

MODELAMIENTO DEL EFECTO DEL CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN EL CLIMA LOCAL-REGIONAL SOBRE LOS ANDES COLOMBIANOS

MODELING THE EFFECT OF LAND USE CHANGE IN THE LOCAL-REGIONAL CLIMATE OVER THE COLOMBIAN ANDES

Pabón J.D.*, Rodríguez N.***, Bernal N.R.***, M.A. Castiblanco****, Y.V. Sánchez****

RESUMEN

Pabón J.D., N. Rodríguez, N.R. Bernal, M.A. Castiblanco, Y.V. Sánchez. Modelamiento del efecto del cambio en el uso del suelo en el clima local-regional sobre los andes colombianos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 37 (144): 379-391, 2013. ISSN 0370-3908.

Utilizando el modelo PRECIS se efectuó la simulación del clima de una región localizada en los Andes colombianos, para explorar el impacto del cambio en el uso del suelo en el clima regional. El modelo reproduce satisfactoriamente la distribución espacial y el ciclo anual regional de la precipitación anual y de la temperatura media anual del aire, aunque sobreestima sus valores mensuales. Para los lugares en donde hay disponibles datos de observaciones que permitieron la comparación, PRECIS también reprodujo satisfactoriamente la variabilidad interanual de la temperatura media anual del aire y de la precipitación anual. Las diferencias entre lo observado y lo simulado ajustaron mediante un simple coeficiente obtenido de relación observado/simulado.

Con una intervención al modelo en la que se modifica el uso del suelo utilizado en la primera simulación por el real observado en la región en el año 1985, se realizó una nueva prueba. La comparación permitió establecer que hubo poco cambio sobre los ambientes naturales y un notorio aumento de la precipitación cuando se cambia el uso del suelo de “pastos y árboles” a “bosques tropicales de hoja ancha” y de “pastos y árboles” a “tierras con cultivos arables”.

Palabras clave: Cambios en uso de tierra, climas locales, andes colombianos.

* Profesor Asociado, Grupo de Investigación “Tiempo, clima y sociedad”, Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia.

** Profesora Cátedra. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia; Investigador, Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander von Humboldt.

*** Profesor Asistente, Ingeniería Ambiental, Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Distrital Francisco José de Caldas

**** Auxiliar de Investigación, Grupo de Investigación “Tiempo, clima y sociedad”, Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia

ABSTRACT

Using PRECIS model, a simulation of the climate for a Colombian Andean region was carried out, as basis for exploring the impact of the land use change in regional climate. This model reproduces satisfactorily the spatial distribution and the annual cycle of annual precipitation and annual mean temperature, but it overestimates the values of these variables. For the places where data of observation were available for comparing, PRECIS also acceptably reproduced the regional inter-annual variability of annual mean air temperature and annual precipitation. Differences between observed and simulated were adjusted using a simple coefficient obtained from the simulated/observed relationship.

With an intervention in the model consisting in the modification of the land cover used by the model in the first simulation by the real observed in the region in 1985, a new experiment was made. The comparison allows establish that this modification produced negligible changes for natural environment and notorious change in precipitation when the alteration of the land use is from "pastures and trees" to "tropical forest with broad leaf" and from "pastures and trees" to "land with arable crops".

Key words: Changes in land use, local climates, northern Andes.

1. Introducción

En evaluaciones ambientales que se abordan para diversos propósitos frecuentemente surge la necesidad de hacer el análisis del clima local y explicar los cambios que generalmente ocurren en el mismo. Dado que los cambios del clima en la escala local-regional son el resultado de la interacción de procesos globales y regionales-locales, generalmente se cae en el sesgo de atribuir los cambios mencionados a uno de los dos factores, lo que puede inducir errores en las conclusiones y en la toma de decisiones relacionadas con la solución de los problemas ambientales y minimización de sus impactos. Adicionalmente, para efectos del modelamiento del clima o para interpretar los resultados de los modelos para una región o lugar determinados es necesario tener un conocimiento detallado del aporte de los procesos que operan a diferentes escalas en el cambio del clima local-regional. Esto plantea la necesidad de indagar acerca de en qué proporción estarían actuando los factores de diversa escala que inciden en el cambio climático local, tales como el uso del suelo, la orografía, etc. No obstante, aislar las señales local y global del cambio climático es una tarea compleja, la cual algunos investigadores (ver **IPCC-WG1, 2013**) han intentado abordar de diversas maneras.

Las características de la superficie regulan el balance de radiación y los flujos de masa (vapor de agua o CO_2) y energía (calor) entre el suelo y la atmósfera, la intensidad del viento con su rugosidad y la humedad de la capa superficial, con lo cual el uso del suelo, en particular la cobertura vegetal, juegan un papel importante en la regulación del clima y de diferentes fases del ciclo hidrológico (**Defries & Eshleman, 2004, Dale, 1997**). Diversas investigaciones (**Mahfouf et**

al., 1987; Segal et al., 1988; Pielke et al., 1998; Lowry, 1998; Kalnai & Cai, 2003; Jáuregi, 2004; Malhi et al., 2008) han establecido que los cambios en el uso del suelo (deforestación, construcción de embalses, la urbanización, cambio de tipo de cultivo y los diferentes sistemas de riego) modifican los patrones 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. Por ello, en los estudios de cambio climático al identificar tendencias de cambio en tales patrones y variables, estos no se deben atribuir únicamente al cambio climático global que está ocurriendo.

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 sobre el clima en escalas local y regional, aunque se ha analizado el cambio en el uso del suelo (**Etter et al., 2006; Guhl, 2008; Rodríguez et al., 2012**), el efecto de la urbanización en el clima (**Pabón et al., 1998; Poveda, 2008; Ángel et al., 2010**), el impacto del cambio climático en la cobertura vegetal (**Buitaert et al., 2011**) y simulado el efecto de algunos cambios (**Rodríguez et al., 2010**). En la actualidad hay la necesidad de una mayor comprensión de los procesos para su mejor incorporación en los modelos numéricos y para satisfacer la demanda de información específica en la práctica de la planificación en diferentes ámbitos de la sociedad, situación que empuja a profundizar en el tema del efecto del cambio del uso del suelo en el clima local-regional.

Con el propósito de contribuir en el sentido de dar los elementos para una respuesta al cuestionamiento planteado, se analizó con modelamiento el posible efecto del cambio del

uso del suelo en el clima regional. Este artículo compila los resultados de este intento en el que se utilizó el modelo climático regional PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies), el cual ha sido utilizado para elaborar escenarios de cambio climático (Bashkaran et al., 1996; Arnel et al., 2003; Cao et al., 2007; Alves & Marengo, 2009) en evaluación de impactos del cambio climático en diferentes regiones del mundo. (Una lista de publicaciones sobre el uso de PRECIS en estudios de cambio climático, con pdf de algunas de ellas, está disponible en la página Web http://precis.metoffice.com/other_links.html).

2. Región de estudio, datos y métodos

La región analizada (Figura 1) es una franja que se extiende meridionalmente por la vertiente oriental de la Cordillera oriental de los Andes colombianos, desde 4 a 8°N, entre los 72 y 73°W. Esta zona comprende territorio de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Santander y Norte de Santander.

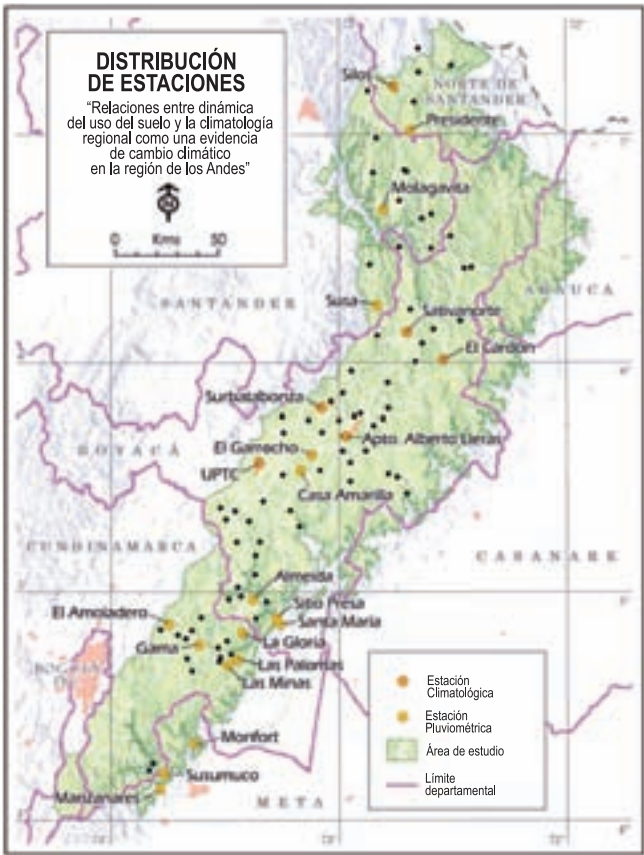


Figura 1. Área del estudio con la localización de las estaciones pluviométricas y climatológicas cuyos datos se utilizaron en el análisis

Para alcanzar el objetivo planteado, identificar la señal del efecto del cambio del uso de suelo en el clima de la región, el estudio se desarrolló en las siguientes fases:

- 1. Simulación del clima de regional utilizando el modelo PRECIS con la información de uso del suelo de Wilson & Henderson-Seller (1985) que es la utilizada en la versión original del modelo
- 2. Validación de las simulaciones del clima regional mediante comparación con datos provenientes de mediciones efectuadas en estaciones climatológicas.
- 3. Ajuste de los resultados del modelo para reducir las diferencias entre el clima real y el simulado.
- 4. Simulación con el uso del suelo modificado; se utilizó datos de uso del suelo de la región registrado en 1985.
- 5. Comparación de los resultados obtenidos en los dos experimentos.

Tabla 1. Lista de estaciones climatológicas utilizadas para el estudio

LAT	LONG	ELEV	Nombre	Depto.	Municipio
4,70	-73,43	2003	Palomas las	C/marca	Gachalá
4,68	-73,48	2003	Minas las	C/marca	Gachalá
6,67	-72,80	2150	Molagavita	S/der	Molagavita
6,02	-72,53	3590	Cardon el	Boyacá	Socotá
6,13	-72,70	2594	Sativanorte	Boyacá	Sativanorte
4,95	-73,40	2120	Almeida	Boyacá	Almeida
4,82	-73,43	1845	Gloria la	C/marca	Ubalá
4,90	-73,30	1210	Sitio presa	Boyacá	Santa María
4,87	-73,73	2963	Amoladero el	C/marca	Guatavita
4,77	-73,62	2210	Gama	C/marca	Gama
7,02	-72,68	3320	Presidente	N. S/der	Chitaga
7,20	-72,75	2765	Silos	N. S/der	Silos
5,60	-73,12	3100	Garrocho el	Boyacá	Toca
5,53	-73,17	3200	Casa amarilla	Boyacá	Toca
5,57	-73,37	2690	UPTC	Boyacá	Tunja
5,82	-73,07	2485	Surbata bonza	Boyacá	Duitama
6,25	-72,83	3080	Susa	S/der	Onzaga
4,22	-73,73	1000	Susumuco	C/marca	Guayabetal
4,12	-73,80	1200	Manzanares	Meta	Acacias
4,2	-73,38	1100	Monfort	Meta	El Calvario
4,52	-73,16	850	Santa María	Boyacá	Santa María
5,41	-72,58	2500	Apto. Alberto Lleras	Boyacá	Sogamoso

2.1 Los datos de mediciones de estaciones meteorológicas y climatológicas

Para la validación del modelo se utilizaron los datos de temperatura mensual del aire y de precipitación mensual de las estaciones meteorológicas indicadas en la Tabla 1 y distribuidas según se muestra en la Figura 1; las estaciones utilizadas han sido operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), por la Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR) y por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). Aunque se intentó contar con secuencias de datos para el período 1960-2000, la mayor parte de las series contó con información a partir de 1985.

Los datos se sometieron a control de calidad en cuanto se refiere a datos faltantes, a identificación de homogeneidad, detección de cambios por medio de procedimientos estadísticos y verificación del historial de cada una de las estaciones climatológicas para explicar si los cambios fueron causados por alguna alteración de los procedimientos en las mediciones; esto último se efectuó con consulta directa de las hojas de inspección en los archivos técnicos de las instituciones que operan las estaciones. Los métodos utilizados para identificar los cambios en las series utilizadas en el presente estudio han sido resumidos por **Bernal et al. (2009)**.

Para la región se contó con 22 estaciones (Tabla 1) con datos de precipitación mensual (las 22 estaciones) y temperatura media mensual (sólo 6 estaciones). Con ésta información se efectuó la validación del modelo para la región.

2.2 El modelo PRECIS y la simulación del clima regional

El modelamiento del clima se realizó utilizando el modelo PRECIS, el cual permite regionalizar los productos de los modelos climáticos globales y llevarlos a una resolución espacial relativamente detallada. Las particularidades técnicas del funcionamiento operativo del modelo PRECIS han sido resumidas por **Wilson et al. (2008)** y se pueden obtener del sitio http://precis.metoffice.com/user_support.html.

Aunque una descripción detallada del modelo regional se puede obtener de la publicación de **Jones et al. (2004)**, en síntesis, se puede caracterizar PRECIS como un sistema de modelamiento del clima regional que simula la interacción de la superficie (suelo-cobertura vegetal) y la atmósfera a través de la inclusión de las particularidades regionales de los procesos como el balance de radiación, la dinámica de la circulación atmosférica en la mesoescala, el ciclo de los sulfatos, la 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.

En cuanto al componente de la superficie, que es un aspecto esencial en el presente estudio, PRECIS contempla una cobertura vegetal que interactúa con el viento, con la radiación solar y la precipitación, provee a la atmósfera flujos de calor y regula la escorrentía; para el efecto considera diferentes tipos de cobertura vegetal, cada uno de los cuales tiene una forma particular de actuar en los procesos mencionados. El suelo del modelo, por su parte, dependiendo de su textura tiene propiedades térmicas e hidrológicas y con su color participa en el balance de radiación con el albedo.

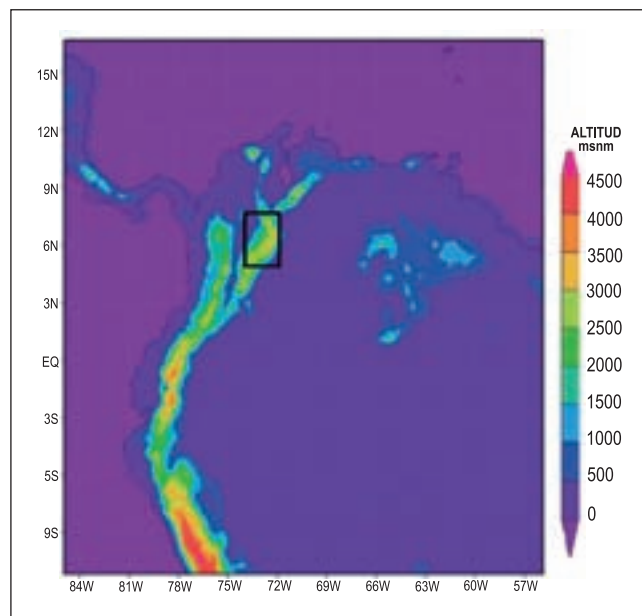


Figura 2. Área para la cual se realizaron las simulaciones del clima con PRECIS. Con colores se muestra la orografía incorporada al modelo. (En recuadro negro se indica la localización del área específica del estudio, sobre la cordillera oriental. Nótese que esta última está satisfactoriamente representada en el modelo).

El modelo PRECIS se ejecutó para una región localizada sobre el norte de Suramérica, seleccionada de tal manera que ubica el territorio colombiano en el centro, como lo muestra la Figura 2. Dado que la información disponible en el modelo presentaba deficientemente las cordilleras central y occidental (ver Figura 2), las cuales no se definían claramente, fue necesario intervenir el archivo de datos de orografía y se corrigió el relieve de ese sector. La información de entrada o condiciones de borde del modelo fue la disponible en el re-análisis denominado ERA40¹ (**Uppala et al., 2005**). En

¹ ERA40 es un juego de datos en cuadrícula tridimensional generado por el European Center of Medium-Range Weather Forecasting (ECMRWF) para el período 1957-2002 con base en el procesamiento con ayuda de modelos de las observaciones efectuadas durante este

cuanto a la cobertura vegetal y el suelo, se dejó el que incluía inicialmente el modelo, es decir el juego de datos WHS (**Wilson & Henderson-Sellers, 1985**).

Con las anteriores características se ejecutó PRECIS para simular el clima regional y se produjo información (datos, horarios, diarios y mensuales) de las variables climatológicas con una cuadrícula de 25 x 25 kilómetros para el período 1960-2000 sobre la superficie de todo el territorio colombiano. Para efectos del presente trabajo se extrajeron los datos mensuales de temperatura y precipitación correspondientes a la región estudiada.

2.2 La validación y el 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.

Se compararon los valores multianuales, la distribución espacial de las variables (mapas $[1961-1990]_{OBS}$ y $[1961-1990]_{SIM}$), el ciclo anual y la variabilidad interanual. Igualmente se calcularon los coeficientes de correlación entre las series observadas y las simuladas para establecer en cuales puntos (lugares) se obtiene la mejor aproximación.

Las series simuladas se ajustaron para que se acercaran más en su comportamiento a las simuladas. Este ajuste se efectuó 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.

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

Para establecer con el modelo PRECIS el efecto del cambio en el uso del suelo, se simuló inicialmente el clima regional con ese modelo dejando el juego de datos WHS, posteriormente se hizo una nueva simulación cambiando los datos de uso del suelo del modelo por los generados por **Galindo**

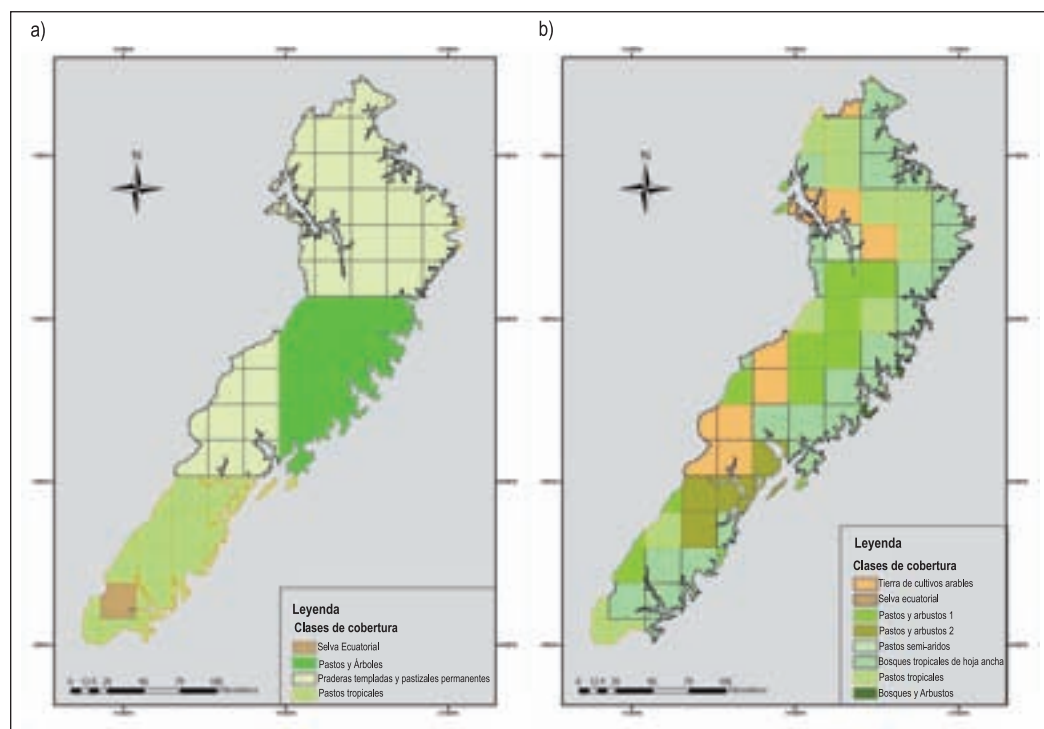


Figura 3. Visualización de la cobertura de **Wilson & Henderson-Seller, 1985** (a) y la identificada por Galindo et al 2010 para 1985 (b) con las que se realizó el modelamiento del clima con PRECIS en la prueba inicial e intervenida, respectivamente.

período. La resolución horizontal de los datos ERA40 es de $1,15^\circ \times 1,15^\circ$ (aproximadamente 126 x 126 kms); la resolución temporal es de 6 horas. (vera *Uppala et al., 2005*).

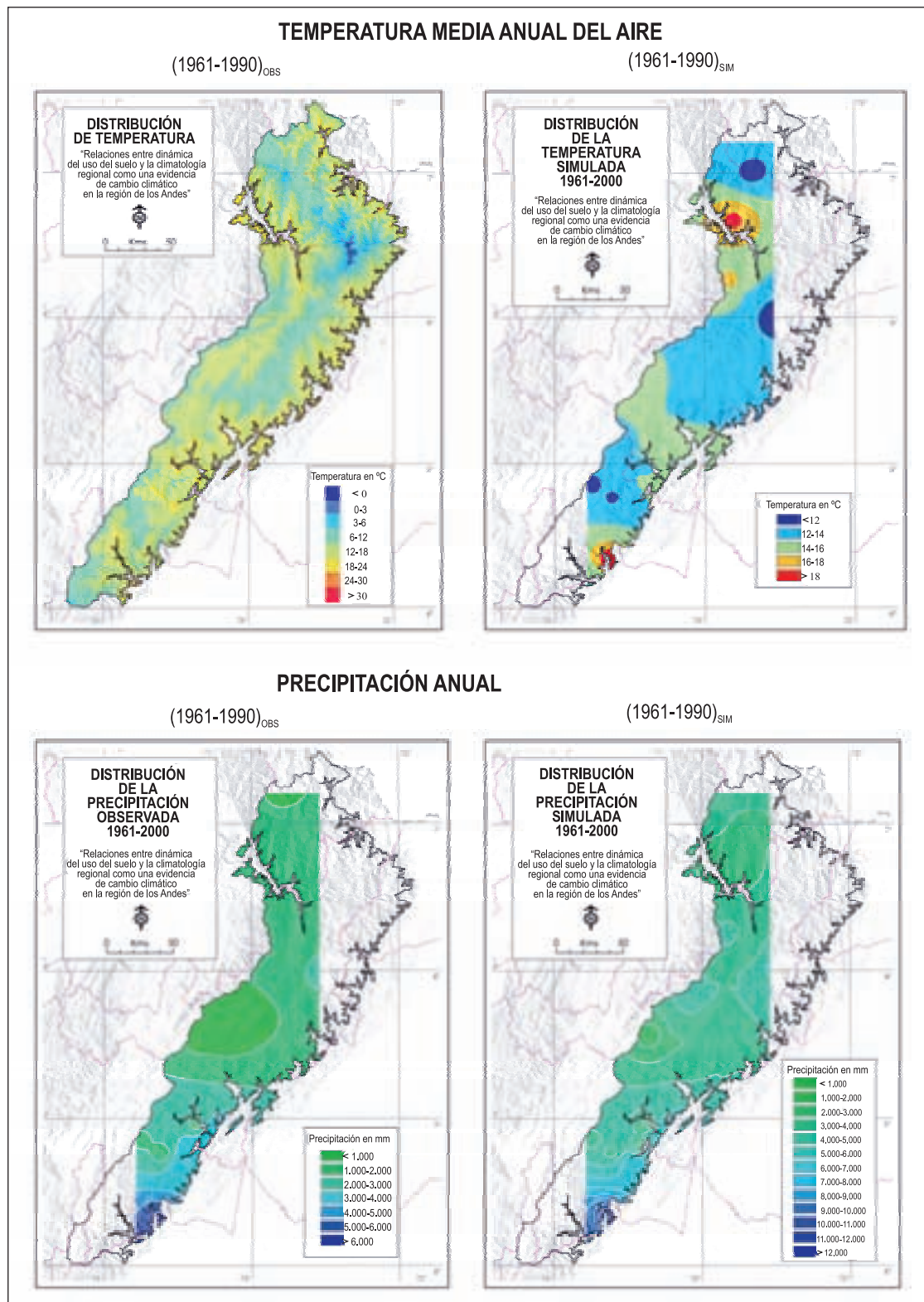


Figura 4. Comparación de las distribuciones de temperatura media anual del aire (arriba) y precipitación anual (abajo) observadas en el período 1961-1990 (izquierda) y la simulada para ese período con el modelo PRECIS (derecha).

et al. (2010) a partir de procesamiento de una imagen de satélite Landsat de 1985); la cobertura se cambió solamente para la región de estudio, no para toda el área de simulación.

Una vista comparativa de las dos coberturas usadas para la región de estudio se presenta en la Figura 3. Es posible observar (Figura 3a) que con la cobertura inicial (la que dispone el modelo en su versión inicial u original) la región es cubierta por solo tres categorías: Praderas templadas y pastizales permanentes, pastos y árboles y pastos tropicales; hay un área pequeña de selva ecuatorial. El uso del suelo para el experimento con PRECIS intervenido (Figura 3b) es más variable espacialmente y más variado en cuanto a categorías, con un total de 8. Resalta la introducción de la categoría “tierra de cultivos arables” en el sector centro-occidental y al norte de la región, lo que es una intervención contrastante con lo que había en esas zonas según los datos WHS. Con este cambio en el uso del suelo para la región se realizó una nueva simulación del clima regional y se obtuvieron de nuevo series (intervenidas en 1985).

Posteriormente, se compararon las series intervenidas con las obtenidas en la primera simulación y se establecieron las diferencias que podrían ser la señal del efecto del cambio del uso del suelo en el clima local.

3. Resultados

En la Figura 4 se presenta la comparación de la distribución espacial de la temperatura media anual del aire y de la precipitación según las observaciones del período 1961-1990 y tal como lo simula PRECIS para ese período.

Como se puede apreciar, para la temperatura del aire (Figura 4 arriba), el mapa simulado no presenta los detalles del mapa observado, lo que se explica por la orografía suavizada en PRECIS (ver Figura 2); en general, la orografía suavizada y más baja del modelo hace que se sobreestime esta variable. No obstante, la distribución espacial es satisfactoriamente definida ya que el modelo localiza en donde corresponde las áreas de altas temperaturas para las zonas bajas y las bajas temperaturas de las mayores altitudes.

En el análisis se pudo precisar que, aunque PRECIS sobrestima la precipitación (Figura 4, abajo), los mapas observado y simulado presentan 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.

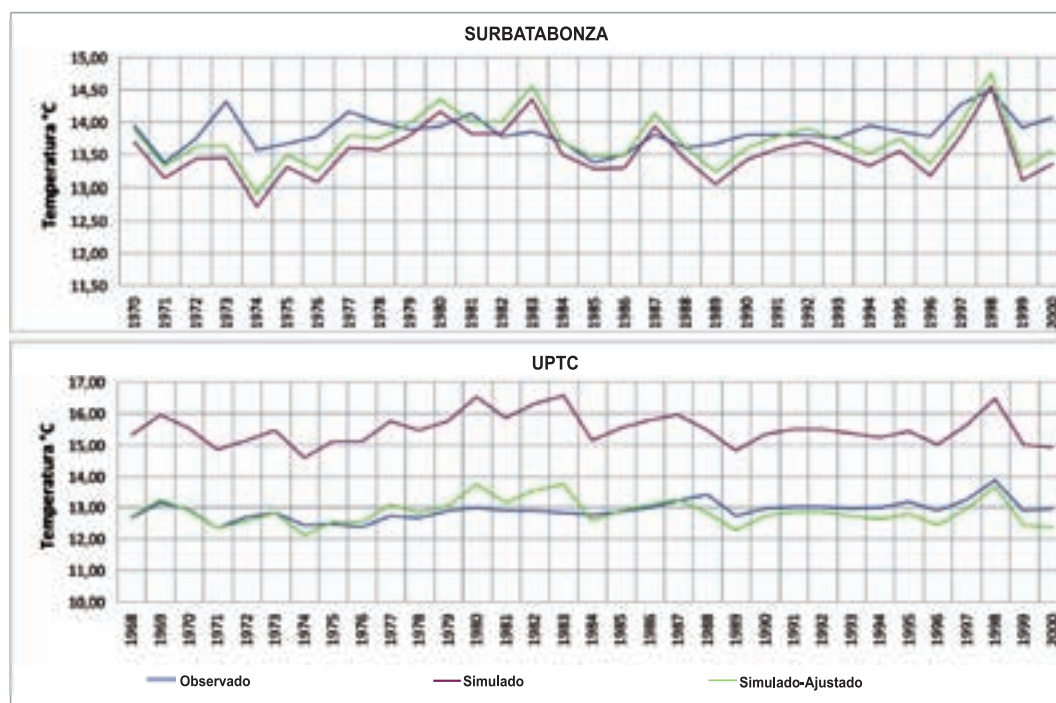


Figura 5. Comparación de la variabilidad de la temperatura media anual del aire observada y simulada con PRECIS para el período 1960-2000 y la correspondiente serie ajustada.

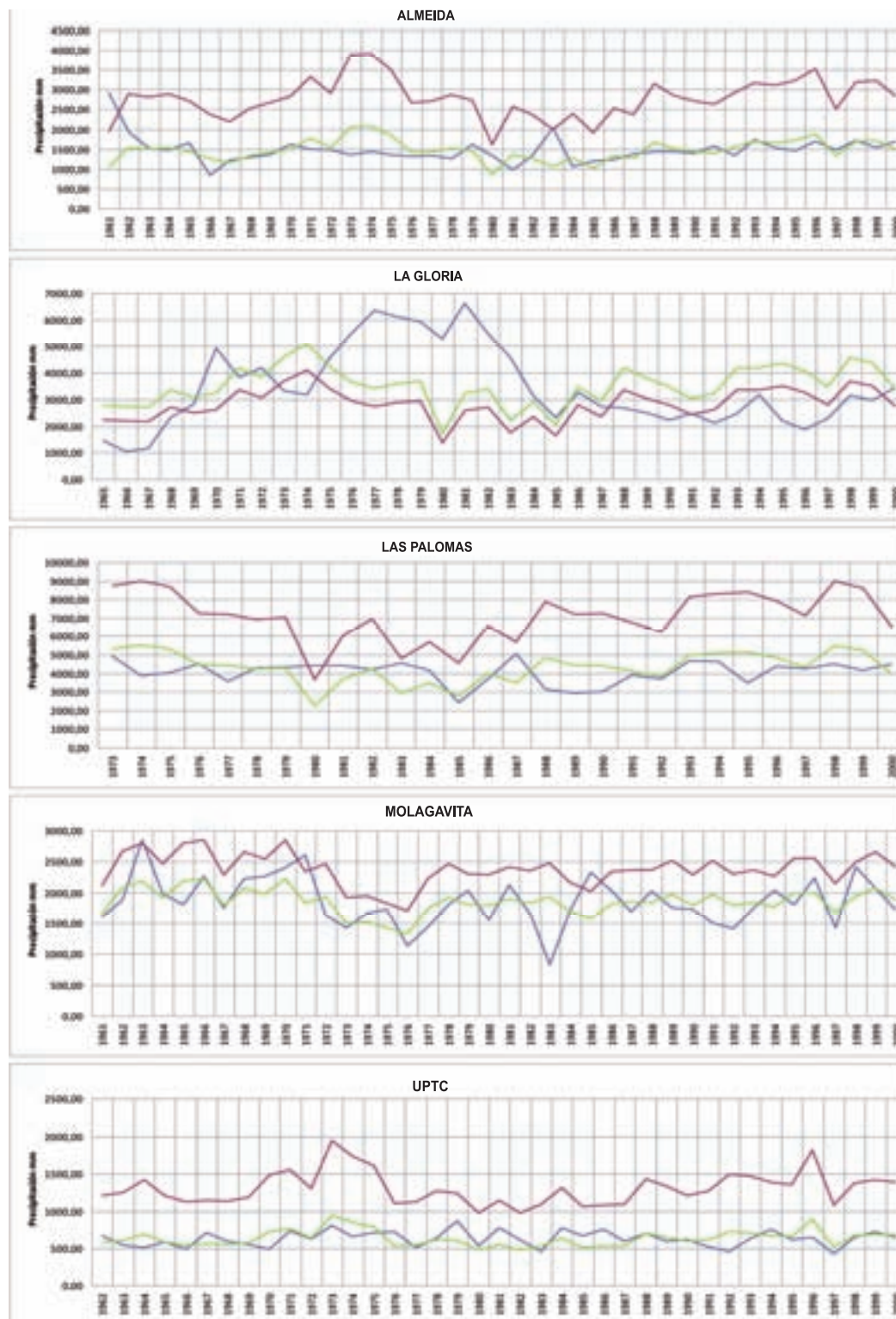


Figura 6. Comparación de la variabilidad de la precipitación anual observada y simulada con PRECIS para el período 1960-2000 y la correspondiente serie ajustada para 5 puntos de la región.

La Figura 5 compara el comportamiento interanual de dos series de temperatura media anual observada y simulada, así como la serie resultante después del ajuste realizado según lo mencionado en metodología. (Lamentablemente para esta variable climatológica solo 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 sobreestimación sistemática; no obstante, en esta última las variaciones también alcanzan a ser señaladas por el modelo. El coeficiente de correlación entre series observada y simulada es de 0,55, que en estas variables es relativamente satisfactorio y muestra cierto grado de cercanía entre la realidad (lo observado) y lo simulado.

Las series precipitación observada y simulada presentan diferencias notables (Figura 6). Es fácil identificar la sobreestimación que ocurre en la mayor parte de puntos, aunque las fases extremas (los picos) de la variabilidad interanual no coinciden, hay puntos en donde se logra una buena coincidencia (ver, por ejemplo, la serie generada para la estación UPTC). En el caso de la estación La Gloria, la comparación pone en evidencia los problemas de la serie de mediciones entre 1975y 1984; ese comportamiento no ocurre en las demás series lo que señala a la mala calidad de la serie de observaciones de esta estación, que pudo haber pasado el control de calidad. (Aquí, vale la pena destacar la utilidad del modelo como una herramienta más de control de calidad de los datos).

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre las series observadas y simuladas de las estaciones utilizadas para el análisis de la precipitación.

Estación	Coeficiente de correlación	Estación	Coeficiente de correlación
Almeida	-0,030	Molagavita	0,479
Apto. Alberto Lleras	0,365	Monfort	-0,062
Casa Amarilla	0,124	Presidente	0,023
El Amoladero	0,037	Santa María	0,170
El Cardón	-0,356	Santivanorte	-0,015
El Garrocho	0,009	Silos	0,133
Gama	0,093	Sitio Presa	0,199
La Gloria	-0,013	Surbatabonza	0,426
Las Minas	-0,150	Susa	0,238
Las Polomas	0,090	Susumuco	-0,034
Manzanares	0,107	UPTC	0,255

En la Tabla 2, que presenta el coeficiente de correlación para los pares (observado-simulado) de series de precipitación, es posible ver que solo para 2 estaciones climatológicas los valores alcanzan a sobrepasar un valor de 0,4. Al observar la distribución espacial de la correlación de las series de precipitación (Figura 7), se identifican sectores (resaltados por los colores rojo y anaranjado) en donde el acercamiento de la variabilidad interanual modelada a la observada es satisfactorio.

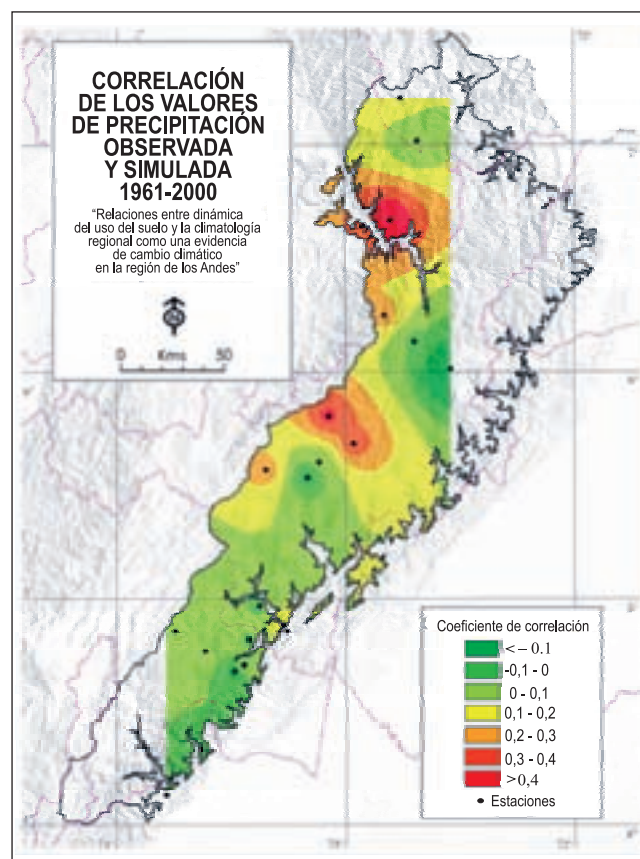


Figura 7. Distribución espacial de los coeficientes de correlación entre las series precipitación observadas y simuladas para las estaciones con disponibilidad de datos.

Los cambios en la temperatura del aire y en la precipitación generados por las transformaciones en el uso del suelo en el modelo se resumen en la Tabla 3. Es posible constatar, que para las dos variables no se sigue un patrón definido unidireccionalmente de los cambios al modificarse una cobertura vegetal por otra, lo que podría deberse a la compleja interacción con lo que ocurre con los sectores cercanos a cada sitio, aunque en general para las dos ocurre un cambio determinado al comienzo y uno mayor, que puede ser contrario,

Tabla 3. Cambios de la temperatura media del aire causados por la modificación del uso del suelo según lo simulado en el experimento con intervención de este último en el modelo PRECIS.

Estacion	Uso del suelo antes de 1985	Uso del suelo despues de 1985	Cambio de temperatura	Cambio de precipitación
Almeida	Pastizales y árboles	Bosques tropicales de hoja ancha		Aumento al doble
Apto Alberto Lleras	Pastizales y árboles	Tierra de cultivos arables	Disminución considerable los tres primeros años y aumento brusco el resto del tiempo	Aumento por tres años y de nuevo igual
Casa Amarilla	Tierra de cultivos arables	Pastos y arbustos		Aumento paulatino hasta alcanzar el doble en el sexto año
El Amoladero	Pastizales y árboles	Tierra de cultivos arables		No hay cambio notable
El Cardón	Pastizales y árboles	Pastos y arbustos	Ligero aumento los primeros tres años y más notorio después	Ligera disminución en los cuatro primeros años; brusca disminución después
El Garrocho	Tierra de cultivos arables	Pastos y arbustos		Ligero aumento en el tercer y cuarto año. Disminución muy grande después
Gamma	Pastizales y árboles	Bosques tropicales de hoja ancha		Aumento notorio en los tres primeros años, muy alto en el resto del tiempo
La Gloria	Pastizales y árboles	Bosques y arbustos		Sin cambio notorio hasta el cuarto año. Exagerado después
Las Minas	Pastizales y árboles	Bosques tropicales de hoja ancha		Ligera disminución los primeros cuatro años; y aumento notorio el resto de tiempo
Las Palomas	Pastizales y árboles	Bosques y arbustos		Ligera disminución el tercer y cuarto año. Disminución muy grande después
Manzanares	Pastos tropicales	Tierra de cultivos arables		Ligera disminución los primeros tres años; y aumento brusco el resto de tiempo
Molagavita	Pastos y árboles	Pastos y arbustos		Aumento notorio en los tres primeros años y muy alto en el resto del tiempo
Monfort	Pastizales y árboles	Selva Ecuatorial		Ligera disminución los primeros tres años; Disminución muy brusca después
Presidente	Pastos y árboles	Tierra de cultivos arables		Pequeño aumento en los dos primeros años, después no hay cambio notable
Santa María	Pastizales y árboles	Bosques tropicales de hoja ancha		Ligera disminución el tercer y cuarto año. Disminución muy grande después
Sativa Norte	Pastizales y árboles	Tierra de cultivos arables	Sin cambio aparente los primeros tres años y un considerable descenso el resto del tiempo	Pequeño aumento en los dos primeros años, aumento notorio en el tercer año y disminución brusca después
Silos	Pastos y árboles	Pastos y arbustos	Pequeño aumento los primeros tres años y un considerable descenso el resto del tiempo	Pequeña disminución en el segundo año y aumento notorio después del tercer año
Sito Presa	Pastizales y árboles	Bosques tropicales de hoja ancha		Ligera disminución los primeros tres años y después sin cambios considerables
Surbatabonza	Tierra de cultivos arables	Bosques tropicales de hoja ancha	Pequeño aumento los primeros tres años y un ligero descenso el resto del tiempo	No hay cambio notable
Susa	Pastos y árboles	Pastos tropicales		Disminución los primeros tres años y aumento el resto del tiempo
Susumuco	Pastizales y árboles	Pastos y arbustos		Disminución los primeros cuatro años y aumento el resto del tiempo
UPTC	Tierra de cultivos arables	Tierra de cultivos arables	Sin cambio aparente los primeros tres años y un considerable descenso el resto del tiempo	Pequeño aumento en los primeros tres años y un muy brusco aumento alrededor de cuatro veces

después de 2-3 años, es decir, si ocurren cambios en las variables climatológicas debidas al cambio en el uso del suelo.

En dos estaciones (Aeropuerto Alberto Lleras y Sativa Norte), por ejemplo, ocurre el mismo tipo de modificación de “pastizales y árboles” a “tierras de cultivos arables”, sin embargo el cambio en la temperatura del aire no es el mismo. En los sectores donde se localizan las estaciones El Cardón y Silos la transformación de la cobertura vegetal es la misma, no obstante, la respuesta de la temperatura del aire es diferente. Más aún, en la estación UPTC, para la que no hubo modificación del uso del suelo (en los dos períodos se mantuvo en “tierras de cultivos arables”), se presenta un descenso notable de la temperatura del aire y un considerable aumento de la precipitación después del tercer año, en ambos casos.

Para la precipitación también los cambios no siguen estrictamente un patrón general relacionado con la modificación efectuada en el uso del suelo. Así, en la Tabla 3 también se observa que en el área en donde se ubican las estaciones Aeropuerto Alberto Lleras, El Amoladero, Presidente y Sativa Norte la modificación fue similar de “pastizales y árboles” a “tierras de cultivos arables” y los cambios en la variable difieren de una estación a otra, sin embargo, en términos generales, los cambios tienden a ser aumento de la precipitación. De otra parte, cuando los cambios son de menor a mayor vegetación, de “pastizales y árboles” a “bosques tropicales

de hoja ancha”, ocurre una disminución de la precipitación, excepto para dos estaciones Almeida y Gamma, resultado contrario a lo que generalmente se cree. Finalmente, la transformación de “tierra de cultivos arables” a “pastos y arbustos” dentro del modelo produce aumento de la precipitación.

Al agrupar las modificaciones del medio (cobertura vegetal o uso del suelo) en “natural”, “seminatural” y “transformado” y tomando una estación representativa de dichos cambios es posible ver que en las áreas con ambiente natural, los cambios en la precipitación no son tan grandes, mientras que en el “seminatural” son bastante marcados. En la Figura 8 se resume este comportamiento en tres estaciones (cada una ubicada en uno de estos grupos). Pareciera ser que en las áreas que se mantienen el medio “natural” los cambios son muy pequeños, no obstante es necesario considerar lo expuesto en los dos párrafos anteriores.

Otra forma de visibilizar las particularidades de los cambios que la temperatura del aire y la precipitación presentaron después de la transformación del uso del suelo en el modelo puede ser mediante la comparación de lo ocurrido con las series agrupadas por el tipo de cobertura en la que se encuentran las estaciones antes de la modificación realizada, es decir, en las categorías: “natural”, “seminatural” y “transformada”, lo que fue posible hacer solo para la precipitación que dispone de más número de estaciones por categoría. Así,

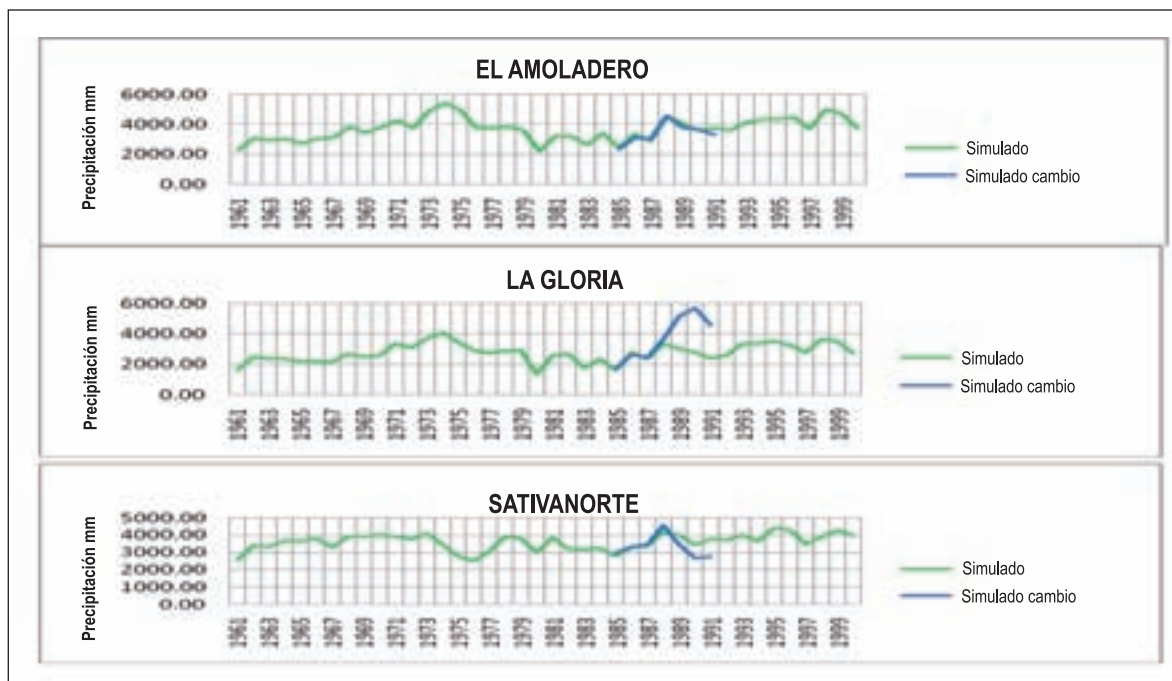


Figura 8. Secuencias comparativas de las series simuladas con el uso del suelo WHS y la serie generada con la intervención, para estaciones en ambiente “natural” (arriba), “seminatural” (en el medio) y “transformado” (abajo)

cada sector correspondiente a una estación climatológica presenta una diferencia entre la precipitación anual anterior a la intervención con la modificación del uso del suelo y después; en cada categoría hay varias estaciones lo que permite conformar tres series de diferencias a las que se les calcula característica estadísticas con las que se puede comparar el comportamiento. En la Figura 9 se presentan los box-plot de las series de diferencias (expresadas en porcentaje del acumulado anual de precipitación de la estación correspondiente) que ocurren en cada grupo (categoría) de estaciones. Según se desprende de esta figura, los menores cambios ocurren en las estaciones que se mantienen en ambiente natural y los mayores en transformado; también se observa que en la categoría N, aunque los cambios son menores, hay una tendencia a la disminución de la precipitación, lo que corrobora lo ya mencionado arriba sobre el cambio de menor a mayor vegetación. Los cambios en categorías SN y T condujeron en promedio a aumento de la precipitación.

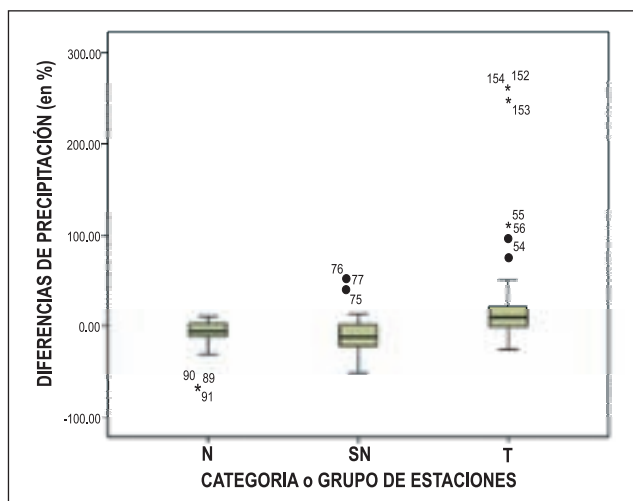


Figura 9. Gráficos de caja (boxplots) de las series de diferencias (expresada en términos de porcentaje) entre la precipitación anual anterior a la intervención con la modificación del uso del suelo y la obtenida después de modificarse el uso del suelo en el modelo PRECIS. Las series fueron compuestas por las estaciones en ambiente natural (N), seminatural (SN) y transformado (T)

Conclusiones

En el marco del trabajo cuya metodología y resultados se expusieron anteriormente fue posible establecer, con base en modelamiento del clima regional, que modificaciones locales en el uso del suelo generan cambios de las variables climatológicas (temperatura media anual del aire y precipitación anual) en la escala local.

El modelo PRECIS utilizado para el efecto representó satisfactoriamente las condiciones climáticas para gran parte de los sectores en donde se disponía de datos de mediciones que permitieron su validación; aunque se registraron diferencias entre la distribución espacial de la temperatura media anual del aire y de la precipitación simuladas, éstas se pudieron tratar mediante la aplicación de un factor simple de ajuste. Con esto se habilitó el uso del modelo para realizar pruebas sobre el efecto del cambio en el uso del suelo en las variables climatológicas locales. Los resultados del modelamiento del clima regional efectuadas también señalan que, con los cuidados del caso, dicho modelo pueda ser utilizado en otros estudios similares.

Los experimentos efectuados con el modelo en los que se modificó el uso del suelo arrojaron como resultado cambios muy variados aparentemente sin patrón alguno. No obstante, a partir de clasificación de los resultados se pudo establecer que ocurre aumento de la precipitación cuando se modifican los “pastos y árboles” por “bosques tropicales de hoja ancha” y los “pastos y árboles” por “tierras con cultivos arables”. También se obtuvo que cuando las modificaciones se mantienen en la categoría natural (de poca vegetación a mayor vegetación, por ejemplo), los cambios son menores que cuando se da hacia una mayor transformación, en el sentido de reducir la vegetación. De otra parte, las transformaciones en categoría seminatural y transformada propiciaron un aumento de la precipitación, en tanto que los cambios en la categoría natural (en la que se mantiene vegetación), produjeron reducción de la precipitación.

En el caso de la temperatura del aire, si bien presenta cambios en respuesta a la intervención del uso del suelo, no mostró un patrón claramente definido y los cambios aún bajo un mismo tipo de modificación de uso del suelo para diferentes sitios fueron opuestos (aumento o disminución). Tal vez esta diversidad se explique en que la temperatura es más sensible que la precipitación a los cambios de uso del suelo no solo en el sitio sino a los cambios en diferentes sectores vecinos, suposición cual se debería corroborar con una exploración más detallada acerca de este particular.

Reconocimientos

Este reporte resume los resultados del componente de modelamiento 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” que, gracias al apoyo de Colciencias (Proyecto con código 2245-452-21399 de la Convocatoria Nacional para la Financiación de Proyectos año 2008, No. 452-2008), desarrollaron el Instituto de Investigaciones Biológicas Alexander von Humboldt y

el grupo de investigación “Tiempo, Clima y Sociedad” del Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia.

Loa autores agradecen a Gustavo Galindo quien participo en el desarrollo del componente relacionado con la cobertura y uso del suelo en el área de estudio.

Un reconocimiento y agradecimiento especial al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM, por facilitar la información climatológica y el acceso a las hojas de inspección de la estaciones para reconstruir su historia.

Bibliografía

- 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)
- Ángel L., Ramírez A., Domínguez E., 2010: Isla de calor y cambios espacio-temporales de la temperatura en la ciudad de Bogotá. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 34 (131): 173-183
- Arnell N. W., D. A. 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.
- Bhaskaran B., Jones R.G., Murphy J.M., Noguer M., 1996: Simulations of the Indian summer monsoon using a nested regional climate model: domain size experiments. *Clim. Dyn.*, 12, pp. 573-587.
- Bernal N.R., Martínez J., Rodríguez N., Pabón J.D., Galindo G., 2009: Detección de cambios en el promedio y la varianza de una serie de tiempo meteorológica. *Congreso de Estadística, Venezuela*.
- Buitaert W., Cuesta-Camacho F., Tobón C., 2011: Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, v. 20, pp. 19-33.
- 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.
- Dale V. H., 1997: The relationship between land use change and climate change. *Ecological Applications*, v. 7, No. 3, pp. 753-769.
- DeFries R., Eshleman K.N., 2004: Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future. *Hydrological Processes*, v. 18, pp.2183-2186.
- Etter A., McAlpine C., Wilson K., Phinn S., Possingham S., 2006: Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, v. 114, pp.369-386.
- Galindo G., Rodríguez N., Bernal N.R., 2010: Dinámica de la cobertura y uso del suelo en el sector nororiental de los Andes colombianos: 1975-2005. Informe final de 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 – Colciencias.
- Guhl, A., 2008: Café y cambio de paisaje en Colombia. Fondo Editorial Universidad EAFIT. 335 p.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Sciences Basis. The Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report (WGI AR5). Summary for Policemakers. World Meteorological Organization - United Nations Environmental Program. Geneva, Switzerland, 36 p.
- Jáuregui E., 2004: Impact of land-use changes on the climate of the México City Region. *Investigaciones Geográficas*, 55, pp. 46-60
- Jones, R.G., Noguer, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J. and Mitchell, J.F.B., 2004: *Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS*, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 40pp
- Kalnay E., Cai M., 2003: Impact of urbanization an land use change on climate. *Nature*, 423, pp. 528-531
- Lowry W., 1998: Urban effects on precipitation amounts. *Progress in Physical Geography*, 22, (4), pp477-520.
- 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.
- Malhi, Y., Roberts, J.T., Betts, R.A., Killeen, T.J., Li, W., Nobre, C.A., 2008: Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science* 319, 169-172.
- Pabón J.D., Pulido S.I., Jaramillo, O., Chaparro J., 1998: Análisis preliminar de la Isla de Calor en la Sabana de Bogotá. *Cuadernos de Geografía*. volumen VII, pp: 87-93.
- 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.
- 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
- Rodríguez N., Armenteras D., Retana J., 2012: Land use and land cover change in the Colombian Andes: dynamics and future scenarios. *Journal of Land Use Science*, v.7, No 1, pp.1-21.
- Rodríguez N., Pabón J.D., Bernal N., Martínez J., 2010: Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Instituto de Investigaciones Alexander von Humboldt – Universidad Nacional de Colombia – Colciencias. Bogotá D.C., 80 páginas.
- 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.
- Uppala S.M., Kållberg P.W., Simmons A.J., Andrae U., da Costa Bechtold V., Fiorino M., Gibson J.K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G.A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R.P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M.A., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Hólm E., Hoskins B.J., Isaksen I., Janssen P.A.E.M., Jenne R., McNally A.P., Mahfouf J.-F., Morcrette J.-J., Rayner N.A., Saunders R.W., Simon P., Sterl A., Trenberth K.E., Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P., Woollen J. 2005: *The ERA-40 re-analysis. Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012.
- Wilson S., Hassell D., Hein D., Jones R., Taylor R., 2008: Installing and using the Hadley Centre regional climate modeling system, PRECIS. Metoffice, 155 p.
- 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*, 5, pp119-143

Recibido: 18 de junio de 2010

Aceptado para su publicación: 9 de agosto de 2013