

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Quantization and interpolation of local trends in temperature and precipitation in the high Andean areas of Cundinamarca and Boyaca (Colombia)

Cuantificación e interpolación de tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá (Colombia)

Edwin Rojas¹, Blanca Arce¹, Andrés Peña², Francisco Boshell³, Miguel Ayarza¹

ABSTRACT

Change in global weather patterns affects not only temperature, but also the hydrological cycle with greater variations in local environments. In order to quantify trends in maximum temperature and minimum and average precipitation, we performed a nonparametric analysis of time series of 31 meteorological stations located in the high Andes of Cundinamarca and Boyaca, with records from 1985 to 2008. We calculated the changing trends of climatic variables for each of the stations with the Sen slope estimator and we used the Mann-Kendall test to determine the confidence level of such trends. The maximum temperature showed positive trends with significant confidence levels (> 90%) in most seasons. For the lowest temperature, the positive trend was detected in fewer stations but with higher levels of statistical confidence (12 stations exceeded 95%). Rainfall showed significant trends (> 90%) in only seven of the 31 stations analyzed (six of them were positive and one negative). We used the method of inverse distance weighted interpolation (IDW) to generate maps of the spatial distribution of the trends. Cross validation found that IDW has a better fit for precipitation than for temperature. We conclude that climate change manifests very local expressions in terms of the behavior of temperatures and precipitation for the study area, which could lead to specific impacts on production systems in the region.

Keywords: analysis of trends, climate change, Sen's method, non-parametric analysis, time series.

RESUMEN

El cambio en el patrón climático global no sólo afecta la temperatura, sino el ciclo hidrológico con mayores variaciones en los ambientales locales. Con el fin de cuantificar las tendencias de temperatura máxima, mínima y precipitación media, se realizó un análisis no-paramétrico de las series de tiempo de 31 estaciones meteorológicas ubicadas en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá, con registros de 1985 a 2008. Se calcularon las tendencias de cambio de las variables climáticas para cada una de las estaciones mediante el método de estimación de pendiente de Sen y se utilizó la prueba de Mann-Kendall para determinar el nivel de confianza de dichas tendencias. La temperatura máxima mostró tendencias positivas con niveles de confianza significativa (>90%) en la mayoría de estaciones climáticas. Para la temperatura mínima, la tendencia positiva fue detectada en menor número de estaciones pero con mayores niveles de confianza estadística (12 estaciones superaron el 95%). La precipitación mostró tendencias significativas (>90%) sólo en siete de las 31 estaciones analizadas (seis de ellas fueron positivas y una negativa). Se utilizó el método de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) para generar los mapas de la distribución espacial de las tendencias. Mediante validación cruzada se encontró que el IDW tiene un mejor ajuste para la precipitación que para la temperatura. Se concluye que el cambio climático tiene manifestaciones muy locales en términos del comportamiento de las temperaturas y la precipitación para la zona de estudio, lo que podría generar impactos específicos sobre los sistemas productivos de la región.

Palabras clave: análisis de tendencias, cambio climático, método de Sen, análisis no paramétrico, series de tiempo.

Fecha de recepción 2010-05-07
Fecha de aceptación 2010-08-20

¹ Centro de Investigación Tibaitatá, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Corpoica. Mosquera, Colombia. eorjas@corpoica.org.com/barce@corpoica.org.co/ mayarza@corpoica.org

² Centro Nacional de Investigaciones del Café – Cenicafe. Chinchiná, Colombia. andres.pena@cafedecolombia.com

³ Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. jfboshell@gmail.com

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global vinculado con el cambio climático, se refiere al aumento progresivo de la temperatura media del aire, que puede alterar el patrón climático global (EPA, 2010). Este aumento de la temperatura causa cambi-

os en el régimen de precipitación, debido a una alteración del ciclo hidrológico, que podría representar mayores impactos en los humanos y en los sistemas ambientales que los mismos cambios en la temperatura (McElwain y Sweeney, 2003). En las últimas tres décadas del siglo pasado, se documentó un incremento de la temperatura media a escala global de aproximadamente 0,15°C por década (Jones *et al.*, 2001), así como se han detectado aumentos en la frecuencia de eventos extremos de precipitación en diferentes regiones del mundo (Frich *et al.*, 2002). Además de esto, cada vez se reportan con mayor frecuencia ondas de calor y sequías, intensas precipitaciones que han llegado a generar inundaciones, tornados, huracanes y otros eventos de carácter catastrófico en diferentes regiones del mundo (Easterling *et al.*, 2000). Algunos impactos en el sector agropecuario ya han sido reportados en la zona Cundiboyacense (Colombia), como la migración altitudinal de plagas como la garrapata, que fue detectada por encima de los 2.900 msnm (Cortés *et al.*, 2010), donde según Evans (1978) no era posible.

Pese a que las salidas de los modelos climáticos globales pueden representar un insumo importante para los decisores de políticas a escala mundial o regional, a nivel de mesoclima o más aun, a escala local de municipio o finca, esta información es insuficiente para la toma de decisiones. Por otro lado, la información a escala local de los posibles impactos del cambio climático es importante para orientar las acciones de investigación en el tema, así como para el diseño de medidas de adaptación y mitigación (Fundación Biodiversidad, 2009), que no pueden ser desarrolladas solamente en función de escenarios de cambio climático generados por los modelos de circulación general de la atmósfera. Éstos, por su bajo nivel de resolución espacial no pueden percibir particularidades locales y además sus resultados no muestran los mejores niveles de confianza para zonas fisiográficamente complejas como es el caso del Altiplano Cundiboyacense (IDEAM, 2010a).

Debido a la importancia del tema, dentro de las prioridades de Corpoica figura el estudio del clima a escala local enfocado en la detección y cuantificación de tendencias de cambio en las series de tiempo de las estaciones climáticas de diferentes regiones del país. Un primer estudio consistió en el análisis de tendencias para determinar amenazas relacionadas con el cambio del clima en zonas altoandinas de Cundinamarca y Boyacá (Peña *et al.*, en prensa), donde se utilizó una metodología no-paramétrica para detectar tendencias en las series de tiempo (método de Mann - Kendall) con un determinado nivel de confianza estadística y así identificar aquellas zonas donde están ocurriendo cambios evidentes en las variables climáticas y generar hipótesis respecto a las amenazas sobre los sistemas productivos asociadas con el cambio climático. De

manera complementaria, en el presente estudio se utiliza también la estadística no-paramétrica para cuantificar las tendencias detectadas en las series de tiempo y de esta forma tener un estimativo de la magnitud de los cambios de las variables climáticas en los últimos años y mediante el uso de sistemas de información geográfica construir una imagen espacial de estos cambios, con el fin de identificar aquellas zonas donde las variables climáticas presentan variaciones más significativas. En la literatura existen diferentes metodologías de interpolación de datos climáticos, que permiten construir superficies climáticas continuas a partir de datos registrados en ciertos puntos sobre la tierra. Varios estudios han revisado y usado técnicas de interpolación para diferentes tipos de variables climáticas en varias regiones (Díaz *et al.*, 2008; Gallardo, 2006; Ramírez *et al.*, 2005; López 1995). Para el presente estudio se utilizó el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW), para modelar la distribución espacial de las tendencias climáticas en la zona de estudio y mediante el método de validación cruzada (Cisneros *et al.*, 2005) se evaluó la bondad de ajuste del método de interpolación para cada una de las tres variables espacializadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La mayoría de estaciones climáticas analizadas se encuentran ubicadas en el Altiplano Cundiboyacense, sobre la cordillera oriental en la región Andina de Colombia, zona con la mayor densidad poblacional del país, debido a sus condiciones climáticas y a la amplia riqueza ambiental, donde predominan los humedales y los ecosistemas secos cada vez más amenazados por actividades agropecuarias y por la contaminación generada por los asentamientos humanos (Instituto Alexander Von Humboldt y Pontificia Universidad Javeriana, 2004). Esta región está conformada por tres grandes altiplanicies, la sabana de Bogotá, el valle de Ubaté y Chiquinquirá y la altiplanicie de Sogamoso, ubicadas sobre los 2.500 msnm, que se conectan entre sí por otras altiplanicies de pequeña extensión y zonas montañosas (ICANH, 1989). Como se puede observar en la tabla 1, la precipitación media anual de la zona es bastante variable, tendiendo a disminuir con la altitud. Se encuentran zonas secas con precipitaciones anuales menores a 600 mm y zonas muy húmedas con lluvias anuales superiores a 3.000 mm.

Datos utilizados

Para este estudio se utilizó información climática a escala mensual suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), proveniente de 31 estaciones meteorológicas ubicadas en los departa-

Tabla 1. Ubicación geográfica de las estaciones climáticas y precipitación anual registrada en Cundinamarca y Boyacá (Colombia)

| Municipio | Latitud (grados) | Longitud (grados) | Altitud (msnm) | Precipitación (mm) |
|----------------|------------------|-------------------|----------------|--------------------|
| Cuítiva | 5,572 | -72,944 | 3.000 | 719 |
| Tunja | 5,554 | -73,355 | 2.690 | 645 |
| Samacá | 5,512 | -73,496 | 2.600 | 710 |
| Rondón | 5,358 | -73,204 | 2.120 | 1.993 |
| Miraflores | 5,193 | -73,145 | 1.640 | 1.669 |
| Villa de Leyva | 5,656 | -73,544 | 2.215 | 992 |
| Paipa | 5,746 | -73,116 | 2.470 | 968 |
| Sogamoso | 5,677 | -72,968 | 2.500 | 715 |
| Socotá | 6,012 | -72,529 | 3.590 | 2.483 |
| Cubará | 7,006 | -72,116 | 370 | 5.011 |
| La Uvita | 6,245 | -72,545 | 2.950 | 961 |
| Guicán | 6,407 | -72,372 | 3.716 | 956 |
| Chita | 6,188 | -72,466 | 2.888 | 1.067 |
| Chiscas | 6,550 | -72,505 | 2.350 | 1.326 |
| Boavita | 6,326 | -72,579 | 2.150 | 1.259 |
| Nobsa | 5,779 | -72,891 | 2.530 | 800 |
| Sativanorte | 6,133 | -72,705 | 2.594 | 1.019 |
| Nuevo Colón | 5,354 | -73,457 | 2.438 | 913 |
| Sutatenza | 5,022 | -73,449 | 1.930 | 1.204 |
| Macanal | 4,941 | -73,317 | 1.300 | 2.279 |
| Anolaima | 4,771 | -74,438 | 1.915 | 1.188 |
| Pasca | 4,310 | -74,312 | 2.256 | 879 |
| Mosquera | 4,691 | -74,209 | 2.543 | 666 |
| Guasca | 4,880 | -73,868 | 2.750 | 763 |
| Soacha | 4,506 | -74,189 | 2.900 | 717 |
| Chocontá | 5,118 | -73,701 | 2.709 | 943 |
| Bogotá D.C. | 4,706 | -74,151 | 2.547 | 816 |
| Tenjo | 4,792 | -74,201 | 2.560 | 814 |
| Pacho | 5,142 | -74,139 | 2.000 | 1.471 |
| Fúquene | 5,467 | -73,735 | 2.580 | 1.110 |
| Gachetá | 4,830 | -73,646 | 1.752 | 1.234 |

mentos de Cundinamarca y Boyacá, 30 de ellas entre los 1.300 y 3.716 msnm y una estación ubicada a los 370 msnm (tabla 1). Aunque varias estaciones están ubicadas por debajo o por encima de lo que se considera Altiplano Cundiboyacense, fueron incluidas en los análisis para poder tener una mejor cobertura espacial y a la vez integrar en el estudio diferentes pisos térmicos. A partir de los datos diarios registrados en las estaciones, se construyeron series de tiempo anuales de las variables temperatura máxima media, temperatura mínima media y precipitación acumulada, para el periodo 1985-2008. Se usaron promedios anuales para los datos de temperatura y acumulados anuales para los datos de precipitación.

Análisis y cuantificación de tendencias

La mayoría de las series de tiempo climáticas presentaron problemas de calidad, como datos perdidos y valores

atípicos. Teniendo en cuenta este problema, se usaron metodologías que ofrecen la ventaja de trabajar con series de tiempo en las que puede haber vacíos de información y que además son metodologías robustas respecto a valores atípicos o altamente desviados. Estas metodologías son la prueba estadística de Mann - Kendall y el método de estimación de pendiente de Sen, que han sido usadas para detectar y estimar tendencias en las series de tiempo anuales de variables atmosféricas como temperatura, precipitación o concentración de contaminantes en la atmósfera (Salmi *et al.*, 2002; Yunling y Zhang, 2005). Para detectar la existencia de tendencia significativa en las series de tiempo, se realizó la prueba de Mann - Kendall (Sneyers, 1992; Aksu *et al.*, 2010; Peña *et al.*, en prensa), prueba no-paramétrica, basada en los rangos de los datos, mas no en los valores individuales, siendo bastante robusta frente a datos atípicos. La magnitud de la tendencia se estimó usando el método de Sen, en el que se asume como estimativo de la tendencia a la mediana de todas las posibles pendientes que pueden ser calculadas entre los datos de la series de tiempo, siendo este estimativo de la tendencia B , definido como:

$$B = \text{mediana} \left(\frac{X_i - X_j}{i - j} \right)$$

donde, i y j son dos posiciones dentro de la serie de tiempo de valores anuales y se cumple que $i > j$.

Generación de los mapas de tendencias

Se utilizó el método de distancia inversa ponderada (IDW) para interpolar las tendencias anuales de las variables climáticas analizadas en cada estación. Este método de interpolación determinístico es uno de los más utilizados para la construcción de mapas e interpolación de información espacial (Díaz *et al.*, 2008). La metodología es bastante sencilla y sólo necesita un par de parámetros para ser ajustado. Asigna un mayor peso al punto más cercano y este peso disminuye a medida que aumenta la distancia dependiendo de un coeficiente exponencial (p) (López, 1995). Una de las desventajas del uso de IDW, es que tiende a generar superficies cerradas alrededor de los datos cuando el coeficiente de potencia (p) es pequeño, dando un menor valor a los puntos más cercanos. Para generar superficies más suaves y continuas usando IDW, algunos autores recomiendan utilizar un coeficiente de potencia (p) mayor (Gotway *et al.*, 1996; Schloeder *et al.*, 2001), mejorando de esta forma la exactitud del modelo cuando los datos no tienen coeficientes de variación muy grandes. Para la generación de las superficies en el presente trabajo, se utilizó un coeficiente de potencia $p = 2$. Por claridad con las cifras decimales, se optó por

espacializar las tendencias de temperatura multiplicadas por 10, ilustrando los cambios detectados en un periodo de una década ya que los cambios anuales de esta variable tomaron valores demasiado pequeños (tabla 2).

Validación de los mapas

La bondad de ajuste de los métodos de interpolación depende de múltiples factores característicos de la zona de estudio, como el tamaño, la forma, la orientación, la orografía, así como de la naturaleza de las variables que se quieran interpolar, la densidad de datos existentes y la escala temporal de las variables que se elijan para realizar las interpolaciones (Portalés *et al.*, 2008).

Para evaluar el ajuste del modelo de interpolación IDW y con esto la calidad de cada mapa, se utilizó la técnica de validación cruzada (Ramírez *et al.*, 2005; Gallardo, 2006), como una forma de visualizar que tan desviados están los datos generados respecto a los datos de entrada. Se trata de comparar para cada punto que se quiere interpolar, el valor de entrada y el valor estimado por el modelo (Alonso, 2006). Entre menor sea la diferencia mejor será el ajuste del modelo y mejor será la calidad del mapa. Se compara el coeficiente de determinación (R^2) y el error medio cuadrático entre las tendencias y los datos estimados para cada una de las variables.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis no paramétrico realizado a las series anuales de las 31 estaciones se muestran en la tabla 2, donde se puede observar el nivel de confianza de la prueba estadística de detección de tendencia para cada variable y la estimación de la variación anual para la temperatura máxima media, temperatura mínima media y para la precipitación acumulada. Para la temperatura máxima, en la mayoría de estaciones climáticas analizadas se detectaron tendencias positivas con niveles de confianza significativa ($> 90\%$), asociadas a calentamientos diurnos. En relación con la temperatura mínima, la tendencia es detectada en menor número de estaciones, aunque con más altos niveles de confianza estadística (en 12 estaciones se superó el 95% de confianza estadística). La precipitación muestra tendencias significativas ($> 90\%$) sólo en 7 de las 31 estaciones analizadas.

Temperatura máxima media

Se determinó una tendencia generalizada de aumento de la temperatura máxima en 23 de las 31 estaciones analizadas. En 17 de estas, se supera el nivel de confianza estadística de 90%, en 14 estaciones el nivel de confianza es mayor al 95%, en siete se encontró aumento de

Tabla 2. Nivel de confianza estadística y variación anual de la temperatura máxima media, temperatura mínima media y la precipitación anual en 31 estaciones de Cundinamarca y Boyacá

| Municipio | Temperatura máxima | | Temperatura mínima | | Precipitación | |
|----------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------|----------------------|
| | Con-fianza | Variación anual (°C) | Con-fianza | Variación anual (°C) | Con-fianza | Variación anual (mm) |
| Cuítiva | *** | 0,067 | * | -0,063 | | 0,44 |
| Tunja | ** | 0,027 | | 0,018 | | 3,50 |
| Samacá | | 0,012 | | -0,012 | | 5,53 |
| Rondón | | 0,039 | | -0,003 | * | 22,82 |
| Miraflores | + | 0,024 | *** | -0,123 | | 0,99 |
| Villa de Leyva | * | 0,036 | | 0,008 | * | 12,29 |
| Paipa | | 0,018 | | -0,019 | | 5,99 |
| Sogamoso | ** | 0,041 | *** | 0,074 | | 4,13 |
| Socotá | | 0,017 | | -0,013 | | -4,20 |
| Cubará | * | 0,033 | | -0,027 | | -35,70 |
| La Uvita | | 0,024 | | 0,012 | | -0,36 |
| Guicán | ** | 0,093 | * | -0,025 | + | -19,64 |
| Chita | * | 0,040 | + | -0,021 | | -1,27 |
| Chiscas | | -0,002 | | -0,012 | | 1,35 |
| Boavita | ** | -0,041 | | -0,019 | | -5,12 |
| Nobsa | + | 0,035 | ** | 0,059 | | 3,06 |
| Sativanorte | | 0,013 | | -0,002 | | -7,73 |
| Nuevo Colón | * | 0,035 | | 0,001 | | 1,65 |
| Sutatenza | ** | 0,033 | * | 0,026 | * | 5,30 |
| Macanal | * | -0,049 | | 0,011 | | -0,03 |
| Anolaima | * | 0,043 | * | -0,041 | | -1,78 |
| Pasca | ** | 0,053 | *** | -0,085 | | 2,61 |
| Mosquera | *** | 0,052 | *** | 0,033 | | 6,55 |
| Guasca | | 0,041 | ** | -0,057 | | -0,92 |
| Soacha | | -0,008 | | 0,041 | | 4,99 |
| Chocontá | * | 0,021 | | -0,006 | | 0,50 |
| Bogotá D.C. | | -0,016 | ** | 0,059 | * | 13,13 |
| Tenjo | * | 0,038 | *** | 0,064 | + | 9,88 |
| Pacho | + | -0,021 | | -0,011 | | 1,43 |
| Fúquene | * | -0,050 | | -0,015 | | 8,52 |
| Gachetá | + | 0,020 | | -0,001 | * | 11,58 |

Nivel de confianza estadística: *** 99,9%, ** 99%, * 95%, + 90%

temperatura máxima con un nivel de confianza mayor al 99% y en dos estaciones el nivel de confianza es del 99,9%. Estas dos, están ubicadas en los municipios de Cuítiva y Mosquera con tasas de aumento de 0,062 y 0,052°C/año, respectivamente. Para las estaciones que mostraron aumento significativo de temperatura (nivel de confianza $> 90\%$), este aumento está en el rango de 0,02 a 0,093°C/año, con un valor medio de 0,041°C/año (tabla 2). Al promediar todas las estaciones que mostraron tendencia incremental, esta tendencia de 0,036°C/año. Es importante destacar que la más alta tendencia de aumento de temperatura máxima (0,093°C/año) se registró en la estación de mayor altitud (Guicán ubicada a 3.716 msnm), incremento anteriormente estimado en estudios realizados por el IDEAM (2010b) con

un valor de $0,097^{\circ}\text{C}/\text{año}$. Este incremento generalizado de la temperatura del aire podría tener múltiples impactos sobre los sistemas productivos y ambientales de la región, como el aumento en el consumo de agua por plantas y animales, la alteración de ciclos biológicos de diferentes organismos y cambios en la distribución potencial de nichos ecológicos, entre muchos otros.

También se observaron siete estaciones con tendencias negativas en las temperaturas máximas, cinco de ellas con nivel de confianza mayor al 90%. Estas tendencias de disminución estuvieron en el rango de $-0,021^{\circ}\text{C}/\text{año}$ a $-0,050^{\circ}\text{C}/\text{año}$, registrándose la máxima disminución anual de temperatura máxima en el municipio de Fúquene. Estas tendencias negativas son similares a las calculadas por IDEAM (2009), donde se detectaron indicadores de tendencia negativa para los municipios de Chiscas, Fúquene y Macanal. El promedio de disminución de temperatura máxima en las estaciones con tendencia significativa (nivel de confianza $> 90\%$) fue de $-0,041^{\circ}\text{C}/\text{año}$.

Calculando el promedio de todas las estaciones en las que la tendencia fue significativa (nivel de confianza $> 90\%$), ya sea de aumento o disminución, se obtuvo un promedio para la zona de $0,025^{\circ}\text{C}/\text{año}$. En general, sin tener en cuenta el nivel de confianza estadística, la tasa de cambio promedio en la zona para la variable temperatura máxima fue de $0,022^{\circ}\text{C}/\text{año}$. Este resultado está de acuerdo con

los resultados expuestos por el Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC, 2007), donde se afirma que la tendencia de incremento de la temperatura máxima del aire promediada sobre regiones continentales entre 1950 y 2004 es de $0,14^{\circ}\text{C}$ por década, teniendo en cuenta que el periodo analizado en el presente estudio fue de 1985 al 2008. La figura 1 muestra la variación espacial de la temperatura máxima en el Altiplano Cundiboyacense, observándose algunas zonas donde se agrupan estaciones con igual signo de tendencia, pero también algunas regiones, donde en cortas distancias se observan cambios bruscos, como en la parte norte, hacia la región de la sierra nevada del Cocuy. Esto indicaría, que mientras que para algunas zonas los cambios son muy homogéneos, en otras por el contrario los cambios tienen alta variabilidad.

Temperatura mínima media

Se observó una tendencia negativa de esta variable en 18 de las 31 estaciones analizadas, aunque el IPCC (2007) menciona un aumento promedio de la temperatura mínima de $0,20^{\circ}\text{C}$ por década. El promedio de disminución para las 31 estaciones es de $-0,005^{\circ}\text{C}/\text{año}$. La máxima disminución alcanza los $-0,123^{\circ}\text{C}/\text{año}$, mientras que el promedio para las estaciones donde se detectó tendencia negativa significativa (nivel de confianza $> 90\%$) fue de $-0,060^{\circ}\text{C}/\text{año}$. La disminución de las temperaturas mínimas para algunas zonas, podría representar un aumento en la frecuencia

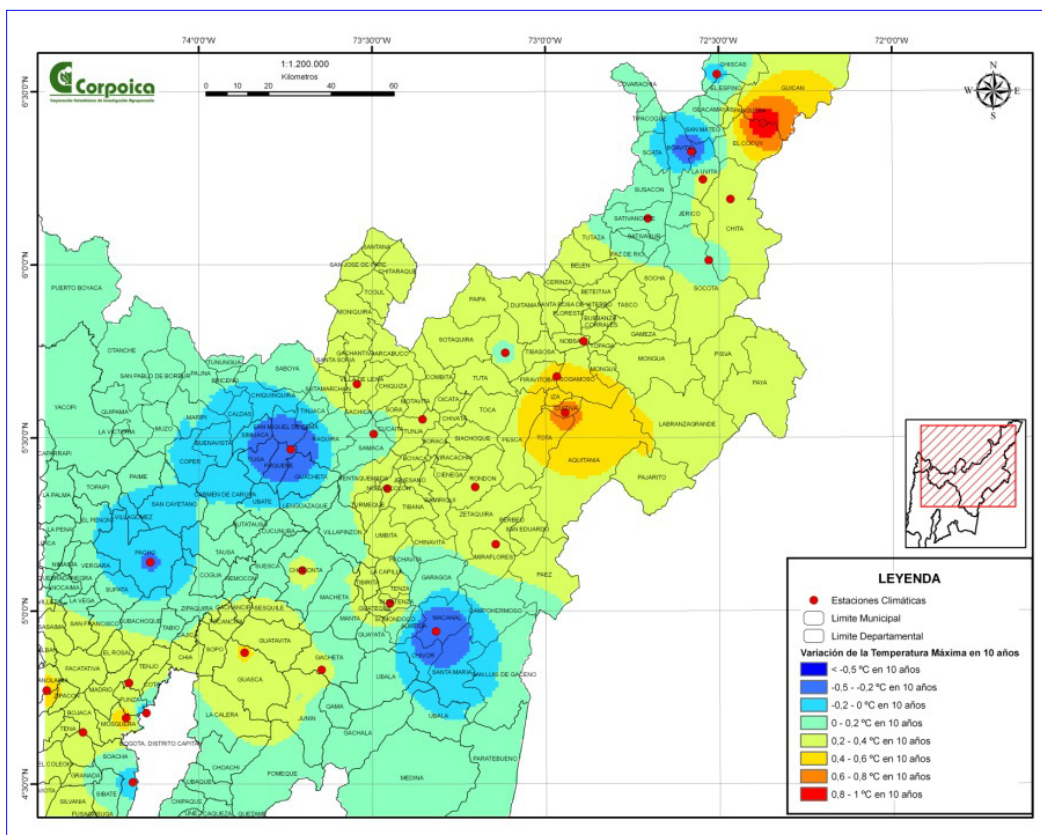


Figura 1. Tendencia de cambio ($^{\circ}\text{C}/10$ años) de la temperatura máxima media en el Altiplano Cundiboyacense

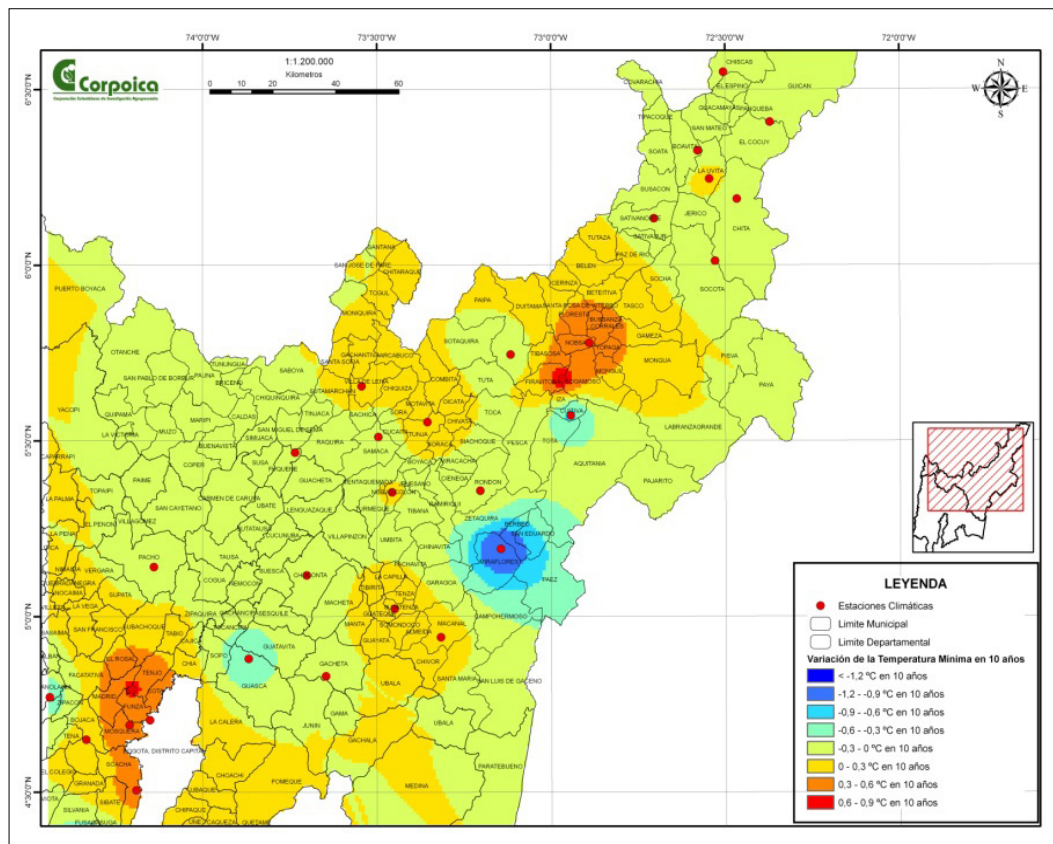
e intensidad de fenómenos de heladas, que son uno de los principales problemas que afronta la agricultura de clima frío, afectando los rendimientos, la rentabilidad de los cultivos y la ganadería, frecuentemente ocasionando pérdidas considerables en la producción de hortalizas, frutas, flores, papa, maíz, forrajes, entre otros (CCI, 2010). De las 13 estaciones donde la tendencia fue positiva, el mayor aumento fue de 0,074°C/año en la estación de Sogamoso. El promedio de incremento de 0,052°C/año, se calculó con la tendencia de seis estaciones donde el nivel de confianza superó el 95% y en tres de estas un nivel de confianza del 99,9%. Aumentos en las temperaturas de las noches, pueden incidir también negativamente, acelerando el metabolismo de las plantas, incrementando la tasa de respiración y finalmente ocasionando pérdidas en la calidad y productividad de diferentes cultivos (Alpi y Tognoni, 1991).

Aunque claramente se detectaron tendencias de aumento, también se detectaron disminuciones importantes, mostrando que las señales del cambio climático tienen manifestaciones muy locales y variables en el caso de las temperaturas mínimas (figura 2). Los más altos aumentos de temperatura mínima pueden observarse hacia la parte sur occidental de la zona, en la región de la Sabana de Bogotá, y en la zona norte, donde se detectaron los mayores gradientes en la temperatura máxima y ahora en la temperatura mínima donde los cambios son menos bruscos.

Las estaciones de Mosquera, Sogamoso y Tenjo, mostraron las tendencias con más altos niveles de confianza estadística para el aumento de las temperaturas máximas y mínimas (nivel de confianza > 95%), con variaciones cercanas a los 0,05°C/año en ambas temperaturas, siendo más marcado el aumento en las temperaturas mínimas. La estación del municipio de Pasca, mostró también tendencias con altos niveles de confianza estadística (nivel de confianza > 99%), con una tasa de incremento de 0,053°C/año en la temperatura máxima, acompañada de una alta disminución en la temperatura mínima por encima de los -0,08°C/año. En las tres estaciones ubicadas por encima de los 3.000 msnm, la tendencia de disminución de la temperatura mínima acompañada del aumento de la temperatura máxima fue evidente, sobre todo como se indicó anteriormente, en la estación de mayor altitud (estación de Güicán), que presenta la más alta tasa de aumento de las temperaturas diurnas. Resultados similares son reportados por el IDEAM (2009). En estos lugares, es posible que el cambio en la temperatura media no sea tan evidente como en las temperaturas máximas y mínimas y en zonas con bajas precipitaciones, el aumento en la temperatura diurna y disminución en la nocturna, pueden aumentar la vulnerabilidad de los ecosistemas en caso de presentarse eventos de sequía y heladas en las épocas secas.

De las nueve estaciones en las cuales la tendencia no superó el nivel de confianza estadística del 90% en la variable

Figura 2. Tendencia de cambio (°C/10 años) de la temperatura mínima media en el Altiplano undiboyacense



temperatura máxima media, siete tampoco mostraron cambios significativos en la variable temperatura mínima y como se verá más adelante, en estas estaciones tampoco se detectaron cambios en la variable precipitación. De las 13 estaciones que mostraron cambios significativos en la variable temperatura mínima, 11 también mostraron cambios en la variable temperatura máxima. Esto refuerza la hipótesis, de que en algunas zonas los cambios en las condiciones climáticas son más notorios, mientras que en otros lugares los cambios no han sido significativos.

Según el IPCC (2007), a nivel global el calentamiento de las noches es casi el doble del calentamiento de los días, patrón no identificado, donde el aumento promedio de las temperaturas de los días fue mayor al promedio de disminución de las temperaturas de las noches, implicando un aumento en las temperaturas medias. Según los estudios realizados por el IDEAM (2010a), la tasa de aumento de temperatura media es de 0,16°C por década. Tendencia calculada con información de estaciones de todos los pisos térmicos ubicadas en los aeropuertos del país, que en su gran mayoría se encuentran cerca de centros urbanos, afectados por el calentamiento adicional de las noches. Este aspecto ha sido documentado ampliamente por Wang *et al.* (1990).

Globalmente ha habido una tendencia hacia la reducción del número de eventos de heladas y días demasiado fríos,

con un incremento del número de días cálidos en el siglo pasado (Easterling *et al.*, 2000). Este comportamiento en el Altiplano Cundiboyacense es parcialmente válido, pues aunque el aumento en las temperaturas de los días es generalizado, en algunas zonas, las tendencias negativas de las temperaturas mínimas son altamente significativas, lo que implicaría noches más frías y aumento en la probabilidad de eventos de heladas.

Precipitación

En general la tendencia de cambio en los volúmenes de precipitación es menos clara que las tendencias de las temperaturas, ya que no se obtuvieron resultados con confianza estadística mayor al 95% (moderada o alta). De las 31 estaciones, 22 mostraron aumento de precipitación, mientras que nueve mostraron disminución, pero solamente en siete de las 31 estaciones el cambio fue significativo (nivel de confianza > 90%), en cinco de estas, se alcanzó el nivel de confianza estadística del 95%. En las estaciones que mostraron cambios significativos, seis mostraron un aumento en sus volúmenes de precipitación con un promedio de 12,5 mm/año (figura 3), mientras que sólo en la estación de Güicán hubo una disminución significativa de los volúmenes de precipitación con una magnitud de -19,63 mm/año. Es importante resaltar que en esta estación, la de mayor altitud, también se detectó aumento significativo en las temperaturas de los días

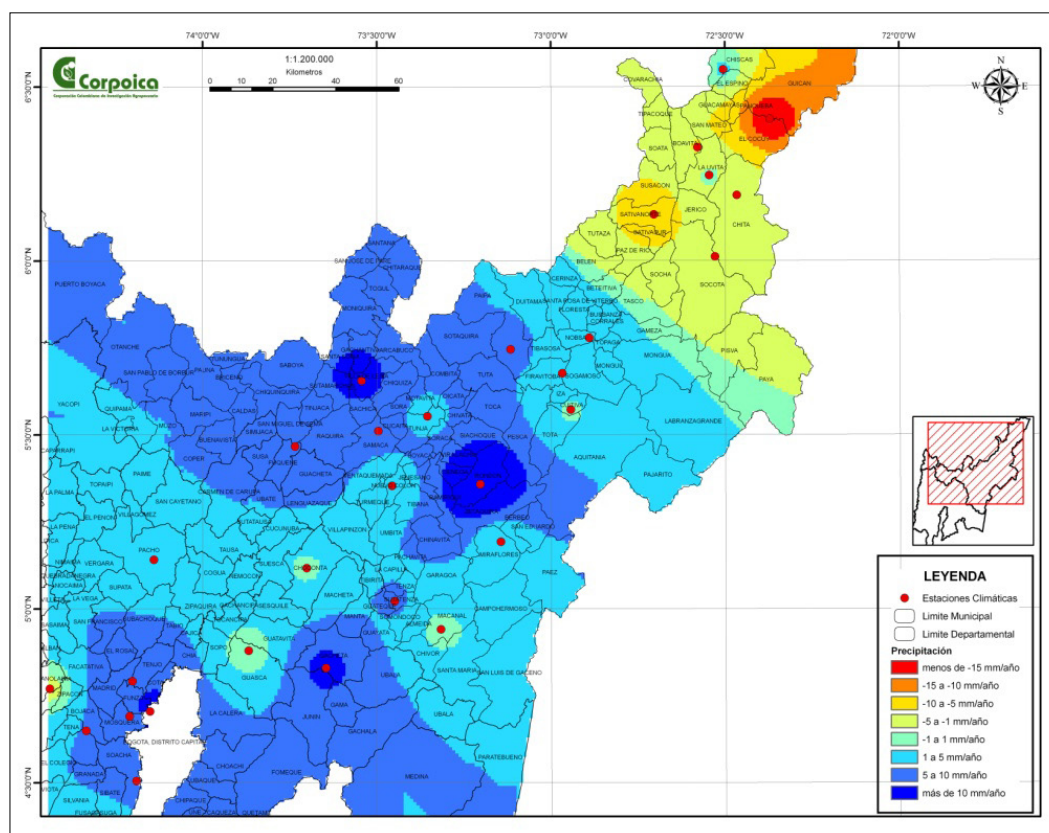


Figura 3. Tendencia de cambio (mm/año) de la precipitación acumulada anual en el Altiplano Cundiboyacense

y disminuciones en las temperaturas de las noches, mostrando los cambios más significativos en relación al resto de las estaciones.

Validación de los mapas

Los resultados de la validación cruzada indican que para la variable precipitación se obtuvo el mejor ajuste entre los datos generados por el modelo de interpolación y las tendencias climáticas. En la figura 4, se observan los valores de las tendencias de cada variable (Measured), frente a los datos generados por el modelo de interpolación IDW (Predicted). Pueden observarse mayores diferencias entre estos dos conjuntos de datos (Measured - Predicted), en las gráficas de temperatura máxima y temperatura mínima, que en la gráfica de precipitación, ya que los puntos se encuentran más separados de la línea punteada para estas dos variables. En la tabla 3, se observan los valores del coeficiente de determinación (R^2) para los tres conjuntos de datos y aunque no se obtienen valores demasiado altos, se puede ver que para la precipitación el ajuste es mejor. Es importante aclarar que los coeficientes de determinación en los tres casos son muy bajos y por lo tanto es necesario buscar la forma de mejorar la confiabilidad de los mapas.

Los valores de temperatura máxima se multiplicaron por 10 y los valores de precipitación se dividieron por 10 (figura 4). Hay que tener en cuenta que los valores de las tendencias de cambio de la variable precipitación son aproximadamente dos órdenes de magnitud mayores a los valores de cambios de temperatura, por lo tanto, aunque el modelo de interpolación es mejor para la precipitación, el valor del error cuadrático medio es más alto, pero solo por un orden de magnitud.

Tabla 3. Coeficiente de determinación (R^2), error medio y el error cuadrático medio para los tres conjuntos de datos

| | Temperatura máxima | Temperatura mínima | Precipitación |
|------------------------|--------------------|--------------------|---------------|
| R^2 | 0,170 | 0,010 | 0,220 |
| Error medio | 0,003 | 0,090 | 1,600 |
| Error cuadrático medio | 0,370 | 0,470 | 8,640 |

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aunque en algunas estaciones se detectaron tendencias negativas significativas en la temperatura máxima, en general la tendencia de esta variable para el periodo de 1985-2008 ha sido de aumento, con casos de incrementos muy importantes, como en la estación del municipio de Güicán en la sierra nevada del Cocuy, donde se cuantificó casi un grado de calentamiento por década.

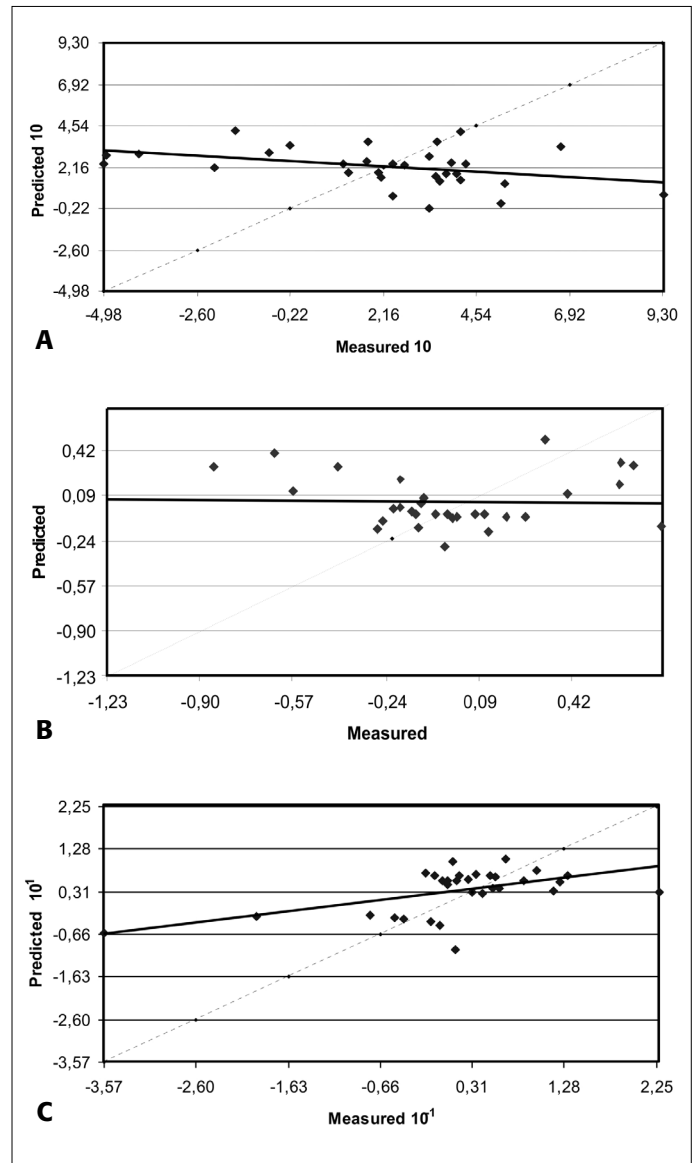


Figura 4. Validación cruzada de los modelos de interpolación (IDW). A, temperatura máxima media; B, temperatura mínima media; C, precipitación acumulada anual

En el caso de la temperatura mínima, aunque se detectaron aumentos altamente significativos, también se detectaron disminuciones importantes, mostrando que el impacto del cambio climático tiene manifestaciones muy locales, que ameritan estudios más profundos. Si bien en la zona de estudio no se encontraron análisis publicados respecto al aumento de las temperaturas mínimas, este tema se está estudiado en otros países (Jarrod *et al.*, 2010; Gawander, 2007) y debería tenerse en cuenta para dirigir futuras investigaciones y priorizaciones en las agendas de investigación.

Las tendencias de la precipitación son muy variables y en general no alcanzaron niveles de confianza estadística altamente significativos. Solamente en pocas estaciones se detectaron tendencias significativas en la precipitación y

estas apuntan a aumentos año tras año de los volúmenes de lluvia, que tendrían también diferentes tipos de impactos sobre los suelos, los cultivos y sobre sus enemigos naturales, como plagas y enfermedades.

No se encontraron correlaciones significativas que vinculen las tendencias de las temperaturas diurnas con las tendencias de las temperaturas nocturnas, tampoco con tendencias o volúmenes acumulados de precipitación, ni con la altitud.

Es importante resaltar que estudios de manejo del suelo en los sistemas productivos o cambios en el uso del suelo son aspectos que deben priorizarse y dirigir el curso de futuras investigaciones para entender el impacto local del cambio climático y relacionarlo con los cambios en las variables climáticas.

Respecto al uso de la metodología, los resultados obtenidos mediante el análisis no-paramétrico de tendencias, fueron compatibles con los análisis paramétricos realizados por el IDEAM (2009). El método IDW permitió generar superficies continuas a partir de datos puntua-

les para los tres conjuntos de tendencias. Sin embargo, como este método asume que la distribución espacial de las variables depende solamente de la distancia que hay entre los puntos del espacio, los mapas de tendencias obtenidos son poco confiables en el caso de la precipitación y muy poco confiables para las temperaturas. Se recomienda para próximos trabajos, probar otros métodos de interpolación de tendencias de variables climáticas que mejoren la confiabilidad de los mapas y en lo posible desarrollarlos incluyendo otras variables, como la elevación e inclinación del terreno, la cobertura del suelo y demás características geográficas que influyen en la distribución espacial de las variables climáticas y sus cambios en el tiempo.

La metodología usada constituye una forma eficiente de detectar y cuantificar los impactos el cambio climático a nivel local, aun cuando no se cuente con series de tiempo climáticas largas ni con recursos informáticos importantes. Esta metodología permite analizar los posibles impactos del cambio climático y orientar las acciones de investigación en el tema, así como es útil para el diseño de medidas de adaptación y mitigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aksu H, Koscu S, Simsek O. 2010. Trend analysis of hydrometeorological parameters in climate regions of Turkey. En: State Hydraulic Works, http://balwois.com/balwois/administration/full_paper/ffp-1457.pdf. Consulta: diciembre de 2010.
- Alonso F. 2006. SIG y teledetección en la Universidad de Murcia. En: http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_6.pdf. Consulta: diciembre de 2010.
- Alpi A, Tognoni F. 1991. Cultivo en invernadero. 3a ed. Edizioni Agricole. Bologna, Italia. 353 p.
- Cisneros J, Fernandez A, Nuñez J, Fernandez O, Blanco J, Castedo F. 2005. Aplicación de técnicas geoestadísticas en la elaboración de cartografía de existencias a escala comarcal. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 19:169-173.
- Corporación Colombia Internacional – CCI . 2010. Como inciden las heladas en los precios de los alimentos. En: http://www.cci.org.co/publicaciones/1_Ene-15-10%20Heladas%20y%20alimentos.pdf. Consulta: diciembre de 2010.
- Cortés J, Betancourt A, Argüelles J, Pulido A. 2010. Distribución de garrapatas *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (Canestrini, 1888) en bovinos y fincas del Altiplano Cundiboyacense (Colombia). Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria 11(1):73-84.
- Díaz P, Sánchez I, Quiroz R, Garatuza P, Watts T, Cruz I. 2008. Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de Barlovento y Sotavento del Golfo de México. Agricultura Técnica en México 34(3):279-287.
- Easterling D, Evans J, Groisman P, Karl T, Kunkel K, Ambenje P. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. Bulletin of the American Meteorological Society 81(3):417-425.
- Environmental Protection Agency – EPA. 2010. Climate change indicators in the United States. En: http://www.epa.gov/climatechange/indicators/pdfs/Climate_Indicators_full.pdf. Consulta: diciembre de 2010.
- Evans D. 1978. *Boophilus microplus* ecological studies and a tick fauna synopsis related to the developing cattle industry in the Latin American and Caribbean region, (tesis), Londres, Life Science Department, University of East London. 283 p.
- Frich P, Alexander L, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M, Klein T, Peterson T. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research 19:193-212.
- Fundación Biodiversidad. 2009. Generación de escenarios locales de cambio climático en parques nacionales para evaluación de impactos. En: <http://www.fundacion-biodiversidad.es/cambio-climatico/proyectos-cambio/buscador-cambio/103375>. Consulta: diciembre de 2010.
- Gallardo A. 2006. Geoestadística. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente 15(3):48-58.
- Gawander J. 2007. Las consecuencias del cambio climático sobre los cultivos de caña de azúcar en Fiji. Boletín de la Organización Meteorológica Mundial OMM 56(1):34-39.
- Gotway C, Ferguson R, Hergert, Peterson A. 1996. Comparison of kriging and inverse distance methods for mapping soil parameters. Soil Science Society of American Journal 60:1237-1247.
- Instituto Alexander Von Humboldt y Pontificia Universidad Javeriana. 2004. Caracterización biofísica del Altiplano Cundiboyacense. En: Departamento de Ecología y Territorio, Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, [http://www.humboldt.org.co/humboldt/homeFiles/biologia/resumenaltiplano\[1\].pdf](http://www.humboldt.org.co/humboldt/homeFiles/biologia/resumenaltiplano[1].pdf). Consulta: diciembre de 2010.
- Instituto Colombiano de Antropología e Historia – ICANH. 1989. Colombia prehispánica: regiones arqueológicas. En: www.banrepcultural.org/blaavirtual/arqueologia/prehisp/cp08.html. Consulta: diciembre de 2010.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM. 2010a. Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100). Nota Técnica del IDEAM, Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM. 2010b. Evidencias del cambio climático en Colombia. Experiencias en el uso y aplicación de tecnologías satelitales para observación de la tierra. Edición especial Comisión Colombiana del Espacio. Bogotá. pp. 51-57.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM. 2009. Evidencias de cambio climático para Boyacá y Cundinamarca mediante el análisis de tendencias de la precipitación y la temperatura usando el Rclimdex. Nota Técnica del IDEAM, Bogotá.
- Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. 2007. Fourth assessment report: climate change 2007. En: www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch3s3-2-2.html. Consulta: diciembre de 2010.
- Jarrold R, Jeffrey R, Maximilian A, Moya P, Dobermann A, Dawe R. 2010. Rice yields in tropical/subtropical Asia exhibit large but opposing sensitivities to minimum and maximum temperatures. Proceedings of the National Academy of Sciences 107(33):14562-14567.
- Jones P, Osborn J, Biffs K. 2001. The Evolution of climate over the last millennium. Science 292:662-667.
- López V. 1995. Comparación de 4 métodos numéricos utilizados en la interpolación puntual de precipitación pluvial en el estado de Veracruz, (tesis de maestría), Texcoco, Estado de México. 71 p.
- McElwain L, Sweeney J. 2003. Climate change in Ireland. Recent trends in temperature and precipitation. En: Department of Geography, National University of Ireland, <http://www.ucd.ie/gsi/pdf/36-2/climate.pdf>. Consulta: diciembre de 2010.
- Peña A, Arce A, Boshell F, Paternina M, Ayarza M, Rojas E. 2010. Análisis de tendencias para determinar amenazas relacionadas con el cambio del clima en zonas agrícolas altoandinas de Cundinamarca y Boyacá. Agronomía Colombia (en prensa).
- Portalés C, Boronat N, Pardo J, Balaguer A. 2008. Un nuevo método para el cálculo de precipitaciones medias mediante técnicas de interpolación geoestadística considerando las características geográficas y topográficas del territorio. En: Congreso Internacional de Ingeniería Geográfica y Topográfica. <http://cgat.webs.upv.es/bigfiles/63-Portales.pdf>. Consulta: diciembre de 2010.
- Ramírez J, Fernandez A, Nuñez J, Fernandez O, Blanco J, Castedo F. 2005. Aplicación de técnicas geoestadísticas en la elaboración de cartografía de existencias a escala comarcal. Cuadernos de la sociedad Española de Ciencias Forestales 19:169-173.
- Salmi T, Määttä P, Anttila T, Ruoho-Airola, Amnell T. 2002. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates. Publications on Air Quality No. 31. Finnish Meteorological Institute. Finlandia, Finlandia.
- Sneyers R. 1992. Use and misuse of statistical methods for the detection of climate change. Report on the informal planning meeting of stational. Procedures for climate change detection. World Climate Data Programme Series 20, annex 3, WMO. Ginebra, Suiza.
- Schloeder A, Zimmerman E, Jacobs J. 2001. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. Soil Science Society of American Journal 65:470-479.
- Wang W, Zeng Z, Karl T. 1990. Urban heat island in China. Geophysical Research Letters 17(12):2377-2380.
- Yunling H, Zhang Z. 2005. Climate Change from 1960 to 2000 in the Lancang River Valley, China. Mountain Research and Development 25(4):341-348.