

Determinación de la variabilidad de la curva de duración de caudales por efectos no estacionarios en Colombia

Determination of variability of flow duration curve for non-stationary effects in Colombia

Gaviria, C.J.^a, Carvajal-Serna, L.F.^b

^aIngeniero consultor, MSc Recursos Hidráulicos
E-mail: cjgaviriaa@unal.edu.co

^bProfesor asociado, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, MSc Recursos Hidráulicos
E-mail: lfcavaj@unal.edu.co

Recibido: 19/04/2020

Aceptado: 18/09/2020

Publicado: 31/10/2020

Citar como: Gaviria, C.J., Carvajal-Serna, L.F. 2020. Determination of variability of flow duration curve for non-stationary effects in Colombia. *Ingeniería del agua*, 24(4), 269-283. <https://doi.org/10.4995/la.2020.13556>

RESUMEN

En el presente trabajo, se analizaron los cambios temporales en las curvas de duración de caudales CDC correspondientes a estaciones de caudales diarios en Colombia mediante la aplicación del test no paramétrico de *Mann-Kendall*, el Estimador de Pendiente de Sen y la pendiente de la regresión lineal de la serie. Se calculan caudales característicos con el fin de revisar tendencias a largo plazo entre distintas magnitudes o porcentajes de excedencia (percentiles 95, 75, 25 y 1). De forma adicional, se estima la tendencia en la desviación estándar en ventanas móviles de 10 años. Se observan tendencias crecientes significativas en las regiones del occidente (Chocó) y nordeste (Bajo cauca) de Colombia, mientras que para tendencias decrecientes no se observa ningún patrón espacial. Se encontraron tendencias con magnitudes entre $-0.0068 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$ y $0.047 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$.

Palabras clave | caracterización de caudales, tendencias a largo plazo, prueba de Mann Kendall, pendiente de Sen, ENSO.

ABSTRACT

In this work, long term temporal changes are analyzed in several flow duration curves FDC from Colombian daily gauging stations by the mean of the application of non-parametric Mann-Kendall test, the Sen's Slope Estimator and the slope of the linear regression of the time series. Characteristic flows were estimated aiming to analyze the existence of long-term trends in different flow magnitudes (percentiles corresponding to 95, 75, 25 and 1 percentage of exceedance). Additionally, standard deviation long term trend is estimated using a 10 years mobile window. Significant increasing trends are observed in the regions of Chocó (east) and Bajo Cauca (north-east) while decreasing trends did not present any particular spatial pattern. Long term trends magnitudes between $-0.0068 \text{ m}^3/\text{s}/\text{day}$ and $0.047 \text{ m}^3/\text{s}/\text{day}$ were found.

Key words | flow regime characterization, long term trends, Mann Kendall test, Sen's slope estimator, ENSO.

INTRODUCCIÓN

En general los sistemas de planeación del recurso hídrico han sido pensados bajo el principio de la estacionariedad, éste ha sido asumido en diferentes aplicaciones hidrológicas y distintos enfoques tales como frecuencia y magnitud de las inundaciones, oferta hídrica, calidad del agua, entre otros. La estacionariedad de parámetros climáticos debido a cambios antrópicos y a ciclos geoclimáticos (IPCC, 2014), genera la necesidad de estudiar el ciclo del agua, pero teniendo en cuenta las posibles variaciones a largo plazo, en algunos parámetros relacionados con los procesos de lluvia y escorrentía, en especial variables climáticas. El entendimiento de la respuesta de algunas cuencas del país ante posibles cambios graduales a lo largo del tiempo se hace posible con un análisis no estacionario, el cual puede ser llevado a cabo mediante la revisión de variaciones temporales en las curvas de duración de diferentes ríos.

Para caracterizar el régimen de caudales a largo plazo de una corriente natural se utiliza la Curva de Duración de Caudales o CDC, la cual representa la relación entre la magnitud y la frecuencia o el porcentaje de tiempo que dicha magnitud es igualada o excedida (Vogel y Fennessey, 1994). Debido a la cantidad de información que puede inferirse de ella y a los análisis del régimen de descargas que ésta posibilita, la CDC es uno de los conceptos y herramientas gráficas más utilizadas dentro de la hidrología (Foster, 1933).

Los cambios temporales en la CDC pueden ser observados mediante un análisis de largo plazo, el análisis de tendencias planteado difiere de un análisis estacional, es decir, el que se enfoca en los ciclos temporales como el intra e inter anual. El problema de la no estacionalidad dificulta el análisis de tendencias pues induce variaciones en los valores de las series, en este caso, de caudales (Gilbert, 1987).

El clima es uno de los principales factores que influyen de manera directa en el régimen de descargas, y en Colombia existen evidencias de los efectos del cambio climático en los valores de precipitación en varias regiones del país (Pérez et al., 1998) por ende, es un tema pendiente de estudio la estacionariedad o no del comportamiento a largo plazo de los caudales a través del tiempo. Hay experiencias a nivel global en el estudio de la estacionariedad de los caudales, se ha encontrado que en condiciones medias y mínimas no se han observado tendencias lo suficientemente claras, mientras que se tienen registros de que las inundaciones se han hecho más frecuentes (Barriendos et al., 2003; Villarini et al., 2009).

Barriendos et al. (2003) analizaron series de registros de inundaciones en la Península Ibérica desde los siglos XIV y XVII hasta la fecha, en general se encontró que las inundaciones son más frecuentes y poseen mayor magnitud, además, ninguna de las cuencas estudiadas tanto en España como en Francia presentaron estacionariedad en el régimen de caudales. Por su parte, Villarini et al. (2009) estudió la estacionariedad de los picos anuales de inundaciones en 50 estaciones de medición en ríos de Estados Unidos con al menos 100 años de registros durante el siglo XX. Se encontraron cambios significativos en los valores medios anuales para la mayoría de las estaciones. Westra y Sisson, (2011) también detectaron no estacionariedad en eventos extremos de precipitación en Australia. En Reino Unido, Prosdocimi et al. (2013) encontraron evidencias de cambio climático en series de precipitación, éstas presentaron tendencias crecientes tanto en el valor como en la frecuencia de eventos extremos.

Con referencia a cambios en la curva de duración de caudales, Brown et al. (2005) presentaron un resumen de casos de estudio en Australia y Nueva Zelanda de los efectos provocados por cambios en las coberturas y los usos del suelo en el comportamiento de los caudales, se tuvieron en cuenta cuencas con registros suficientemente largos de caudales además de información correspondiente a datos históricos de variables referentes a deforestación, reforestación, urbanización, entre otras. Los resultados señalan que, de forma generalizada se ha subestimado el potencial que tienen las variables asociadas a la cobertura de una cuenca para regular la respuesta hidrológica y controlar el régimen de caudales o la forma de la CDC.

En Colombia se han estudiado los cambios a largo plazo de la variable precipitación. Cantor y Ochoa (2011) evaluaron tendencias en series de precipitación a escala mensual, días de lluvia mensuales y series mensuales de lluvia promedio diaria en 45 estaciones hidroclimatológicas ubicadas en el departamento de Antioquia al nordeste del país. Las tendencias de estas series fueron estimadas a partir de diferentes pruebas: (T de Sen, Mann-Kendall, Rho de Spearman) para posteriormente realizar la prueba de homogeneidad en la tendencia de Van Belle y Huges. Se observaron tendencias crecientes en la mayoría de estaciones para las cuales se realizó el análisis. Por otra parte, Urán (2016) realizó un estudio de la lluvia en Colombia a diferentes escalas temporales utilizando datos de la misión satelital TRMM (*Tropical Rainfall Measure Mission*) y series de lluvia provenientes de estaciones

meteorológicas en tierra. Los análisis arrojaron que para análisis con resoluciones temporales mayores a doce horas de la variable precipitación, las tendencias no son significativas, mientras que sí lo son para escalas temporales menores.

Estupiñán (2016) profundizó en el estudio de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en Colombia mediante el cálculo de modos de oscilación por medio de un análisis espectral singular y la transformada de Hilbert. El estudio se llevó a cabo para regiones hidrológicas obtenidas a partir del algoritmo de k-means agrupando según los valores medios de la precipitación, los datos de lluvia utilizados fueron de estaciones de medición en tierra del IDEAM y las misiones TRMM y GPCC. El análisis de tendencias mostró que la precipitación anual decrece en el 15% de las estaciones analizadas, aumenta en otro 15% y en el 70% restante, no se presentaron tendencias significativas.

En el presente artículo, se presentan los resultados de las tendencias a largo plazo de la curva de duración de caudales en algunos ríos de Colombia, se busca la espacialización de los valores de pendiente de la recta de ajuste de las series de caudales diarios, así como la caracterización de las estaciones que presentan mayores variaciones o algún patrón en particular. Además, se estudian tendencias en la varianza mediante el análisis de cambios a largo plazo en la desviación estándar.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se cuenta con datos de caudales a escala diaria, de los cuales puede seleccionarse un conjunto de estaciones que cuenten con registros distribuidos temporalmente de tal manera que se abarque un período suficiente de caracterización climática. El período puede definirse de 30 años según la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1995). Se cuenta con 655 estaciones de registros de caudales diarios, información extraída de la base de datos de la red nacional de medición del IDEAM (2014), estos datos se encuentran libres para su descarga gratuita en la plataforma virtual SIRH (sirh.ideam.gov.co).

Entre todas las estaciones se cuenta con registros desde el año 1940 hasta el año 2015. De las series mencionadas, se seleccionan únicamente aquellas con más de treinta años netos de registros, es decir, que cuenten con por lo menos 10950 mediciones. También se excluyen series temporales de caudal que presenten visiblemente inconsistencias en sus registros, para detectar esto, se estimaron las tendencias y se graficaron las que presentaban valores sospechosamente altos, luego mediante una exploración gráfica y criterio visual se determinó si la calidad de la información es suficiente para la realización del análisis.

La prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Mann, 1945) se utiliza como verificación de la existencia de tendencias a largo plazo en cada una de las series seleccionadas para el estudio, esta prueba se lleva a cabo para la realización de este trabajo pues admite series con períodos temporales sin información y porque no necesita que los datos tengan alguna distribución en particular (Gilbert, 1987). Para su realización, los datos se deben encontrar en el orden en el cual fueron tomados. Se puede proceder al cálculo del estadístico, el cual indica el signo global de la serie, según la ecuación (1):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

donde sgn es el signo de la operación y toma valores de +1 y -1 para signos positivo y negativo respectivamente y x_k todo registro inmediatamente anterior a x_j . Se tiene que si el valor de S es considerable y positivo, se sospecha que la serie es creciente en el tiempo, y de manera análoga, indica que la serie es significativamente decreciente a largo plazo si se tienen grandes magnitudes de S con signo negativo. El estadístico Z por su parte, relaciona el valor de S con la longitud de la serie o el número de registros. La varianza dada según la ecuación (2), sirve como insumo para el cálculo de Z tal y como se muestra en las ecuaciones (3) y (4).

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left(n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(i-1)(2i+5) \right) \quad (2)$$

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad \text{para } S > 0 \quad (3)$$

$$Z = \frac{S + 1}{\sqrt{Var(S)}} \quad \text{para } S < 0 \quad (4)$$

Debido a que la existencia de autocorrelación en algunas series incrementa la posibilidad de detectar tendencias con la prueba de Mann Kendall sin que estas necesariamente se presenten, se propone otra metodología para el cálculo de la varianza que se conoce como prueba de Mann Kendall modificada (Hamed y Ramachandra, 1998). Con esta, se busca eliminar los efectos de una posible autocorrelación presente en series temporales, el cálculo de la varianza en este caso, similar al mostrado en la ecuación (2), pero con un término adicional, tal y como se muestra en las ecuaciones (5) y (6).

$$V^*(S) = Var(S) \frac{n}{n^*} \quad (5)$$

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2) \rho_s(i) \quad (6)$$

Donde $\rho_s(i)$ es la función de autocorrelación de los rangos en las series temporales. Para evaluar si el resultado es estadísticamente significativo, se calcula la probabilidad con una función de distribución normal, el valor de H indica si la hipótesis nula de la prueba es rechazada (hay posibilidad de que exista tendencia, $H=1$) si el valor absoluto de Z es mayor a $Z_{1-\alpha/2}$, mientras que no puede rechazarse ($H=0$) en caso contrario. α corresponde a una confiabilidad de, en este caso 95% ($\alpha=0.05$). Con el fin de calcular la magnitud de las diferentes tendencias, se propone un ajuste lineal a toda la serie de datos según las ecuaciones (7) y (8):

$$y = mx + b \quad (7)$$

$$m = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2} \quad (8)$$

donde la variable independiente x es el número de días de la serie temporal y la variable dependiente es el valor del caudal correspondiente en m^3/s . Se pretende obtener el valor del coeficiente m en cada serie seleccionada para evaluar la tendencia y comparar. El estimador de pendiente de Sen (Sen, 1968) se utiliza en series donde se asume que existe tendencia lineal y se tengan discontinuidades. La estimación de dicha pendiente está dada según la ecuación (9).

$$P_i = \frac{x_i - x_k}{j - k} ; \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

donde x_j y x_k son los datos en los tiempos j y k respectivamente ($j > k$). Para una serie con número de registros igual a n , se tendrán tantas pendientes P_i estimadas como: $N = n(n-1)/2$, el valor del estimador de pendiente de Sen en cada serie es igual a la mediana de los N valores. Finalmente, para complementar el análisis no estacionario de las series seleccionadas, se estiman tendencias lineales en la varianza mediante el cálculo de la desviación estándar en una ventana móvil de 10 años con paso anual. La desviación estándar está dada según la ecuación (10):

$$Std = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (10)$$

donde Std es la desviación estándar en m^3/s , \bar{x} y N el promedio y el número de datos de cada ventana móvil respectivamente. Mediante diagramas de cajas y bigotes se analiza la dispersión de los valores de la pendiente de ajuste lineal para cada región de Colombia (Caribe, Magdalena, Orinoquía, Amazonía y Pacífico). Para el caso más significativo de cada una de estas regiones, se realiza un análisis en detalle evaluando la CDC construida mediante datos correspondientes a diferentes períodos, la tendencia de los caudales correspondientes a 95, 75, 25 y 1% de excedencia calculados anualmente y la tendencia en la varianza mediante ventanas móviles de 10 años.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se aplica la prueba no paramétrica de Mann-Kendall a cada una de las series temporales de caudal diario que cumplen con el mínimo de 30 años netos de registro (Figura 1 - izquierda) y se destaca el estadístico H el cual toma valor de 0 cuando no se puede rechazar la hipótesis nula o de 1 cuando la rechaza. Se ubican espacialmente las estaciones de medición con sus correspondientes valores del estadístico H (Figura 1 - derecha) en adelante, el análisis no estacionario se presenta únicamente para las series en las que éste es igual a 1, descartando las series en las cuales no se puede rechazar la hipótesis nula con la confiabilidad del 95% ($\alpha=0.05$), 222 series temporales cumplen con ambas condiciones.

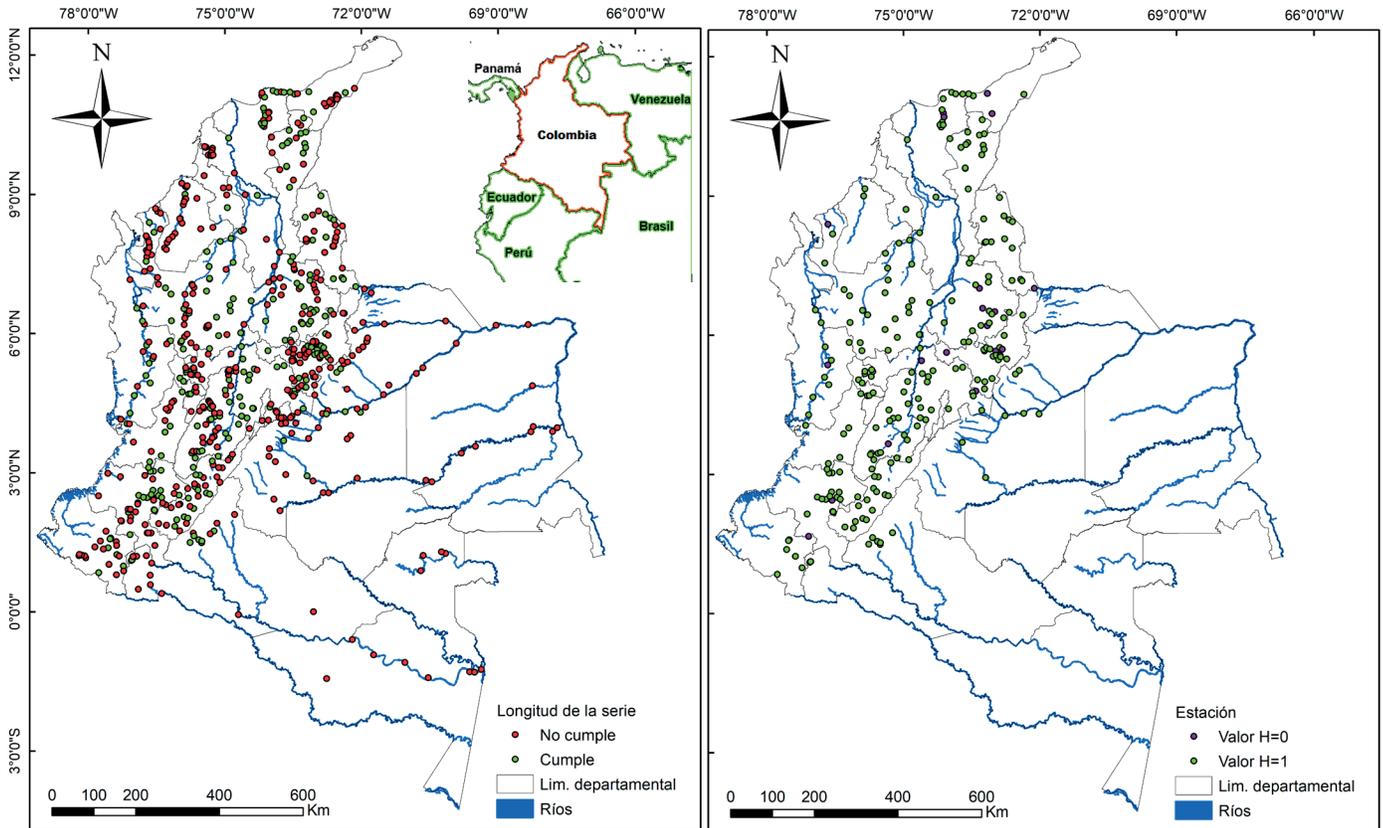


Figura 1 | Localización general de Colombia, estaciones de medición disponibles y prueba H de Mann Kendall (izquierda) y estaciones disponibles para análisis no estacionario después de selección (derecha).

En la Figura 2 se muestra el esquema correspondiente a los valores de las tendencias en cada una de las estaciones donde éstos fueron calculados, se observa que en general, los caudales tienden a incrementar sus valores en un horizonte de largo plazo en casi todo el territorio nacional, las tendencias son predominantemente crecientes. Las regiones del Chocó (occidente) y del Bajo Cauca (nordeste) presentan de forma clara un predominio de series temporales con pendiente positiva, mientras que en ninguna región en el país se observa una mayoría de series temporales decrecientes.

Los valores obtenidos del estimador de pendiente de Sen presentan una estrecha relación ($R^2=0.87$) con respecto a la pendiente de la recta de ajuste, la cual es obtenida mediante la relación de caudales y tiempo y una regresión lineal por el método de mínimos cuadrados. En la Figura 3 se muestra la dispersión de estas dos variables tomando los resultados de las 655 estaciones. En contraste, la Figura 4 muestra la dispersión entre la pendiente de la recta de ajuste, y el caudal medio de la respectiva serie hidrológica con las 233 estaciones posteriormente seleccionadas, obteniéndose un valor de R^2 de 65% ($R=0.8$).

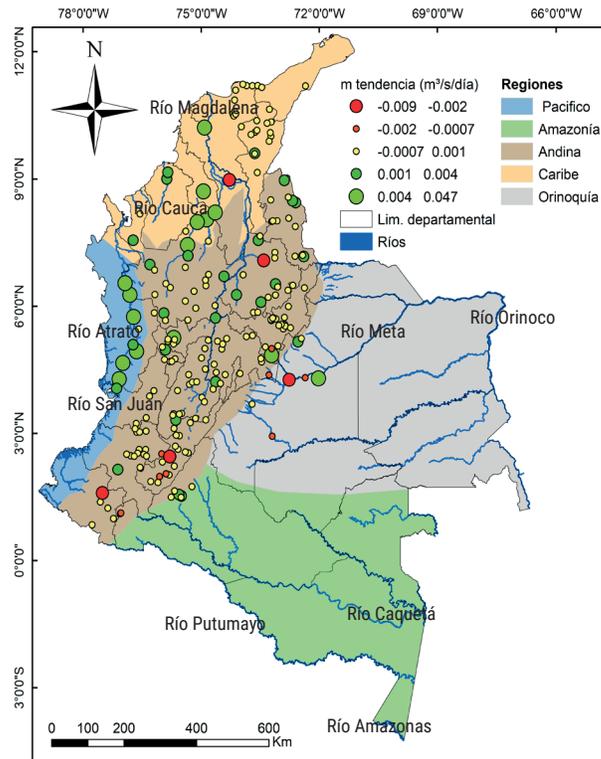


Figura 2 | Rangos de valores de pendiente de la recta de ajuste en estaciones analizadas.

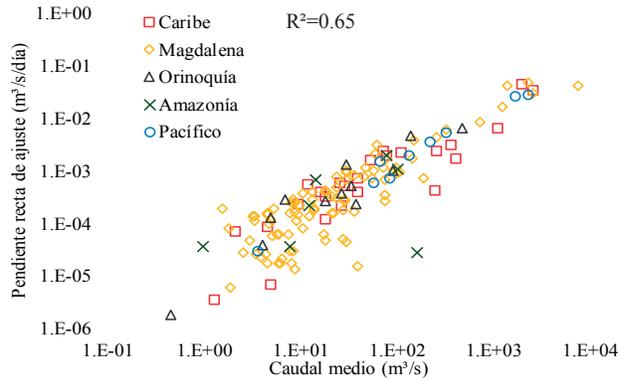
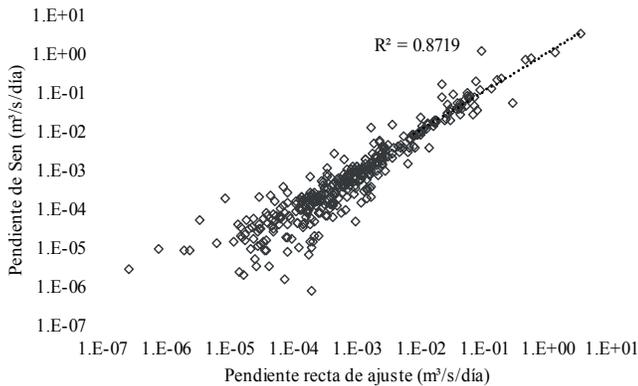


Figura 3 | Dispersión Pendiente de Sen vs. pendiente de la recta de ajuste.

Figura 4 | Dispersión pendiente de la recta de ajuste vs caudal medio de la serie.

En general de los resultados que se muestran de la Figura 2 a la Figura 4, se observa una tendencia creciente en las regiones Pacífico, Andina y Caribe, determinada por la prueba de Mann-Kendall. Se observa una estrecha relación estadística entre el estimador de pendiente de Sen y la pendiente de la regresión lineal y así mismo con el caudal medio, mostrando consistencia hidrológica, es decir, a mayor área de la cuenca, mayor caudal y mayor tendencia positiva. Se presentan algunas tendencias decrecientes, especialmente en la zona andina, pero cuya magnitud con respecto a las tendencias positivas es solo del 20% aproximadamente. En la Figura 5 a la izquierda se presenta el valor de la pendiente de tendencia en cada región de Colombia, en contraste, se presenta al lado derecho de la misma figura el mismo diagrama pero con los valores de pendiente relativos, pendiente de tendencia sobre el caudal medio de la respectiva serie en 1/día.

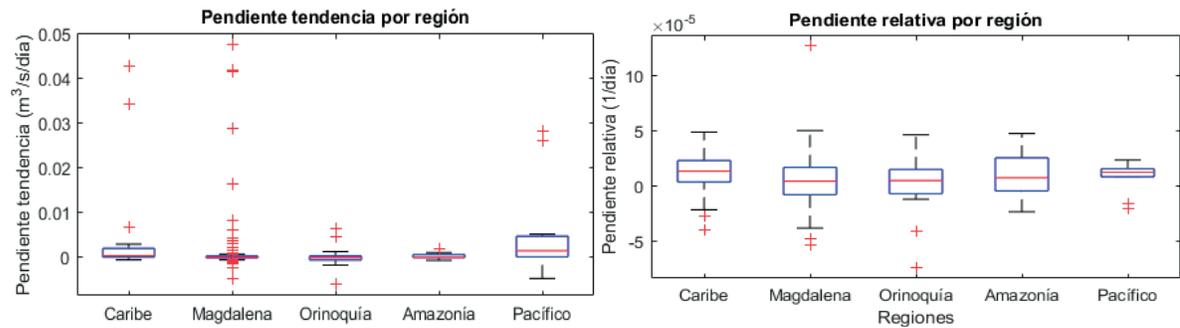


Figura 5 | Valores de pendiente de tendencia lineal versus pendiente de tendencia relativa en las distintas regiones de Colombia.

De la Figura 5 se observan valores inferiores de la pendiente en la región Andina (Magdalena), entendiéndose que el mayor número de estaciones están en esta región para la caja que representa un intervalo de confianza de 95%, pero en contraposición muestra el mayor número de valores extremos de pendiente. En el gráfico de pendiente relativa los valores extremos quedan dentro de las cajas, producto de eliminar el efecto de la escala estandarizando con el caudal medio, sin embargo, los bigotes correspondientes a esta región son los más amplios lo cual denota que la dispersión persiste.

El régimen macro climático en Colombia se ve altamente influenciado por la oscilación ENSO (*El Niño South Oscillation* por sus siglas en inglés) la cual periódicamente desencadena Fenómeno del Niño que corresponde a temporadas secas y Fenómeno de La Niña correspondiente a temporadas húmedas o lluviosas (Poveda et al., 2001). Esta oscilación comprende periodos de tiempo entre 3 y 7 años, se espera que con la longitud de las series seleccionadas (mínimo 30 años) se abarquen suficientes ciclos del ENSO. Este fenómeno incide principalmente en las regiones Andina y Pacífico y en menor medida en la región Caribe, respecto a la Orinoquia, la presencia de la disminución de caudales debido a la fase cálida puede tener un rezago de 3 meses (Poveda et al., 2011)

De cada sub región de Colombia se selecciona una serie con el mayor valor de tendencia sea creciente o decreciente y se toman diferentes períodos de la CDC de cada una. En la zona Andina se analizan los dos ríos correspondientes a la macro cuenca Magdalena y Cauca. Para tratar de observar posibles evoluciones en el tiempo, se divide el período de registro en tres intervalos de igual número de años, y se ilustra la CDC de cada uno para contrastar resultados. En la Figura 6 se presentan los resultados del análisis no estacionario en detalle para el Río Atrato ubicado en la región Caribe, en la zona norte del país, en la Figura 7 para el río Cauca en la región Andina localizada en el centro, en la Figura 8 para el río Meta en la región de la Orinoquía, al este, en la Figura 9 para el río San Pedro en la Amazonía al sur del país y en la Figura 10 se presentan los resultados del análisis no estacionario para el río San Juan ubicado en la región del Pacífico, occidente de Colombia. Las CDC se muestran también con el eje de las abscisas en escala logarítmica base 10 para que se puedan distinguir visualmente las diferencias entre los caudales máximos ($Q_{0.01}$, $Q_{0.03}$, $Q_{0.1}$, $Q_{0.3}$ y Q_1).

En las CDC mostradas a la izquierda con el eje graduado en escala lineal se pueden apreciar las diferencias en todo el régimen de descargas. En las CDC mostradas a la derecha se muestra el cambio entre diferentes períodos de análisis con el eje horizontal en escala logarítmica, lo cual permite apreciar mejor los cambios en los caudales máximos. La pendiente de la recta de ajuste se muestra en las series temporales con la letra m y se complementa con la pendiente de tendencia de los caudales medios anuales m anual en $m^3/s/año$, a su vez, los años con registro de fenómeno del Niño se resaltan en rojo y los años influenciados por el fenómeno de La Niña se muestran en azul oscuro. Se muestra además la evolución anual y la tendencia de ajuste lineal, de los caudales característicos correspondientes a los porcentajes de excedencia 95, 75, 25 y 1 en cada una de los ríos seleccionados. Se muestra la pendiente del ajuste de la desviación estándar vs el año en cada serie, el registro es anual y la ventana móvil es de 10 años.

Los caudales del río Atrato en los diferentes percentiles analizados presentan tendencias positivas, y se evidencia no estacionariedad en la CDC en el período de 1976 a 2000 en los caudales máximos y medios y en el período de 1988 a 2013 en los caudales mínimos. Se tiene una tendencia similar en los caudales máximos. Y en general se observan tendencias crecientes en todos los percentiles característicos y una disminución de la varianza que puede explicar la tendencia positiva, en el período 1976 a 1985 ésta aumenta como consecuencia del incremento en los caudales máximos, posteriormente, en el período 1985 a 2013 la varianza disminuye, reflejo del incremento en los caudales mínimos. El período seco del ENSO o fenómeno de El Niño, influencia los caudales del río Atrato con el evento de 1997. Por su parte, la fase húmeda del ENSO o fenómeno de La Niña influencia los caudales del río Atrato en los eventos de 1988 y 2010.

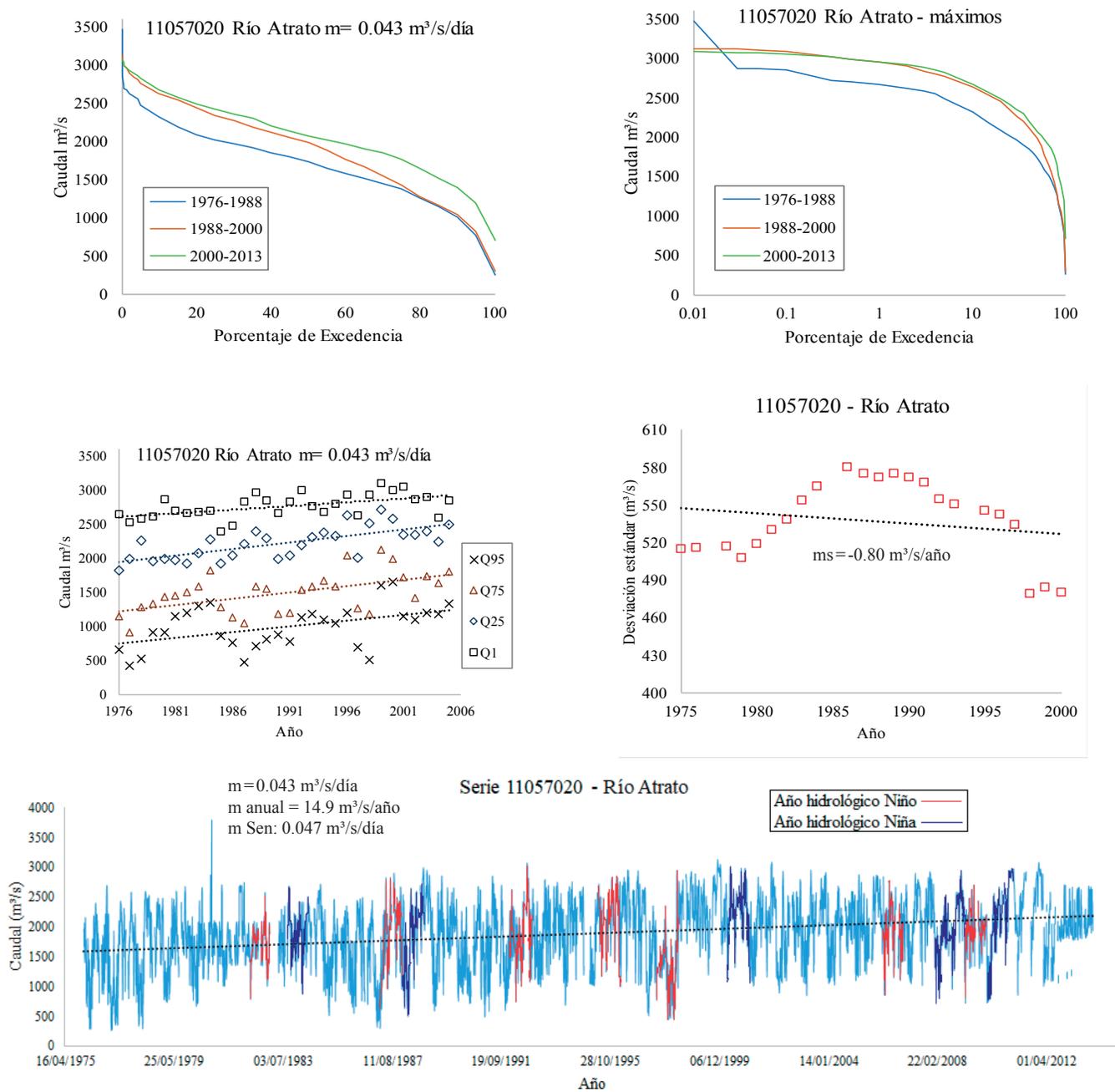


Figura 6 | Evolución temporal de la CDC y la varianza en el río Atrato y serie temporal Río Atrato entre 1976 y 2013, ajuste lineal $m=0.043 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$.

Para el caso del río Cauca, se observa que sus caudales son crecientes en todos los percentiles analizados, en el último período (2000-2013) el régimen de crecientes incrementó respecto a los anteriores. En el período 1974 a 2000 se observa no estacionariedad mientras que en el periodo 2000 a 2013 la condición es prácticamente estacionaria exceptuando los caudales máximos, lo que se evidencia en el incremento de la variabilidad en el tiempo, por lo cual, desviación estándar incrementa con los años, aunque no de forma lineal. El río Magdalena por su parte, a pesar de presentar tendencia global positiva, los caudales pico tienden a disminuir, por lo cual la varianza también presenta tendencia negativa. El fenómeno de El Niño, influencia los caudales de ambos ríos en los años 1982 y 2009, mientras que el fenómeno La Niña en los años 1973, 1984, 1988, 2000 y 2010. Cabe aclarar, que el río Cauca es tributario del río Magdalena.

Las cuencas hidrográficas de los ríos Atrato, Meta, Putumayo y San Juan no albergan grandes embalses ni descargas de poblaciones importantes que regulen los caudales y que por lo tanto afectan las respectivas CDC. Los dos ríos principales de Colombia son el Magdalena y el Cauca. Ambos ríos atraviesan la zona andina del país en la cual se asienta la mayor parte de la población. En estas cuencas se tienen proyectos hidroeléctricos que están localizados en la parte alta (Cauca) y media (Magdalena) de las respectivas cuencas. Los demás proyectos están en afluentes que no drenan directamente a estos ríos. Además, teniendo en cuenta que las estaciones de caudales usadas se encuentran en las zonas bajas de ambos ríos con el aporte natural de los caudales según el incremento de las áreas y que el efecto de las bocatomas y descargas por el área de aforo es despreciable, se considera que la variación de las CDC aporta elementos para un análisis no estacionario en condiciones naturales. Los registros de caudales usados en muchos casos no incluyen períodos recientes, por lo tanto, los embalses más nuevos no influyen las series diarias.

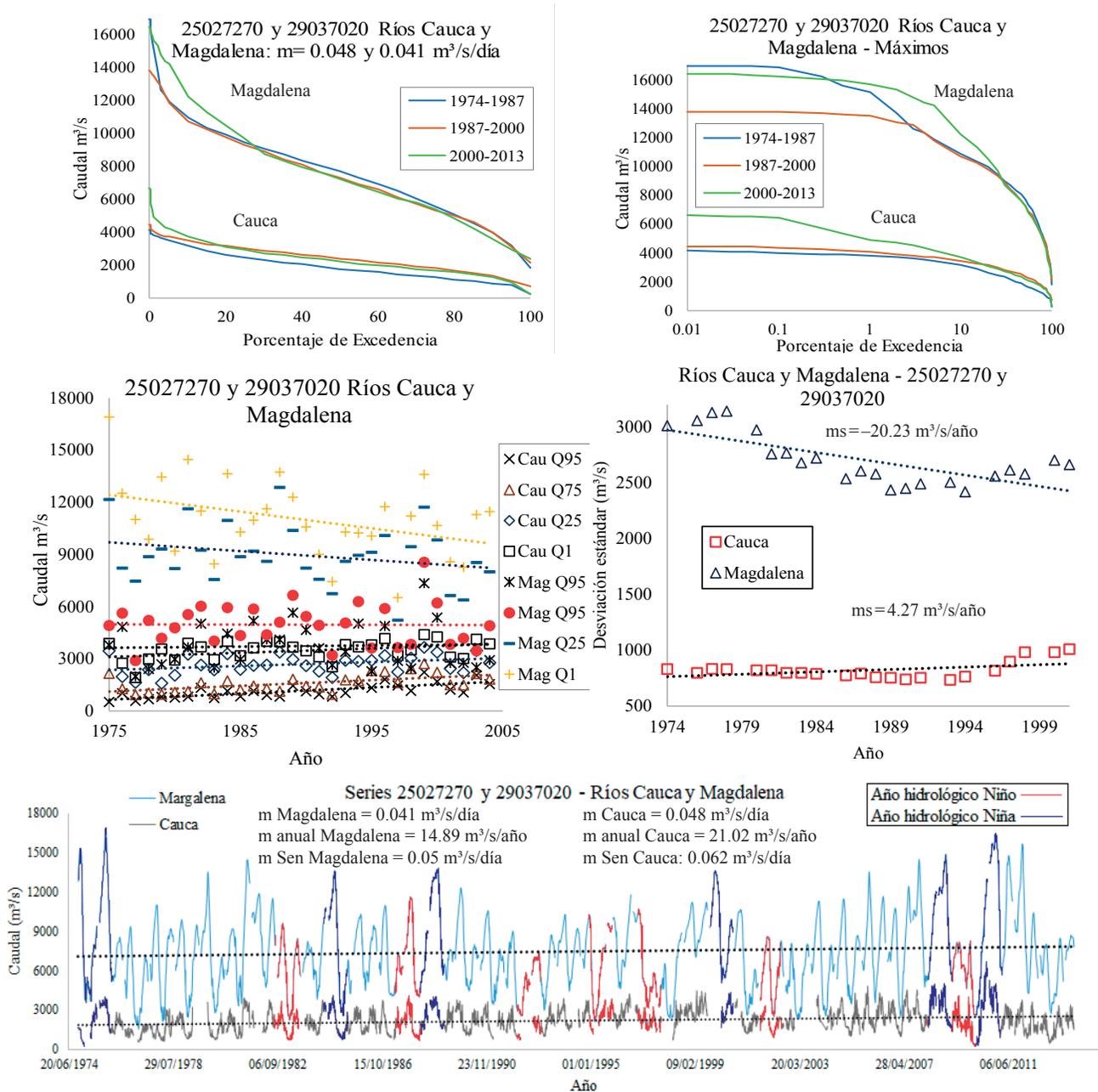


Figura 7 | Evolución temporal de la CDC y la varianza en los ríos Cauca y Magdalena, serie temporal ríos Cauca y Magdalena entre 1974 y 2013, ajuste lineal $m=0.0475$ y 0.041 $m^3/s/día$.

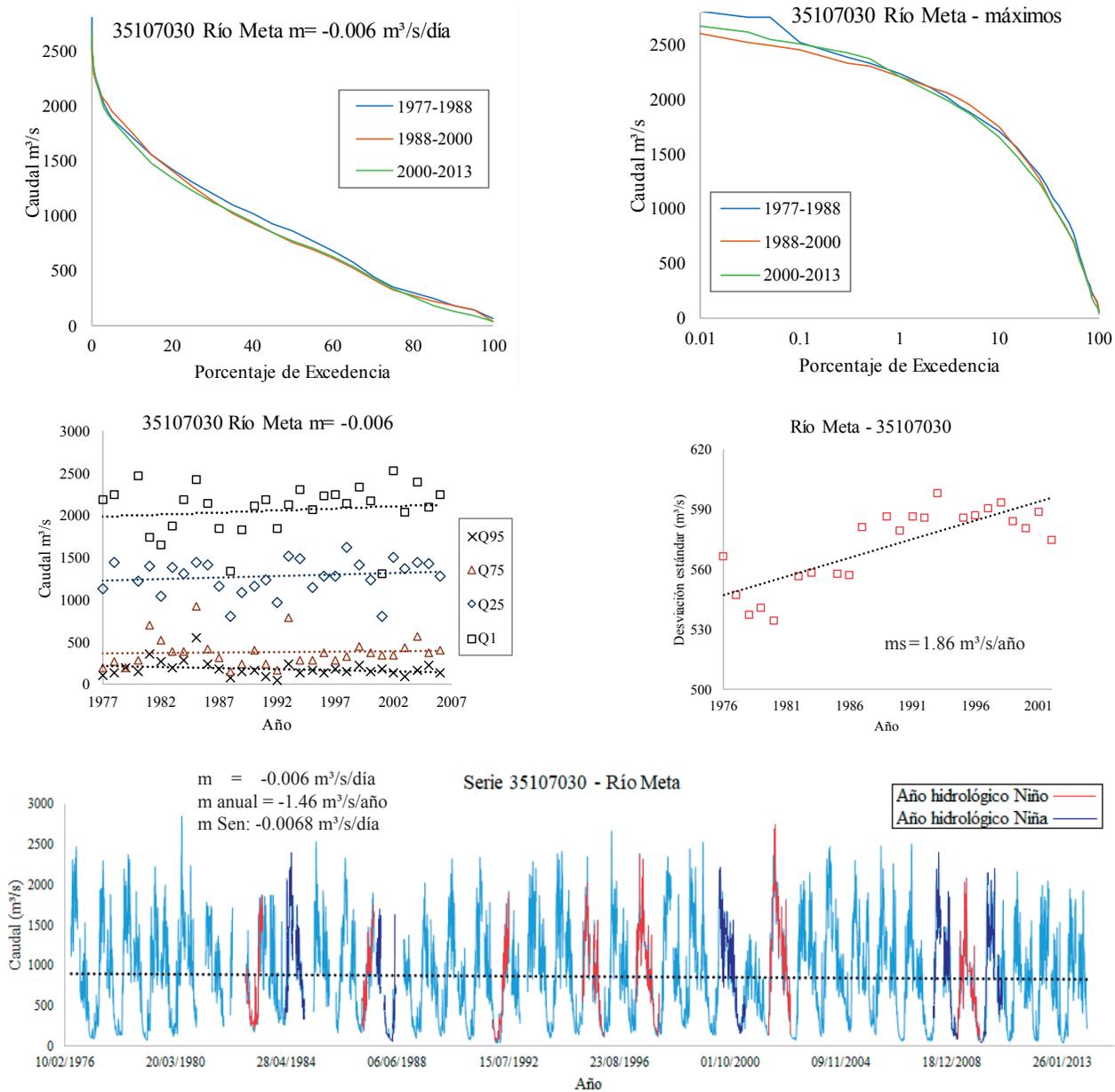


Figura 8 | Evolución temporal de la CDC y la varianza en el río Meta y serie temporal río Meta entre 1977 y 2013, ajuste lineal $m=0.006 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$.

Se puede considerar que la serie de caudales es estacionaria durante el período 1987-2013. Se observan bajas tendencias en los diferentes percentiles de las curvas de duración y aunque la varianza es creciente, se puede entender como consecuencia de la disminución de las descargas bajas, comportamiento más notorio en esta región de Colombia, la cual es la única con un ciclo anual unimodal. El período seco del ENSO influye los caudales del río Meta con los eventos de 1992, 2002 y 2008, la fase húmeda del ENSO no parece tener incidencia sobre esta serie.

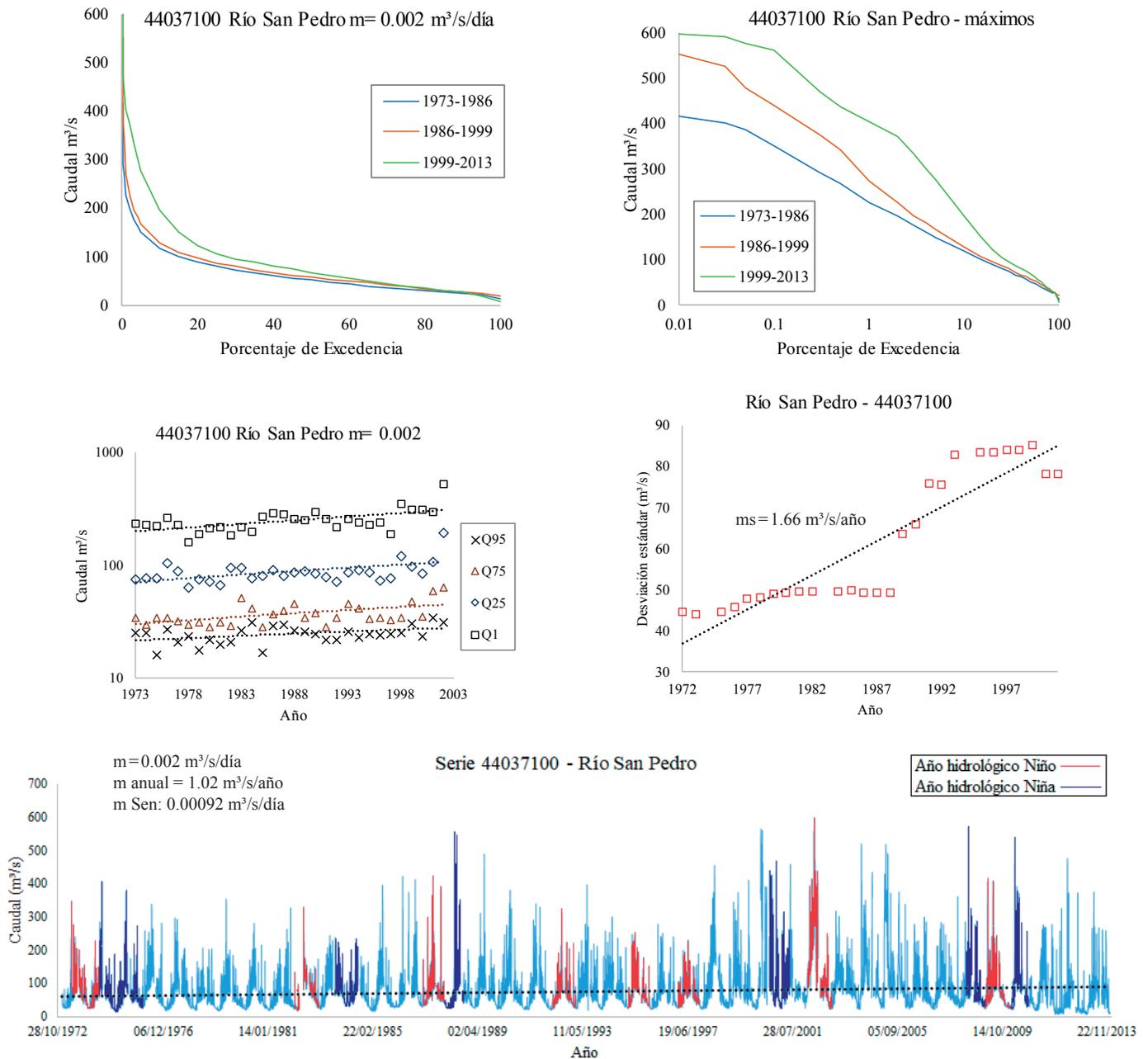


Figura 9 | Evolución temporal de la CDC y la varianza en el río San Pedro y serie temporal río San Pedro entre 1973 y 2013, ajuste lineal $m=0.002 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$.

El río San Pedro presenta tendencias positivas en todos los percentiles analizados (95, 75, 25 y 1). Esta cuenca no ha sido muy antropizada, por lo que los cambios pueden atribuirse únicamente a variabilidad climática. Se observa la no estacionariedad en el período 2000-2013, la cual se evidencia en la gráfica de CDC de caudales máximos y de percentiles. Además, en la gráfica de la desviación estándar se observa una tendencia positiva muy importante respecto de las demás estaciones analizadas en detalle, esto se refleja en el aumento de la variabilidad de los caudales durante el período 1986-2013. El período seco del ENSO influye los caudales del río San Pedro con en los eventos de 1995, 1997 y 2009. Por su parte, la fase húmeda del ENSO o fenómeno de La Niña influye los caudales del río San Pedro con los eventos de los años 1988 y 2010.

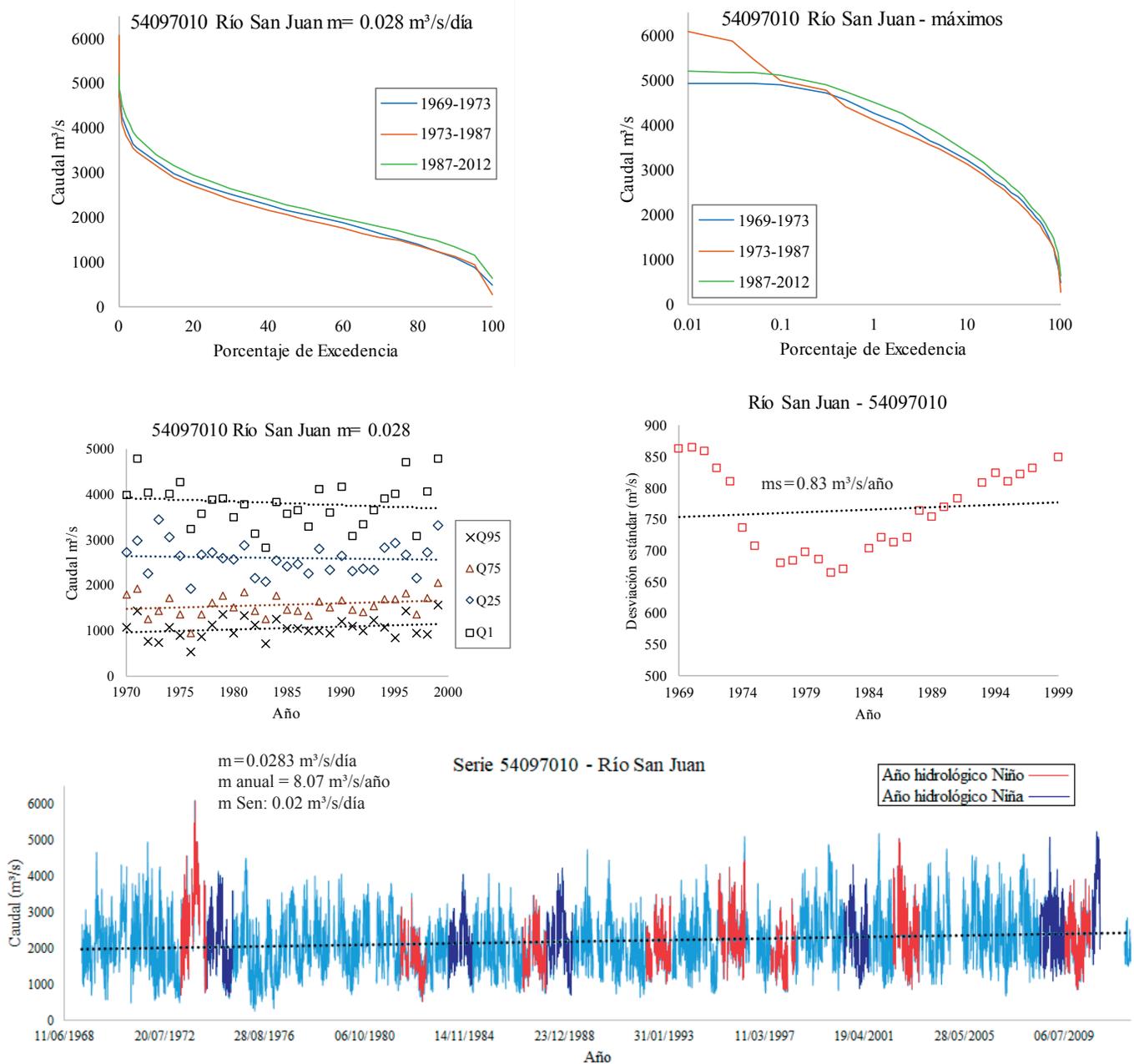


Figura 10 | Evolución temporal de la CDC y la varianza en el río San Juan y serie temporal río San Juan entre 1973 y 2012, ajuste lineal $m = 0.0283 \text{ m}^3/\text{s}/\text{día}$.

Se observa una leve tendencia en la CDC en el período 1987-2012. En cuanto al comportamiento de los diferentes percentiles, los caudales bajos presentan tendencia creciente y los caudales altos tendencia decreciente lo cual se refleja en el comportamiento de los caudales máximos y de la varianza hasta el año 1979 con disminución de ésta y después un aumento hasta 2013. Esta cuenca, al igual que la del río San Pedro no es antropizada, por lo tanto, también se le pueden atribuir los cambios al comportamiento climático de largo plazo. En la CDC se observa una leve tendencia en el período 1987-2012, la cual está caracterizada más por la tendencia positiva de los caudales bajos como lo muestra la gráfica de los percentiles y la de la desviación estándar. El fenómeno de El Niño influencia los caudales del río San Juan en los eventos de 1982, 1987, 1992, 1997 y 2009, mientras que La Niña influencia sus caudales con el evento ocurrido en 2010.

La Tabla 1 muestra el resumen de los resultados del análisis no estacionario (valores de m, m Sen y ms) de 10 estaciones seleccionadas. Dos en cada región, la que presente mayor tendencia positiva y mayor tendencia negativa. Los valores asociados a las pruebas de significancia P tanto para la prueba estadística de tendencia de Mann Kendall (val. P media) como para la prueba de tendencia en la varianza F (val. P var), en todos los casos los valores de P son inferiores a 5%, por lo que se acepta la significancia de ambas pruebas.

Tabla 1 | Resumen de resultados del análisis no estacionario.

Estación	Región	Río	Área (km ²)	Período Registro (años)	Pend. Tend. (m ³ /s/día)	Pend. Sen (m ³ /s/día)	Pend DesvEst. (m ³ /s/año)	Val. P media	Val. P var
16037040	Caribe	Tibú	316	1973-2012	-0.0005	-0.00013	0.27	2.2 10 ⁻⁶	3.6 10 ⁻⁷
11057020	Caribe	Atrato	10566	1976-2013	0.0429	0.047	-0.80	0.00	9.4 10 ⁻¹⁵
24067030	Mag. Cauca	Sogamoso	21216	1960-2009	-0.0047	-0.0022	-3.83	7.9 10 ⁻⁵	0.00
25027270	Mag. Cauca	Cauca	41691	1974-2013	0.0475	0.062	4.27	0.00	1.5 10 ⁻¹²
29037020	Mag. Cauca	Magdalena	236962	1974-2013	0.041	0.058	-20.23	0.00	0.00
35107030	Orinoquía	Meta	14401	1976-2013	-0.0058	-0.0068	1.86	9.1 10 ⁻⁷	0.047
35127010	Orinoquía	Manacacias	9781	1978-2013	0.0064	0.0039	1.82	8.4 10 ⁻⁹	2.5 10 ⁻⁶
47017070	Amazonía	Putumayo	474	1971-2013	-0.0006	-0.0005	0.16	0.00	2.9 10 ⁻⁵
44037100	Amazonía	San Pedro	636	1973-2013	0.0019	0.0009	1.66	0.00	0.00
52017010	Pacífico	Patía	8790	1966-2004	-0.0046	-0.0044	0.42	0.00	2.5 10 ⁻¹⁴
54097010	Pacífico	San Juan	12190	1969-2012	0.0283	0.032	0.83	0.00	0.0012

Los diagramas presentados en la Figura 5 muestran que muchos de los valores extremos de pendiente están relacionados con el valor del caudal medio, puesto que al observar los realizados con pendiente relativa en 1/día, muchos valores extremos desaparecen. Un ejemplo de lo anterior es lo que ocurre con la región Magdalena Cauca, las pendientes de recta de ajuste presentan *outlayers* asociados a la magnitud del caudal medio, en otras regiones, no se observa este comportamiento con tanta claridad. La máxima tendencia creciente la presentaron los ríos Atrato y Cauca ambos con más de 4% m³/s/día, esto quiere decir que sus caudales, en promedio, pasarían de 1893 y 2200 m³/s a 2050 y 2375 m³/s respectivamente en 10 años y a 2678 y 3058 m³/s respectivamente en 50 años para condiciones medias de mantenerse la tendencia. Por otra parte, el río Meta con 14400 km² de área de drenaje, presenta una pendiente de recta de ajuste de -0.0058 m³/s/día y un caudal medio de 861 m³/s, se proyecta un caudal medio de 839.8 m³/s en un plazo de 10 años y un caudal medio de 755.2 m³/s en un plazo de 50 años de continuar la tendencia. Siendo la anterior la mayor tendencia decreciente, puede notarse que el cambio no es tan marcado en comparación con los ríos que presentan tendencias crecientes, aparentemente más significativas (un orden de magnitud más).

Analizando tendencias anuales de las diferentes magnitudes de caudales, en los casos de los ríos Cauca y Atrato, las tendencias son crecientes para todos los percentiles característicos analizados, es decir, desde los caudales mínimos hasta los caudales máximos, todos presentan un comportamiento creciente. El río Meta presenta una pendiente negativa de forma general, sin embargo, los valores de máximos y medios -máximos presentan tendencias crecientes. La tendencia creciente generalizada que presentan los caudales del río San Pedro en el Caquetá, se dan principalmente por un incremento gradual en el valor de los caudales máximos, mientras que el río San Juan, entre los departamentos de Cauca y Chocó, a pesar de las tendencias decrecientes en los valores máximos, la pendiente de la regresión lineal de la serie, debido al comportamiento de los caudales medios, es positiva. La pendiente de Sen y la pendiente de la recta de ajuste presentan una relación importante R² de 0.87. Ambos valores provienen de diferentes metodologías de cálculo, la pendiente de Sen está dada por la mediana de las pendientes dato a dato de la serie, mientras que la pendiente de ajuste se obtiene a partir de la recta obtenida por mínimos cuadrados, puede concluirse que cualquiera de los dos criterios es igual de válido para realizar estimación de tendencias lineales a largo plazo. Se tienen casos en los cuales, el valor de la desviación cambia muy poco en comparación con la magnitud del caudal medio, por ejemplo, los ríos Atrato (ms=-0.8 m³/s/año), Putumayo (ms=0.16 m³/s/año) y San Juan (ms=-0.8 m³/s/año). Se tienen casos también en los cuales los valores de la desviación oscilan a través del período de estudio, por ejemplo, los ríos Atrato, Cauca y San Juan. Estas oscilaciones, hacen que la forma de tendencia lineal no sea la más adecuada para su representación.

CONCLUSIONES

No fue posible realizar un análisis más detallado de cambios temporales de la CDC para las regiones Amazonía y Orinoquía en sitios aparte de las zonas de montaña, el estudio se redujo a las corrientes del pie de monte llanero y del pie de monte amazónico. Al interior tanto de la selva como de los llanos no se cuenta con series temporales seleccionadas puesto que las que se encuentran allí ubicadas (que corresponden a los ríos más grandes e importantes de las regiones) no cumplen con el mínimo de registros establecidos para el análisis, esto con excepción de algunas estaciones ubicadas en los departamentos de Meta y Caquetá, y la mayoría en el pie de monte llanero y el pie de monte amazónico respectivamente. Éstas son regiones importantes para la orografía y la hidrología colombiana y representan un porcentaje importante de territorio nacional, por lo que hubiera sido de gran importancia y utilidad realizar el análisis en estas zonas.

Al observar tendencias en la varianza, para las 10 series temporales seleccionadas, no se encontró una relación clara entre el valor de pendiente del ajuste a la desviación estándar y la pendiente del ajuste de los caudales. Por ejemplo, en el río Atrato, mientras el análisis de datos indica que los caudales en promedio incrementan en aproximadamente $15 \text{ m}^3/\text{s}$ en un año, la desviación estándar disminuye $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$ en ese mismo período, algo similar ocurre en los ríos Tibú, Meta y Patía. Los cambios en la varianza también se dan en su mayoría de forma creciente, con excepción de los ríos Atrato y Putumayo, cuya tendencia no es significativa (decrecen con una tasa menor a $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$) y el río Sogamoso, única corriente con una tendencia decreciente considerable ($-3.83 \text{ m}^3/\text{s}/\text{año}$). Las tendencias en la varianza afectan los caudales máximos o mínimos generando así no estacionariedad. Los estudios han demostrado que la hidrología de Colombia está influenciada por el ENSO. La humedad del suelo es una variable muy importante que se refleja en la persistencia de los caudales y por lo tanto en la regulación hídrica. Particularmente después de un evento Niño y dependiendo de la severidad de éste, recuperar la humedad del suelo tiene un impacto en los caudales que reflejan cambios en la varianza. De otro lado, los cambios en los usos del suelo producen mayor variabilidad en los caudales máximos especialmente durante los eventos Niña.

De forma generalizada, los cambios en el régimen de caudales en Colombia se dan principalmente con tendencias positivas (caudales crecientes), según esto, los picos de inundaciones serían cada vez más frecuentes y las magnitudes de los caudales serían mayores, coherente con lo reportado en la literatura de análisis no estacionario de variables climáticas. Además de obtener tendencias crecientes en la mayoría de las estaciones, en las corrientes analizadas también se encontró que por lo general la desviación estándar tiende a incrementar, lo que indica que los ríos tienden a regular menos sus caudales, los valores tanto mínimos como máximos se encuentran cada vez más lejos del promedio. Hace falta un estudio a profundidad de cuáles son las razones por las cuales cambia a largo plazo el régimen de caudales de algunos ríos de Colombia, si bien se conoce que el cambio climático es un factor determinante, también las variables asociadas a coberturas y usos del suelo explican en parte el comportamiento de los caudales, por lo tanto, los cambios antrópicos a los cuales éstas son sometidas también deben ser tenidos en cuenta a la hora de estudiar las alteraciones temporales en una CDC. Se pueden plantear hipótesis respecto a las posibles causas de tendencias en algunos de los ríos analizados, por ejemplo, los ríos Meta y Sogamoso ambos de tendencia decreciente y sus cuencas hidrográficas se han visto alteradas por el cultivo extensivo de palma de aceite por otra parte los ríos Putumayo, Patía y Tibú, han sufrido deforestación y antropización en las inmediaciones de sus tributarios desde hace algunas décadas. Las tendencias crecientes pueden explicarse más por factores climáticos como un incremento en el régimen de precipitación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM porque cuyos registros fueron parte fundamental de este análisis.

REFERENCIAS

- Barriendos, M., Coeur, D., Lang, M., Llast, M.C., Naulet, R., Lemaître, D., Barrera, A. 2003. Stationarity analysis of historical flood series in France and Spain (14th–20th centuries). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 583-592. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-583-2003>
- Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1-4), 28-61. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2004.12.010>
- Cantor, D., Ochoa, A. 2011. Señales de cambio climático en series de lluvia en Antioquia. *IX Congreso Colombiano de Meteorología y Conferencia Internacional "200 Años de La Meteorología y de La Climatología En América Latina,"* 11. Bogotá - Colombia.
- Estupiñán, A. 2016. Estudio de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en Colombia. *Bdigital.Unal.Edu.Co*, 118.
- Foster, H.A. 1933. Duration Curves. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 59(8), 1223-1246.
- Gilbert, R.O. 1987. *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Wiley.
- Hamed, K.H., Ramachandra, A. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- IDEAM. 2014. *Estudio Nacional del Agua 2014*.
- IPCC. 2014. *Climate change 2014: synthesis report*.
- Mann, H. 1945. Nonparametric tests against trend. *Journal of the Econometric*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- Pérez, C., Poveda, G., Mesa, O., Carvajal, L.F. 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*, 27(3), 537-543.
- Poveda, G., Jaramillo, A., Gil, M.M., Quiceno, N., Mantilla, R.I. 2001. Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8), 2169-2178. <https://doi.org/10.1029/2000WR900395>
- Poveda, G., Álvarez, D.M., Rueda, Ó.A. 2011. Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: A review of climatic processes and their impact on one of the Earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36(11-12), 2233-2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>
- Prosdocimi, I., Kjeldsen, T.R., Svensson, C. 2013. Non-stationarity in annual and seasonal series of peak flow and precipitation in the UK. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1(5), 5499-5544. <https://doi.org/10.5194/nhessd-1-5499-2013>
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Urán, J.D. 2016. Cambios en los valores extremos de variables climáticas en Colombia asociados a cambio climático. *Repositorio Institucional - Universidad Nacional de Colombia*, 121.
- Villarini, G., Serinaldi, F., Smith, J.A., Krajewski, W.F. 2009. On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century. *Water Resources Research*, 45(8). <https://doi.org/10.1029/2008WR007645>
- Vogel, R.M., Fennessey, N.M. 1994. Flow-Duration Curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4), 485-504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1994\)120:4\(485\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(485))
- Westra, S., Sisson, S.A. 2011. Detection of non-stationarity in precipitation extremes using a max-stable process model. *Journal of Hydrology*, 406(1-2), 119-128. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.06.014>
- WMO. 1995. *INFOHYDROManal, Second edition, Operational Hydrology Report*. Geneva.