

Señales de cambio climático en series de lluvia en Antioquia

Diana Cantor¹, Andrés Ochoa²

¹ Estudiante de Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia.

dccantor@unal.edu.co

² Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia. aochoaj@unal.edu.co

Resumen

La gran variabilidad espacio-temporal de la lluvia tropical, plantea retos en el entendimiento de su distribución, frecuencia e intensidad. El adecuado entendimiento de esta importante variable, es fundamental en la toma de decisiones en diferentes campos, como la prevención de desastres, generación de energía, construcción de obras civiles, entre otros. Los resultados de las pruebas estadísticas desarrolladas en series de tiempo de esta variable, llevan a la formulación de medidas de adaptación a través de estrategias apropiadas en la utilización de los recursos hídricos y la ordenación del territorio.

En este trabajo se evaluaron tendencias de largo plazo en series mensuales de lámina de lluvia, número de días de lluvia y series mensuales de la lámina de lluvia promedio diaria (obtenidas al dividir la lámina de lluvia por el número de días lluviosos de cada mes), en 45 estaciones hidroclimatológicas distribuidas en Antioquia (Colombia). Las tendencias de largo plazo de dichas series mensuales fueron analizadas mediante la aplicación de las pruebas T de Sen, Mann-Kendall, Mann-Kendall para datos autocorrelacionados, Rho de Spearman y la prueba de homogeneidad en la tendencia de Van Belle y Hughes. Adicionalmente la magnitud de la tendencia se evaluó con el estimador de pendiente de Sen. Los resultados mostraron tendencias crecientes en 18 estaciones para la variable precipitación, 26 estaciones para la variable número de días con lluvia y en 10 series mensuales de la lámina de lluvia promedio diaria.

Palabras claves: Precipitación, número de días con lluvia, serie de tiempo, homogeneidad.

Abstract

The large spatio-temporal variability of tropical rainfall data, presents a challenge in the understanding of the distribution, frequency and intensity of this data. The proper comprehension of this subject is key in the decision making for different fields, including disaster prevention, energy generation, and civil construction, among others. The results of statistical tests developed by time series data lead the development of actions to adapt, through the appropriate strategies, in the use of water resources and planning.

This study evaluated the trend of long-term monthly series of a sheet of rain, the number of rainy days and monthly series of an average sheet of rain (obtained by dividing the rainfall with the number of rainy days each month) in 45 stations distributed in Antioquia (Colombia). The long-term trends of these monthly series were analyzed by applying Sen's T tests, Mann-Kendall, Mann-Kendall for autocorrelated data, Spearman's rho and by the homogeneity in the trend test of Van Belle and Hughes. Additionally, the magnitude of the trend was evaluated by the Sen slope estimator. The results showed an increased trend in the 18 stations for the variable rainfall, at the 26 stations for the variable number of days with rain and in the 10 monthly series of the daily average rainfall.

Keywords: precipitation, rainy days, time series, homogeneity

Introducción

Antioquia tiene un relieve caracterizado por altos gradientes topográficos, los cuales influyen fuertemente en la variabilidad espacial del clima en la región. La temperatura varía claramente con la elevación sobre el nivel del mar, las montañas modifican el curso de los vientos y potencian la formación de nubes por ascenso orográfico, ejerciendo por lo tanto un control en la distribución de

humedad del aire y la precipitación. En este trabajo se hace un diagnóstico estadístico de las tendencias de largo plazo en tres variables relacionadas con la precipitación en Antioquia: la lámina de lluvia, el número de días lluviosos y el cociente entre estas dos variables. Son pocos los estudios que se han hecho sobre la cantidad de días con lluvia. Gallego et al. (2011), en un estudio en el que analizaron las series de lluvias sobre la península ibérica durante el período 1903-2003 encontraron que en la mayor parte de los sitios el número de días con lluvia ha aumentado, excepto en la zona oeste de Portugal y el golfo de Cádiz, donde han decrecido. Kumar y Jain (2010), en su estudio sobre las tendencias de la precipitación en la India, encontraron señales mezcladas de aumento y disminución del número de días de lluvia, tanto a escala anual como estacional. Ventura et al. (2002) encontraron reducciones de hasta el 20% en el número de días de lluvia en Bologna (Italia).

Materiales y Métodos

El Anuario Estadístico de Antioquia (AEA) recopila y publica anualmente información estadística de muchas variables del departamento, entre ellas registros de precipitación y número de días con lluvia a nivel mensual en varios de los municipios. Dicha información fue publicada únicamente en papel desde el año 1937 a 1996 y en formato digital desde 1997 a 2008. Para este trabajo se digitalizó la información de lámina de lluvia y número de días con lluvia de 62 estaciones en 55 municipios de Antioquia desde 1938 a partir de los archivos de la biblioteca Efe Gómez de la Universidad Nacional. Con esta información se obtuvo una tercera variable, la relación entre lámina de lluvia y número de días con lluvia.

La Figura 1 presenta la ubicación de las estaciones del Anuario Estadístico de Antioquia analizadas en este estudio.

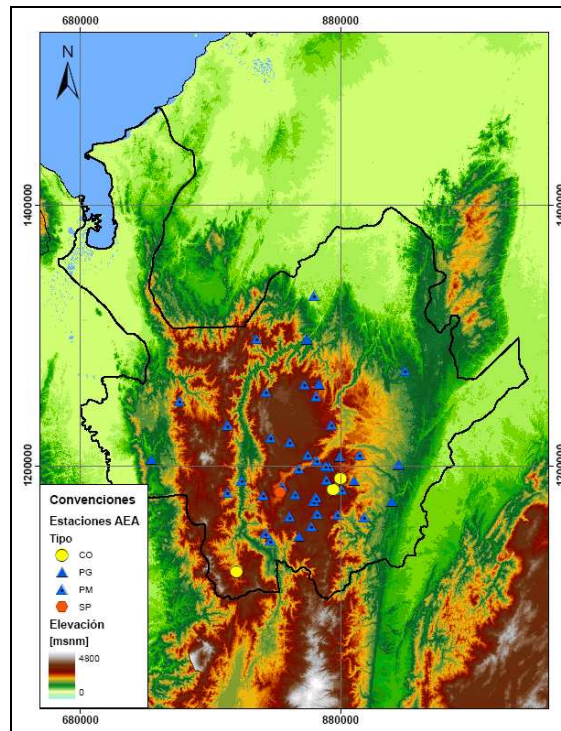


Figura 1. Ubicación de las estaciones pluviométricas reportadas en el Anuario Estadístico de Antioquia.

Para el análisis de tendencias de largo plazo, se implementaron 5 pruebas estadísticas sobre las series mensuales de lámina de lluvia, número de días de lluvia y series mensuales de la lámina de lluvia promedio diaria y sobre sus correspondientes series estandarizadas. Estas pruebas son: T de Sen, Van Belle y Hughes, rho de Spearman, Mann Kendall y Mann Kendall para datos autocorrelacionados. Adicionalmente se implementó “El estimador de pendiente de Sen” para el cálculo de la magnitud de la tendencia.

- *Prueba T de Sen*

La prueba T de Sen es una prueba de rango alineado que sugiere remover el ciclo estacional de la serie mediante la substracción a cada dato de la media mensual promediada en los años y la posterior asignación de rangos a cada diferencia. Con esta información se calcula el estadístico T

como se presenta a continuación (Sen, 1968; Farrell, 1980; Van Belle yHughes, 1984; Kahya yKalay, 2004)

$$T = \left(\frac{12m^2}{n(n+1) \sum \sum (R_{ij} - R_j)^2} \right)^{\frac{1}{2}} * \left(\sum_{i=1}^n \left(i - \frac{n+1}{2} \right) \left(R_i - \frac{nm+1}{2} \right) \right)$$

Donde:

n Años de periodo de registro.

m Número de meses o estaciones a evaluar.

R_{ij} Rango de cada dato donde con $i=1, \dots, n$, y $j=1, \dots, m$.

R_j Promedio de los rangos sobre los años

R_i Promedio de los rangos sobre los meses

Se rechaza la hipótesis de no tendencia si el $|T|$ excede un percentil especificado de la distribución normal.

- *Prueba Van Belle yHughes*

Van Belle y Hughes (1984) consideraron la importancia en la evaluación de la heterogeneidad de tendencia entre meses o estaciones, demostrando que el resultado de una prueba de tendencia puede inducir a conclusiones ambiguas cuando este factor no es tomado en cuenta. A continuación se presenta el estadístico de prueba (Van Belle yHughes, 1984; Kahya yKalay, 2004).

$$\chi^2_{homogeneo} = \chi^2_{total} - \chi^2_{tendencia} = \sum_{i=1}^m (z_i)^2 - m (\bar{z})^2$$

Donde

$$Z_i = \frac{S_i}{\sqrt{V(S_i)}} \text{ y } \bar{Z} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_i$$

m estaciones evaluadas (12 meses)

S_i y $V(S_i)$ Obtenidos de la prueba de Mann Kendall

Si $\chi^2_{\text{homogeneo}}$ excede el nivel crítico de α para la distribución chi-cuadrado con $m-1$ grados de libertad, la hipótesis nula de tendencia homogénea estacional debe ser rechazada.

Si $\chi^2_{\text{homogeneo}}$ no excede el nivel crítico de α , se calcula $\chi^2_{\text{tendencia}}$ para la distribución chi-cuadrado con 1 grado de libertad. Si $\chi^2_{\text{tendencia}}$ no excede el nivel crítico de α , no hay tendencia lineal. Si $\chi^2_{\text{tendencia}}$ excede el nivel crítico de α , hay tendencia lineal.

- *Prueba rho de Spearman*

La prueba rho de Spearman es una prueba de rango no paramétrica que determina la existencia de correlación entre pares de datos consecutivos en una serie de tiempo. El estadístico de prueba se define como sigue (Sneyers, 1990; Yue et al., 2002; Kahya y Kalay, 2004)

$$D = \frac{6 \sum_{i=1}^n [R(X_i) - i]^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde

n Tamaño de la muestra

$R(X_i)$ i -ésimo rango de la observación X_i

Para tamaños de muestra grandes, el estadístico D distribuye aproximadamente normal con media cero y varianza:

$$V(D) = \frac{1}{n-1}$$

Finalmente se calcula un estadístico Z estandarizado:

$$Z_{SR} = \frac{D}{\sqrt{V(D)}}$$

Se rechaza la hipótesis de no tendencia si el $|Z_{SR}|$ excede un percentil especificado de la distribución normal.

- *Prueba de Mann Kendall*

La prueba de Mann Kendall se basa en el cálculo del estadístico S definido como sigue (Van Belle y Hughes, 1984, Yue et al., 2002; Kahya y Kalay, 2004).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) > 0 \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = 1$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) = 0 \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = 0$$

$$\text{Si } (x_j - x_i) < 0 \quad \text{sgn}(x_j - x_i) = -1$$

Donde

n Tamaño de la muestra

x_j y x_i Son datos secuenciales

Para tamaños de muestra grandes, el estadístico S distribuye aproximadamente normal con media cero y varianza:

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5)}{18}$$

Donde:

\sum_t indica que el término $t(t-1)(2t+5)$ es evaluado para los t grupos de los existentes en la serie.

Finalmente se calcula un estadístico Z estandarizado:

$$\text{Si } S > 0 \quad Z_{MK} = \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}}$$

$$\text{Si } S = 0 \quad Z_{MK} = 0$$

$$\text{Si } S < 0 \quad Z_{MK} = \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}}$$

Se rechaza la hipótesis de no tendencia si el $|Z_{MK}|$ excede un percentil especificado de la distribución normal.

- *Prueba Mann Kendall para datos autocorrelacionados*

La hipótesis nula de la prueba de Mann Kendall afirma que los datos de una serie de tiempo son independientes e idénticamente distribuidos. Sin embargo bajo la existencia de una autocorrelación positiva en los datos, incrementa la posibilidad de detectar tendencias cuando realmente no existen y viceversa. Por este motivo Hamed y Ramachandra (1998) proponen una nueva metodología para el cálculo de la varianza de Mann Kendall para datos autocorrelacionados.

$$V^*(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} * \frac{n}{n_5^2}$$

Donde

$$\frac{n}{n_s} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} * \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2) \rho_s(i)$$

Donde

n Tamaño de la muestra.

$\rho_s(i)$ Función de autocorrelación de los rangos de las observaciones.

- *Estimador de pendiente de Sen*

El estimador de pendiente de Sen es un procedimiento no paramétrico que estima cambios por unidad de tiempo en una serie cuando existe en ella tendencia lineal. Para N pares de datos, la pendiente de Sen se estima como sigue (Sen, 1968b; Kahya y Kalay, 2004).

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}$$

Donde

$i=1, \dots, N$.

x_j y x_k Son datos en los tiempos j y k ($j > k$), respectivamente.

La mediana de los N valores de Q_i es el estimador de pendiente de Sen.

Análisis de Resultados

La distribución espacial de las tendencias detectadas en las series de tiempo se visualiza mediante mapas en la ,Figura 3 y Figura 4. Los círculos rojos indican tendencia creciente y los azules tendencia decreciente. El diámetro de cada círculo indica la magnitud de la tendencia detectada.

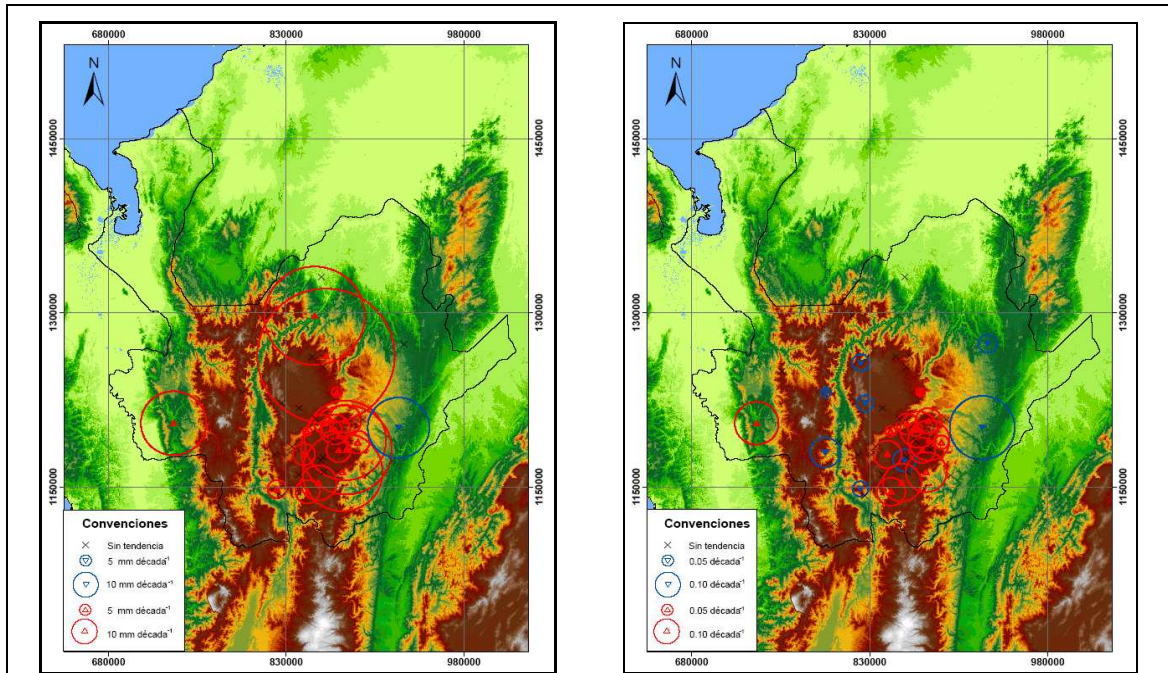


Figura 2. Magnitud de las tendencias detectadas en las series de precipitación media mensual (izquierda) y precipitación media mensual estandarizada (derecha).

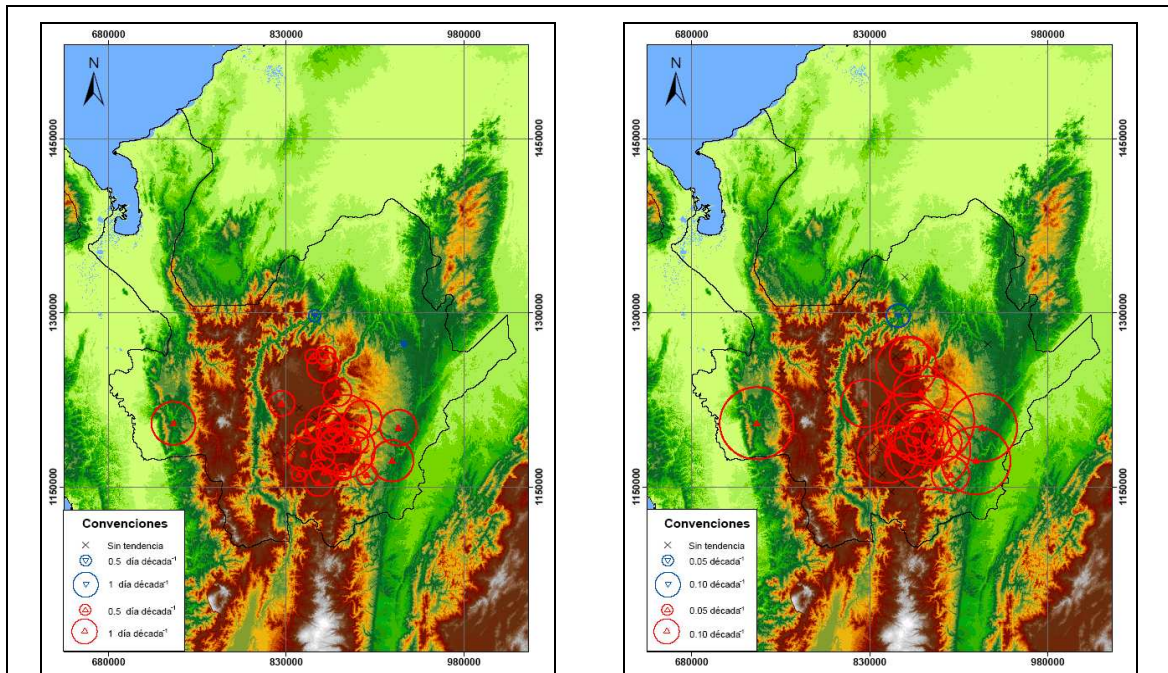


Figura 3. Magnitud de las tendencias detectadas en las series mensuales de número de días con lluvia (izquierda) y series mensuales estandarizadas de número de días con lluvia (derecha).

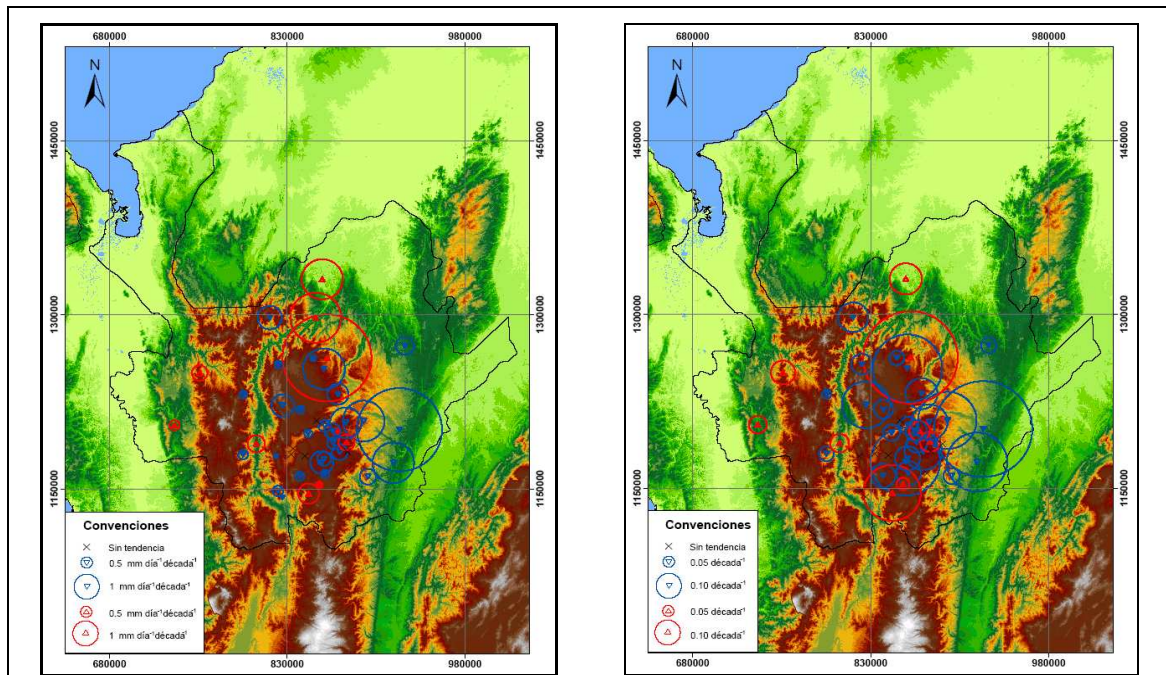


Figura 4. Magnitud de las tendencias detectadas en lasserias mensuales de la lámina de lluvia promedio diaria en Antioquia (izquierda) y para series estandarizadas de la misma variable (derecha).

Tabla 1. Distribución de la cantidad de series de lluvia en Antioquia en las que se detectó tendencia creciente (\nearrow), decreciente (\searrow) y no se detectó tendencia (\rightarrow).

Series	Tendencia		
	\nearrow	\searrow	\rightarrow
Precipitación	18	1	26
Precipitación estandarizada	14	8	23
Número de días con lluvia	26	2	17
Número de días con lluvia estandarizado	18	1	26
Relación entre precipitación y N° de días con lluvia	10	27	8
Relación entre precipitación y N° de días con lluvia estandarizado	9	24	12

Conclusiones

En total se analizaron 45 estaciones en Antioquia con registros mensuales históricos de precipitación y número de días con lluvia. Para la variable precipitación, 26 estaciones no presentan

tendencia significativa, 18 estaciones presentan tendencias crecientes con magnitudes de hasta 58 mm/década y sólo 1 estación (Caracolí) presenta tendencia decreciente con una magnitud de 26.6 mm/década. Repitiendo el proceso para las series estandarizadas, 23 no presentan tendencia significativa, 14 presentan tendencia creciente y 8 tendencia decreciente. Estos resultados evidencian claramente aumentos generalizados en la precipitación, si bien no en todo el departamento, si por lo menos en las regiones central y oriental de éste, que es donde se concentran las estaciones pluviométricas que se tuvieron en cuenta en el análisis. Esta señal es preocupante teniendo en cuenta la recurrencia con que en los últimos años han ocurrido desastres naturales asociados a las precipitaciones excesivas.

La variable número de días con lluvia, 17 estaciones no muestran tendencia significativa, 26 estaciones presentaron tendencias crecientes con magnitudes hasta de 2.4 días/década y 2 estaciones presentaron tendencia decreciente con magnitudes hasta de 0.5 días/década. Para las series mensuales estandarizadas, 26 estaciones no presentan tendencias significativas, 18 estaciones presentan tendencias crecientes y 1 estación tendencia decreciente. Los resultados apuntan a un aumento claro en el número de días con lluvia en la zona centro y sureste del departamento de Antioquia.

En el caso de las series mensuales de la lámina de lluvia promedio diaria (obtenidas al dividir la lámina de lluvia por el número de días lluviosos de cada mes), 8 series no presentan tendencia significativa, 10 presentan tendencias crecientes con magnitudes hasta de 3.8 mm/días/década, y 27 presentan tendencias decrecientes con magnitudes de hasta de 3.6 mm/días/década. Para las series mensuales estandarizadas, 12 no presentan tendencias significativas, 9 presentan tendencias crecientes y 24 tendencias decrecientes. Estos resultados corresponden mayoritariamente a las zonas centro y suroriental del departamento

Los resultados encontrados en las tres variables indican un decrecimiento en la lámina de lluvia promedio diaria, a la vez que un aumento de la lámina de lluvia y el número de días lluviosos a

escala mensual. Esto sin embargo no significa que no se produzcan tormentas severas, o que la intensidad de las tormentas extremas haya decrecido, pues es muy posible que los valores de altos períodos de retorno aumenten mientras los valores cercanos a la media disminuyen; esta es de hecho una de las consecuencias del cambio climático que han señalado los expertos en el área.

Estos resultados plantean preguntas y retos muy importantes para la investigación y la gestión de recursos en Antioquia. Algunas de estas preguntas se relacionan necesariamente con el diseño y la operación de centrales hidroeléctricas, la planificación agropecuaria, la prevención y la mitigación de inundaciones, deslizamientos y demás desastres relacionados con el exceso de lluvias, la prevención de enfermedades como Malaria, Dengue, Cólera, Leptospirosis, el diseño y el mantenimiento de la infraestructura vial, etc.

Reconocimientos

Los autores queremos agradecer a la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia y a la Beca Jóvenes Investigadores. Virginia Vallejo de Colciencias, por el apoyo brindado a la estudiante Diana Cantor Gómez, en la financiación de su Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos.

Referencias

Anuario Estadístico de Antioquia. 1938-2008. Departamento Administrativo de Planeación.

Farrell, R. 1980. Methods for classifying changes in environmental conditions, Tech. Rep. VRF-EPA7.4-FR80-1, Vector Res. Inc., Ann Arbor, Mich., 1980.

Gallego, M.C., R.M. Trigo, J.M. Vaquero, M. Brunet, J.A. García, J. Sigró, M.A. Valente. 2011. Trends in frequency indices of daily precipitation over the Iberian Peninsula during the last century. *Journal of Geophysical Research*, no. 116(D2), doi:10.1029/2010JD014255.

- Hamed, K.H., A. Ramachandra-Rao. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, no. 204(1-4): 182-196, doi:10.1016/S0022-1694(97)00125-X.
- Kahya, E., S. Kalayci. 2004. Trend analysis of streamflow in Turkey. *Journal of Hydrology*, no. 289(1-4): 128-144, doi:10.1016/j.jhydrol.2003.11.006.
- Kumar, V., S.K. Jain. 2010. Trends in seasonal and annual rainfall and rainy days in Kashmir Valley in the last century. *Quaternary International*, no. 212(1): 64-69, doi:10.1016/j.quaint.2009.08.006.
- Mesa, O., G. Poveda, L.F. Carvajal. 1997. *Introducción al Clima de Colombia*, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Mesa, O.J. 2007. *¿Adónde va a caer este globo?* Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Ochoa, A., G. Poveda. 2004. Diagnostics of Spatial Distribution of Climate Change Signals in Colombia. *Geophysical Research Abstracts*.
- Pérez, C.A., G. Poveda, O.J. Mesa, L.F. Carvajal, A. Ochoa. 1998. Evidencias de cambio climático en Colombia: tendencias y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual. *Bulletin de l'Institut français d'études andines. Variations climatiques et ressources en eau en Amérique du Sud: Importance et conséquences des événements El Niño*. Lima Tome 27, no. 3: 537-546.
- Poveda, G., C. Rave, R. Mantilla. 2001. Tendencias en la distribución de probabilidades de lluvias y caudales en Antioquia. *Meteorología Colombiana*, no. 3: 53-60.
- Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Vol., XXVIII, no. 107.
- Sen, P.K. 1968. On a class of aligned rank order tests in two-way layouts. *The Annals of Mathematical Statistics*, no. 39(4): 1115-1124.

- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *American Statistical Association Journal*, no. 63(324): 1379-1389.
- Sneyers, R. 1990. On the statistical analysis of series of observations. World Meteorological Organization, Technical note No. 143, WMO, no. 415.
- Van Belle, G., J.P. Hughes. 1984. Nonparametric tests for trend in water quality. *Water Resources Research*, no. 20(1): 127-136.
- Ventura, F., P. R. Pisa, E. Ardizzoni. 2002. Temperature and precipitation trends in Bologna (Italy) from 1952 to 1999. *Atmospheric Research*, no. 61(3): 203-214, doi:10.1016/S0169-8095(01)00135-1.
- Yue, S., P. Pilon, G. Cavadias. 2002. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, no. 259(1-4): 254-271, doi:10.1016/S0022-1694(01)00594-7.