monitoring, Department of Statistics, Glasgow University, U.K.
- Gómez, V. & Maravall, A. (1994). Estimation, Prediction and Interpolation for Nonstationary Series with Kalman Filter, *Journal of the American Statistical Association* 89, 611–624.
- Hansen, A.J., Neilson, R.P., Dale, V.H., Flather, C.H., Iverson, L.R., Currie, D.J., Shafer, S., Cook, R., Bartlein, P.J. (2001). Global change in forests: responses of species, communities, and biomes. *Bioscience* 51 (9), 765–779.
- Houghton, R. A. (1994). The worldwide extent of land-use change, *Bio-Science*, 44, 305–313.
- Huang, Q-H., Cai, Y-L. & Peng, J. (2007). Modeling the spatial pattern of farmland using GIS and multiple logistic regression: a case study of Maotiao River Basin, Guizhou Province, China. *Environ Model Assess* 12:55–61

- IPCC. (2000). Robert T. Watson, Ian R. Noble, Bert Bolin, N. H. Ravindranath, David J. Verardo & David J. Dokken (Eds.). *Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura* Cambridge University Press, UK. 30 p.
- IPCC. (2002). Gitay, H., Suarez, A., Watson, R & Dokken, D. (Ed). *Cambio climático y biodiversidad*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 93 p.
- IPCC. (2007). *Resumen para Responsables de Políticas*. En, *Cambio Climático 2007: Impactos y Vulnerabilidad*. Contribución del Grupo de Trabajo II al Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E.Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido
- Jáuregui, E. (2004). Impact of land-use changes on the climate of the México City Region. *Investigaciones Geográficas*, 55, pp. 46-60.
- Kalnay, E. & Cai, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate, *Nature* 423, 528-531
- Lambin E., Geist, H. & Lepers, E. (2003). Dynamics of land use and cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources* 28: 205-241.
- Lambin, E. (1997). Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography* 21: 375-393.
- Li, J., Lewis, J., Rowland, J., Tappan, G & Tieszen, L. (2004). Evaluation of land performance in Senegal using multi-temporal NDVI and rainfall series. *Journal of Arid Environments* 59: 463-480
- Lowry. W. (1998). Urban effects on precipitation amounts. *Progress in Physical Geography*, 22, (4), pp477-520.
- Lütkepohl, H. (2005). *New Introduction to Multiple Time Series Análisis*, Springer-Verlang, Berlin.
- Mahfouf J.F., Richard E., Mascart P. (1987). The Influence of Soil and vegetation on the Development of Mesoscale Circulations. *J. Climate Appl. Meteor.*, 26, pp. 1484-1495.
- McDowall, D., McCleary, R., Meidinger, E. & Hay, R. (2000). *Interrupted Time Series Analysis*.
- McKenzie, D., Peterson, D.W., Peterson, D.L., Thornton, P.E. (2003). Climatic and biophysical controls on conifer species distributions in mountain forests of Washington State, USA. *J. Biogeogr.* 30, 1093-1108.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005a). *Ecosystems and Human Well-being: Opportunities and Challenges for Business and Industry*. World Resources Institute, Washington, DC.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005b). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Mittermeier, R.A., Myers, N., Robles, P. y Mittermeier, C. (1999). *Biodiversidad amenazada: Las ecorregiones terrestres prioritarias del mundo*. CEMEX, Agrupación Sierra Madre. México, D. F.
- Montgomery, D. C., Johnson, L. A. & J. S. Gardiner. (1990). *Forecasting and Time Series Analysis*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York. (1st edition 1976).
- Montealegre, E. y Pabón, J.D. (2001). La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El Niño-La Niña-Oscilación del sur y su efecto en el patrón pluviométrico de Colombia, *Meteorología Colombiana* 2.

- Murgueitio, E. (2002). Sistemas de producción ganadera y sus impactos en la transformación de los Ecosistemas andinos de Colombia En: Memorias del Seminario Internacional sobre Transformación de Ecosistemas. Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Nitschke, C. & Innes, J. (2008). A tree and climate assessment tool for modelling ecosystem response to climate change. *Ecological Modelling* 210: 263–277.
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration (2009). Historical El Niño / La Niña episodes (1950–present) [http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)
- 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 p.), pp.31–48.
- Pabón J.D. (2008). Escenarios de cambio climático para 24 regiones de Colombia. Informe entregado a IDEAM. Departamento de Geografía Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C. 16 p.
- Pabón J.D., Pulido S.I., Jaramillo, O. y Chaparro J. (1998). Análisis preliminar de la Isla de Calor en la Sabana de Bogotá. Cuadernos de Geografía. Volumen VII, pp: 87–93.
- Paruelo, J., Garbulsky, M., Guerschman, J.P. & Jobba, E. (2004). Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change. *Int. J. Remote Sensing*, 25 (14): 2793–2806.
- Peña, D. (2005). Análisis de Series Temporales, Alianza Editorial, Madrid.
- Piao, S., Mohammat, A., Fang, J., Cai, Q. & Feng, J. (2006). NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. *Global Environmental Change* 16: 340–348
- Pielke R.A., Walko R.L., Steyaert L.T., Vidale P.L., Liston G.E., Lyons W.A., Chase T.N. (1998). The influence of anthropogenic landscape changes on weather in South Florida. *Mon. Wea. Rev.*, 127, pp. 1663–1673
- Popp, A., Domptail, S., Blaum, N. & Jeltsch F. (2009). Land use experience does qualify for adaptation to climate change. *Ecological Modelling* 220: 694–702
- Poveda, E. (2008). Impactos del proceso de urbanización en el clima de Bogotá durante el período 1970–2000. Trabajo de Grado. Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia, 56 p.
- Poveda, G. & Pineda, K. (2009). Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates. *Advances in Geosciences*, 7, pp 1–10.
- Poveda, G., Jaramillo, A. y Mantilla, R. (2000). Amplificación de las anomalías de humedad del suelo y del índice NDVI por el Niño en Colombia. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba, Argentina.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M.M., Quiceno, N. y Mantilla, R. (2002). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research*, Vol 37 (8): 2169–2178.
- Quétier, F., Lavorel, S., Daigney, S. & De Chazal, J. (2009). Assessing ecological and social uncertainty in the evaluation of land-use impacts on ecosystem services. *Journal of Land Use Science*, Vol. 4 (3):173–199

- Quiroz, I.W. & Jong, S.M. (2005). Understanding complex spatiotemporal weather patterns and land use interaction in the Tibetan Autonomous Region using harmonic analysis of SPOT VGT–Sio NDVI time series, *International Journal of Remote Sensing II*, pp. 2281–2296.
- Ramírez, S., Cid, L. y Alfaro, E. (2009). Categorical analysis of ENSO influence over south–american west coast precipitation variability, *Memorias VI Encuentro Colombia Venezuela de Estadística – VIII Jornadas de Aplicaciones Matemáticas. Estadística en la Industria y el Ambiente*, Valencia, Venezuela, 25 al 29 de Octubre de 2009.
- Reinsel, G. C. (1993). *Elements of Multivariate Time Series Analysis*, Springer, New York.
- Rodionov, S. (2004). A sequential algorithm for testing climate regime shifts, *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L09204, doi:10.1029/2004GL019448
- Rincón, A. y Bernal, N.R. (2007). Factores antrópicos asociados e interrelaciones con el estado de los ecosistemas andinos. En: Armenteras, D. y Rodríguez, N. (Eds.). 2007. *Monitoreo de los ecosistemas andinos 1985–2005: Síntesis y perspectivas*. Instituto de Investigación Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia. 174 p.
- Rodionov, S. (2006). Use of prewhitening in climate regime shift detection, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L12707, doi:10.1029/2006GL025904
- Rudel, T.K. (2007). Changing agents of deforestation: From state–initiated to enterprise driven processes, 1970–2000. *Land Use Policy* 24: 35–41.
- Ruiz, J.F. (2010). Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011–2100). Nota Técnica IDEAM, IDEAM–METEO/05–2010, Bogotá D.C., 60 p.
- Sala, O.E., Chapin, I.F., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.H., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Leroy Poff, N., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M. & Wall, D.H. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287 (5459), 1770–1774.
- Segal, M., Avissar, R., McCumber, M.C. & Pielke, R.A. (1988). Evaluation of vegetation effects on the generation and modification of mesoscale circulation. *J. Atmos. Sci.*, 4, pp. 2268–2292.
- Serrano, S.V., Lasanta, T. & Romo, A. (2003). Diferencias espaciales en la evolución del NDVI en la Cuenca Alta del Aragón: Efectos del Cambios de uso del Suelo, *Cuadernos de Investigación Geográfica*, No. 29, pp 51–66, ISSN 0211–6820.
- Štěpánek, P. (2007). AnClim – software for time series analysis (for Windows). Dept. of Geography, Fac. of Natural Sciences, Masaryk University, Brno. 1.47 MB.
- Storch, H. & Zwiers, F. (1999). *Statistical Analysis in Climate Research*, Cambridge University Press, United Kingdom, 484 p.
- Tucker, C.J., J. E. Pinzon, M. E. Brown, D. Slayback, E. W. Pak, R. Mahoney, E. Vermote & N. Saleous. (2005). An Extended AVHRR 8–km NDVI Data Set Compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data. *International Journal of Remote Sensing*, Vol 26:20, pp 4485–5598.
- Van der Hammen, T. (1992). *Historia, ecología y vegetación*. Corporación Colombiana para la Amazonia Araracuara, Bogotá, 411 pp.

- Voldoire, A. (2006). Quantifying the impact of future land-use changes against increases in GHG concentrations, *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L04701, 4 PP., 2006 doi:10.1029/2005GL024354
- Vuille, M., Francou, B., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B., & Bradley, R. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews* 89: 79–96
- Wang, X. L. (2003). Comments on “Detection of Undocumented Changepoints: A Revision of the Two-Phase Regression Model”. *J. Climate*, 16, 3383–3385.
- Wang, X.L. & Feng, Y. (2007). RHtestV2, User Manual, Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada, Toronto, Ontario, Canada.
- Wei, W. S. (2006). *Time Series Analysis. Univariate and Multivariate Methods*. 2a. Ed., Addison Wexley, Boston.
- Wilson, M.F. & Henderson-Sellers, A. (1985). A Global Archive of Land Cover and Soils Data for Use in General Circulation Climate Models. *Journal of Climatology*, vol. 5, pp. 119–143.
- Wilks, D. (1995). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, International Geophysics Series, Vol 59, Academic Press, 464 p.
- Wood, E., Lewis, J., Tappan, G. & Lietzow, R.W. (1997). The development of a land cover change model for southern Senegal. In: *Land use modeling workshop; 1997 June 5–6; Sioux Falls, SD*. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis. Available at: [http:// www.ncgia.ucsb.edu/conf/landuse97](http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/landuse97).
- Xu, X., Kevin, J. & Hiromasa, U. (2004). Monitoring Anthropogenic Effects on Land-surface phenologies in China from AVHRR using the Discrete Fourier Transform. *Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 47 C.
- Zhao, M., Pitman, A. & Chase, T. (2001). Climatic effects of land cover change at different carbon dioxide levels. *Clim Res.* Vol. 17: 1–18.
- Zuur, A.F. & Pierce, G.J. (2004). Common trends in northeast Atlantic squid time series, *Journal of Sea Research* 52, 57–72.
- Zwiers, F. & Storch, H.V. (2004). On the role of Statistics in Climate Research, *Int. J., Climatol.* 24: 665–680.







Libertad y Orden

Departamento Administrativo de  
Ciencia, Tecnología e Innovación  
**Colciencias**

República de Colombia



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA



2010 Año Internacional de la Diversidad Biológica

