

# El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería\*

The Collapse of the Stationarity Hypothesis Due to Climate Change and Climate Variability: Implications for Hydrologic Engineering Design

Germán Poveda<sup>(1)\*</sup> y Diana Milena Álvarez<sup>(2)\*</sup>

<sup>(1)</sup> Ph.D. Profesor Titular, gpoveda@unal.edu.co.

<sup>(2)</sup> Ph.D.(c), dmalvare@unal.edu.co

<sup>(\*)</sup> Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

## Palabras claves

Hidrología, caudales máximos, caudales mínimos, estacionariedad, Funciones de Distribución de Probabilidad Mixtas.

## Resumen

Los métodos tradicionales que se usan en ingeniería hidrológica para la estimación de caudales extremos de distinto período de retorno, están basadas en la hipótesis de estacionariedad en la función de distribución de probabilidades de las series de caudales extremos. Esa hipótesis colapsa ante los efectos del cambio climático, la variabilidad climática, los cambios en el uso del suelo y la deforestación, en la dinámica hidrológica reflejada en los registros de las variables hidrológicas. En este trabajo mostramos las evidencias del colapso de la hipótesis de estacionariedad usando registros hidrológicos de Colombia, e implementamos varios métodos para estimar caudales extremos a través de Funciones de Distribución de Probabilidad Mixtas, que permiten considerar los efectos de la variabilidad climática en las series de caudales extremos. Al aplicar estos modelos en los registros de caudales extremos en ríos colombianos, se encuentra que, de manera general, la función de distribución Mixta Weibull Tipo I, presenta buenos estimativos en los caudales mínimos extremos, y la función Mixta Fréchet Tipo I es adecuada para estimar caudales máximos extremos.

## Key words

Hydrology, peak flows, floods, low flows, stationary, Mixed Probability Distribution Function Models.

## Abstract

Traditional methods used in hydrologic engineering to estimate extreme river discharges of different return periods are based on the assumption of stationarity in the probability distribution function of the series of extreme flows. This hypothesis collapses owing to the effects of climate change, climate variability, land use/land change, and deforestation on the hydrological dynamics, which are reflected into the series of hydrologic variables. We illustrate such effects on the hydrology of Colombia, and implement two models for estimating extreme river discharges using mixed probability distribution functions, which take into account the effects of climate variability on the series of extreme discharges. Application of these methods for Colombian rivers allowed us to conclude that the Mixed Type I Weibull distribution provides an adequate estimation for low flows, and the Fréchet Mixed Type I distribution for peak flows and floods.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos hidrológicos exhiben gran variabilidad en un rango muy amplio de escalas de espacio y tiempo. De

allí la necesidad de enfrentar las tareas de diseño hidrológico en ingeniería (civil, ambiental, agrícola, forestal, etc.) usando la teoría de procesos estocásticos (PE). Las propiedades de un PE se

determinan generalmente a partir de una simple realización de una serie de tiempo, usando las hipótesis de estacionariedad y ergodicidad. La hipótesis de estacionariedad implica que la función

\* Este artículo es el resultado de la ponencia de Germán Poveda, que se llevó a cabo en el foro "Hidrología de extremos y cambio climático", realizado en la Universidad de los Andes el día 28 de junio de 2012.

de distribución de probabilidades no cambia con el tiempo. El proceso es estrictamente estacionario si la distribución conjunta de las variables aleatorias  $X(t_1), \dots, X(t_n)$  es idéntica a la distribución conjunta de  $X(t_1+t), \dots, X(t_n+t)$  para cualquier  $t$ ; es decir que la distribución conjunta depende sólo de las diferencias  $t_i - t_j$  entre los tiempos de ocurrencia de los eventos.

La estimación tradicional de los caudales extremos (máximos y mínimos) de distinto período de retorno se basa en la hipótesis de estacionariedad en la serie de caudales extremos anuales. Esta hipótesis es inválida ante las evidencias de los impactos del cambio y la variabilidad climática, así como de la deforestación y de los cambios en los usos del suelo, sobre la dinámica

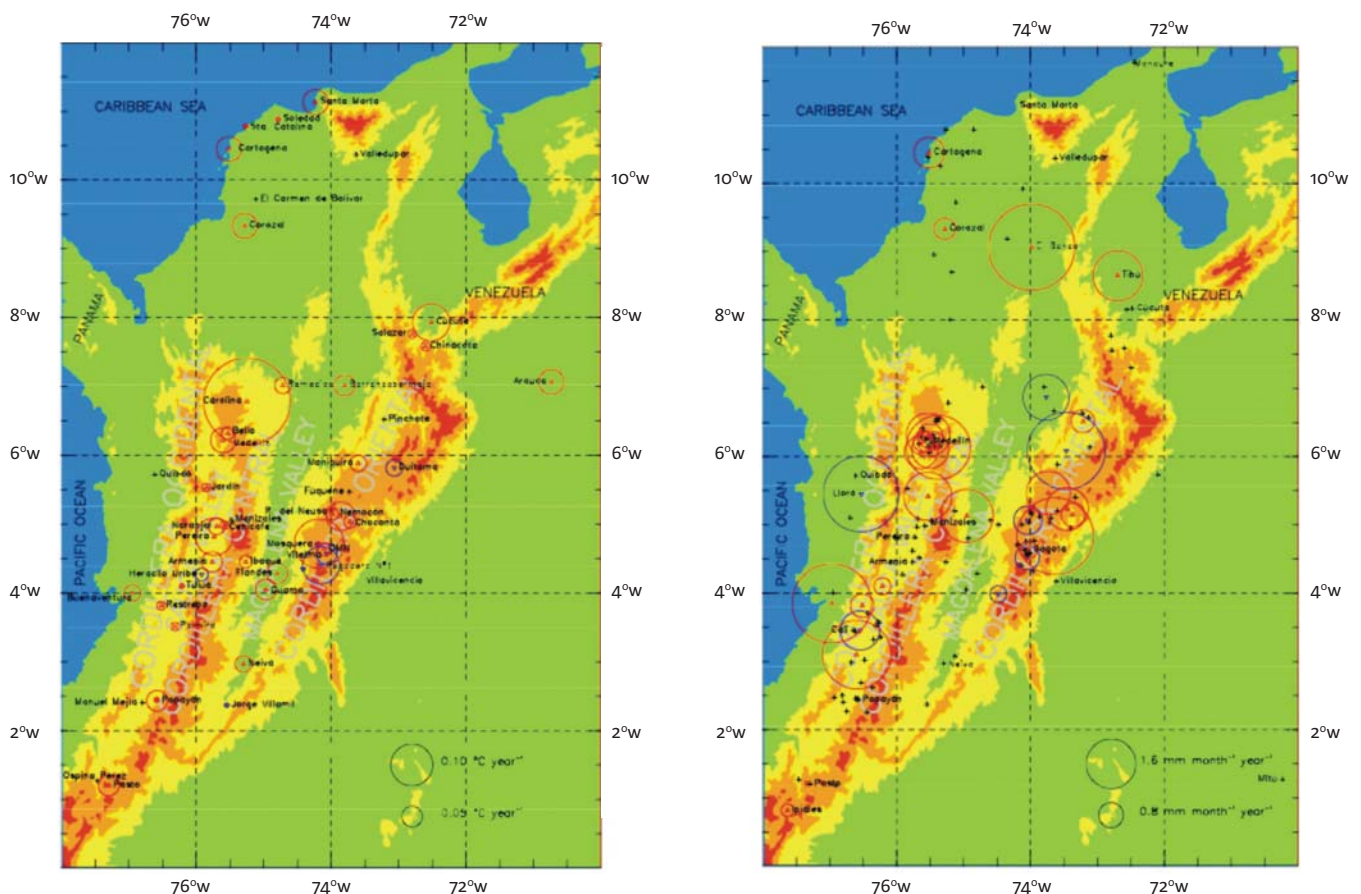
de los procesos hidrológicos en las cuencas hidrográficas.

#### CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS EN COLOMBIA

El calentamiento global es causado por la inyección de gases de efecto invernadero a la atmósfera, que resulta de la quema de combustibles fósiles como carbón, petróleo, gas, gasolina, diésel, etc., y por la deforestación, así como por la emisión de metano, óxido nítrico y otros gases a la atmósfera [10]. Esto está causando un cambio climático evidenciado en la alteración de los patrones de circulación oceánica y atmosférica de gran escala, y del ciclo hidrológico global, exacerbando los eventos hidrometeorológicos más intensos.

Los efectos del cambio climático en Colombia son evidentes. La Figura 1. tomada del trabajo [14] muestra las tendencias crecientes (rojo) y decrecientes (azul) en distintas estaciones de registros de temperaturas mínimas y precipitación en Colombia. El diámetro de los círculos es correlativo con la magnitud de la tendencia, expresada en grados C por año.

El aumento de las temperaturas está causando el deshielo y la desaparición paulatina pero constante de los glaciares tropicales de Colombia [5] y [20]. Esto puede tener consecuencias nefastas en cuanto a la disponibilidad de agua superficial en las partes más altas de las cuencas que se originan en esos glaciares, así como en la estabilidad e integridad ecosistémica de los páramos.



Fuente. Tomadas de [14], con base en los resultados del trabajo de los autores [13].

**Figura 1.** Distribución de tendencias crecientes (círculos rojos) y decrecientes (azules) en series de temperaturas mínimas promedio mensuales (izquierda) y de precipitación (derecha) en Colombia.



Germán Poveda. Foto: Laura Camacho Salgado

Las series de lluvias mensuales de Colombia exhiben tendencias mezcladas como se muestra en la Figura. 1, según los resultados del estudio de los autores [13]. Estudios más recientes corroboran esos resultados en el 2011 [3]. Otra circunstancia preocupante que hemos evidenciado en las series de lluvia y temperatura en Colombia es un corrimiento en las fases de las temporadas más lluviosas. Esto significa que está lloviendo la misma cantidad de agua, pero en muchas estaciones se ha ido corriendo la fase del ciclo anual (los meses de mayores lluvias). Esto tiene implicaciones importantes en suministro de agua, agricultura, generación de electricidad, navegación fluvial, salud humana, etc. Esta es otra dimensión del cambio climático que es preocupante.

A su vez, la mayoría de las series de caudales promedios mensuales de los ríos de Colombia exhiben tendencias decrecientes. Tal disminución en los caudales promedios mensuales es casi generalizado en todo el país, confirmada en estudios más recientes, en particular, en las cuencas de los Ríos Magdalena y Cauca [3].

Hay tendencias también en las series de caudales máximos anuales. Parecería paradójico pero el cambio climático y la variabilidad climática tienen estas implicaciones por la no linealidad de los fenómenos, por el tamaño de las cuencas, por la magnitud de la deforestación, y por el cambio de usos del suelo. La Figura. 2 muestra las tendencias en series de caudales máximos anuales

en Colombia. Estas son las series con las cuales se efectúan los diseños hidrológicos. Tales tendencias temporales en la media de los caudales máximos anuales evidencian el colapso de la hipótesis estacionariedad, es decir que la estacionariedad es una hipótesis inválida de trabajo para los diseños hidrológicos en ingeniería. Algunas series de la Figura. 2 muestran tendencias crecientes, otras muestran tendencias decrecientes. Todas son resultado de la acción combinada del cambio climático antropogénico, de la variabilidad climática natural, así como de la deforestación.

#### EFFECTOS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA ASOCIADA CON EL ENSO (EL NIÑO/OSCILACIÓN DEL SUR)

Durante más de dos décadas hemos investigado los efectos de la variabilidad climática en distintas escalas de tiempo sobre la hidroclimatología de Colombia. En particular, de los efectos de las dos fases (El Niño y La Niña) del evento ENSO (El Niño/Oscilación del Sur), sobre los procesos hidrológicos del país según los estudios [16, 18, 19, 26, 22, 21]. El ENSO es el principal mecanismo modulador del clima global a la escala de tiempo interanual. El Niño tiene una recurrencia promedio entre 3 y 4 años, mientras que La Niña entre 6 y 8 años. Es decir, la función de distribución de probabilidades de las variables hidrológicas es afectada por ambas fases del ENSO. Asimismo, contribuye al colapso de la estacionariedad como hipótesis de

trabajo para la estimación hidrológica.

Los caudales de los ríos colombianos exhiben muy altas correlaciones con los índices del ENSO. La Figura. 3 muestra el efecto de El Niño y La Niña sobre el ciclo anual de los caudales promedios de diversos ríos de Colombia. La intensidad y duración de los eventos de El Niño y La Niña son siempre variables, así como los efectos hidrológicos locales también son siempre variables [21]. Además del ENSO, hay muchos otros fenómenos macro-climáticos que afectan la variabilidad hidro-climática de Colombia Poveda, 2004 [16].

#### ¿QUÉ HACER EN TAREAS DE DISEÑO HIDROLÓGICO?

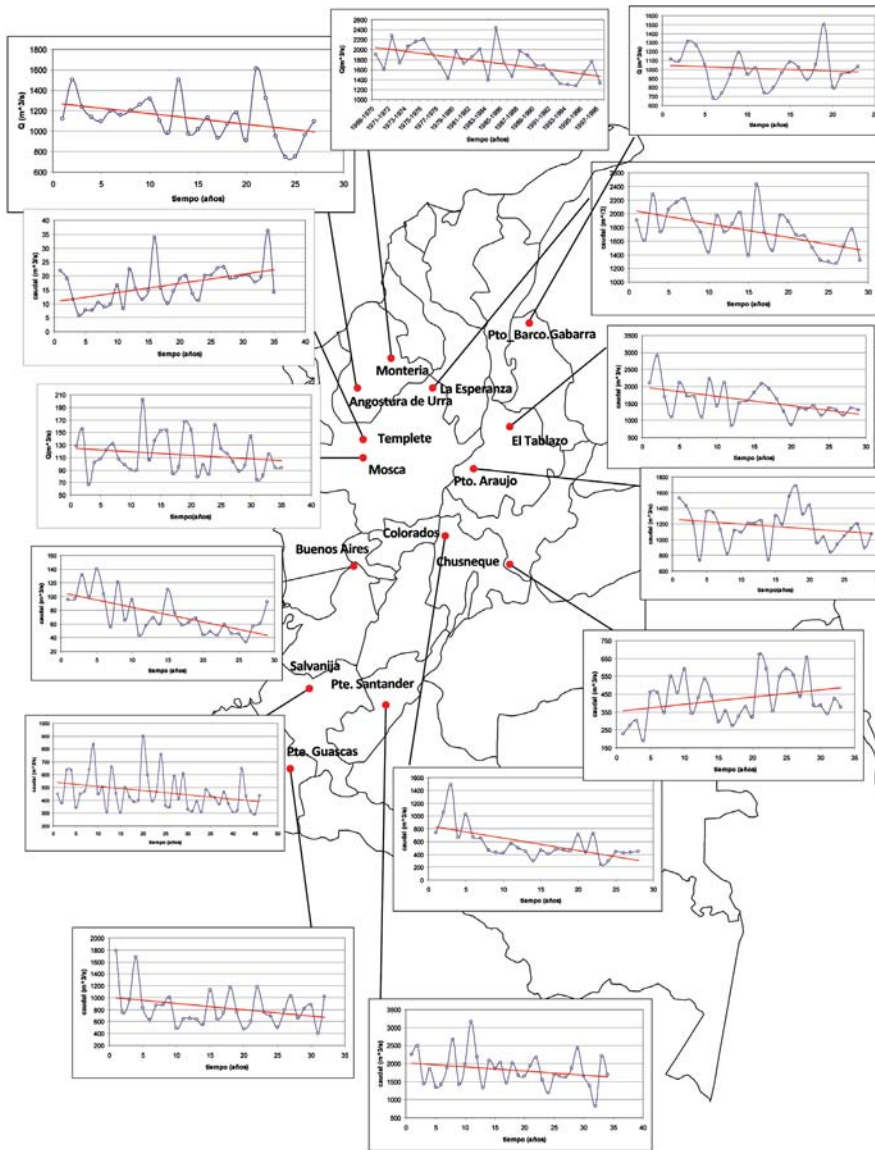
El cambio climático, la variabilidad climática, y la deforestación contribuyen al colapso de la hipótesis de estacionariedad. Esto tiene implicaciones muy importantes en las tareas de diseño hidrológico, por lo siguiente:

1. La llamada *fórmula racional* es una herramienta muy usada para el diseño de estructuras hidráulicas, que permite estimar los caudales máximos de una cuenca de área A, como

$$Q = cA \quad (2)$$

Donde c es un factor que depende del tipo de cobertura del terreno (afectado por la deforestación), I es la intensidad de la tormenta de diseño (afectada por el calentamiento global), de una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca (afectada por el cambio climático, la variabilidad climática y la deforestación), y A es el área de drenaje de la cuenca (creciente en el caso de las cuencas urbanas). Todos los factores de la fórmula racional son dinámicos ante estas problemáticas.

2. El análisis de frecuencia de caudales extremos que, se sigue haciendo en hidrología, tiene el problema de la hipótesis de estacionariedad y la hipótesis de independencia. Las series hidrológicas no satisfacen ninguna de las dos [1].
3. Las colas pesadas [6]. Las funciones de distribución de probabilidades



Fuente. Tomada de [20].

Figura 2. Series de caudales máximos anuales en diversos ríos de Colombia.

(FDP) tradicionales (Normal, Gumbel, Weibull) tienden a 1.0 muy rápidamente, lo que denota colas muy delgadas, e implica que los eventos muy extremos tienen probabilidades muy exiguas de ser superados. La naturaleza nos ha enseñado que las funciones de distribución de probabilidad de los caudales máximos son de colas pesadas (tienden a 1.0 muy lentamente), es decir que, los eventos extremos tienen alta probabilidad de ser superados. El uso de FDPs de colas delgadas trae como consecuencia un aumento del riesgo de colapso o de mal funcionamiento de las obras de ingeniería.

4. Los métodos de regionalización basados en regresiones lineales multivariadas entre los caudales extremos y algunas características hidrográficas de las cuencas, no apuntan al entendimiento e ignoran la complejidad de los fenómenos no lineales y emergentes en las cuencas hidrográficas. El peligro de usar la estadística siempre está presente en todos estos temas porque ¿para qué usamos la estadística, para iluminarnos o para apoyarnos? La estadística se debe usar para iluminarnos.

5. Los modelos lluvia-escurrentía sufren la *maldición de la dimensionalidad*, por el alto número de parámetros por calibrar, e ignoran las relaciones espacio-temporales de los procesos que gobiernan la dinámica hidrológica.

El enfoque atomístico que, trata de modelar la dinámica del agua en cada brizna de hierba de una cuenca hidrográfica, es un enfoque desacertado dada la complejidad de los sistemas bio-geofísicos, y la presencia de *fenómenos emergentes* [7, 8].

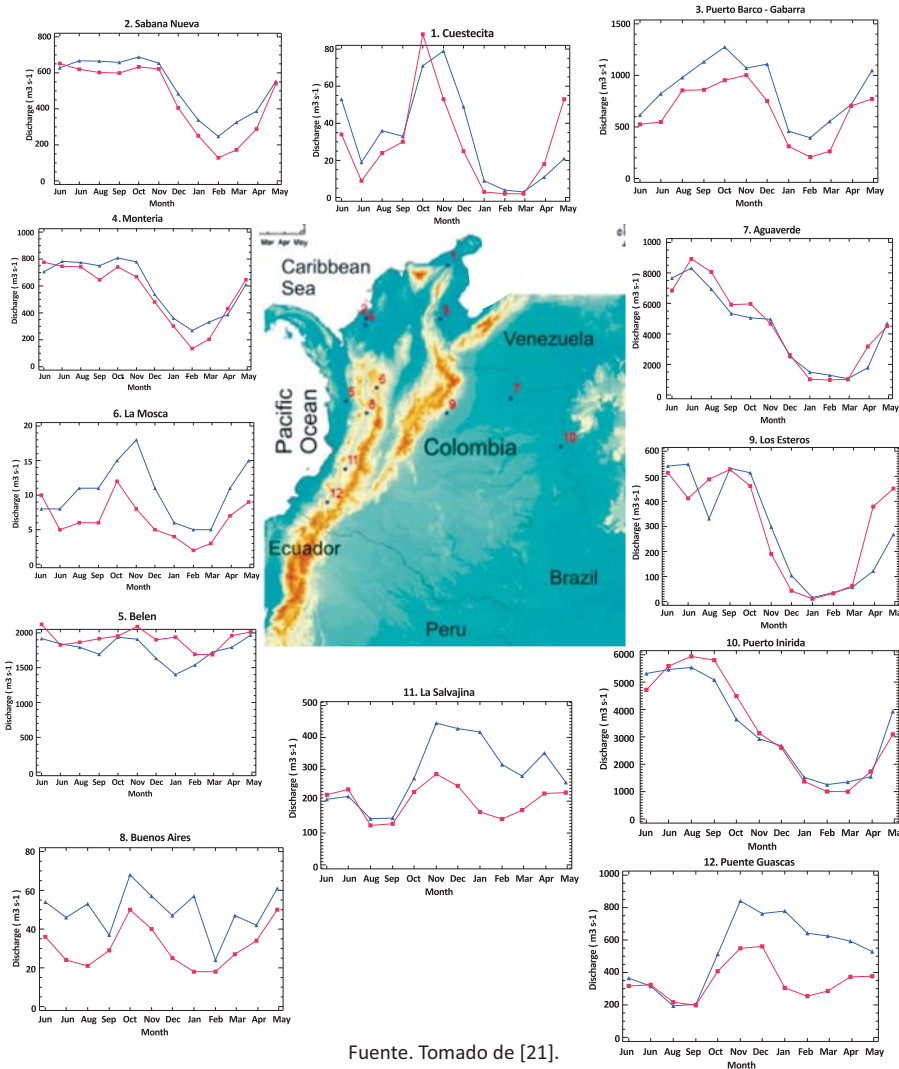
6. No se deben usar los resultados de modelos de circulación global (MCG), e inclusive modelos de circulación regional, en tareas operativas y de diseño hidrológico. Los MCG tienen enormes incertidumbres, y dificultadas para representar, entre otros procesos, la lluvia tropical de montaña, la cual exhibe unas dinámicas espacio-temporales altamente complejas [15].

7. La única salida es el entendimiento de la dinámica física e hidrológica que se logra con la investigación científica. Del entendimiento saldrán las mejores predicciones: “Hay que predecir bien, pero por las razones correctas” [12].

Identificada la problemática, es necesario ser propositivos. Hay herramientas y marcos metodológicos adecuados para enfrentar las tareas de diseño hidrológico en presencia del cambio climático y de la variabilidad climática. Vamos a ilustrar dos de esas técnicas: (1) el ajuste de funciones de distribución de probabilidad mixtas Tipo I, basado en los trabajos de los autores [24, 27]. Este último, basado en el uso de factores de ponderación asociados con la frecuencia de ocurrencia de las distintas fases del fenómeno ENSO. (2) Funciones de distribución de probabilidad mixtas Tipo II [27], las cuales consideran, además de las fases del ENSO, la estacionalidad de los caudales extremos dentro del año hidrológico.

#### FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES MIXTAS TIPO I PARA CAUDALES MÁXIMOS Y MÍNIMOS. MÉTODO Y DATOS

El trabajo de los autores [25] fue pionero en el uso de funciones de distribución de probabilidades mixtas, con-



Fuente. Tomado de [21].

Figura 3. Ciclo anual de los caudales medios mensuales en diversos ríos de Colombia durante La Niña (azul) y El Niño (rojo)

dicionadas a las dos fases del ENSO, para la estimación hidrológica en ríos de Chile y Perú. Aquí lo usaremos para la estimación de los caudales máximos de distinto periodo de retorno en ríos de Colombia. El análisis se realiza usando dos tipos de muestras estadísticas, así:

- Muestra 1: Caudales durante (1) El Niño y Normal, y (2) caudales durante La Niña (2 poblaciones)
- Muestra 2: Caudales durante (1) El Niño, (2) Normal, y (3) La Niña (3 poblaciones).

La distribución mixta es el resultado de la suma ponderada de las funciones

de distribución de probabilidades de cada muestra. El factor de ponderación se estima como la relación entre los datos de cada muestra y los datos de la serie completa. La representación de la mezcla de funciones de distribución de probabilidades está dada según,

$$F_T(X \geq x) = \rho_1 F_1(X \geq x) + \rho_2 F_2(X \geq x) + \dots + \rho_n F_n(X \geq x), \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \rho_i = 1, \text{ con } \rho_i = \frac{\text{Número de datos en la fase } i}{\text{Número de datos en la registro}}$$

Donde  $F_T$  representa la función de distribución de probabilidad de toda la muestra de caudales extremos,  $F_i$  es la función de distribución de probabilidad de cada muestra resultante de la discretización, y  $\rho_i$  representa el factor de ponderación de cada muestra. Para ilustrar el método, se usan las funciones de probabilidad Log-Normal, y las distribuciones de Valor Extremo Tipo I (Gumbel) y Tipo II (Fréchet), cuyas funciones de distribución de probabilidades pueden encontrarse en trabajos de los autores [4] y [9].

Las FDP se ajustan para cada muestra, obteniendo así tres funciones de distribución de probabilidad (LogNormal, Gumbel y Fréchet) para los caudales diarios máximos observados durante los años hidrológicos (junio 1 del año 0 a Mayo 31 del año +1) de ocurrencia de La Niña, y para los caudales diarios máximos observados durante años de ocurrencia de El Niño, y años Normales o “No ENSO”. Se define el año hidrológico comenzando el 1° de junio del año  $i$  y terminando el 31 de mayo del año siguiente  $i+1$ , debido a la dinámica del ENSO y su relación con el ciclo anual de la hidrología de Colombia [22, 26]. Para comprobar que el comportamiento de los caudales máximos, varían con las fases del ENSO, se utiliza la prueba no paramétrica de Wilcoxon. Para la estimación de los caudales mínimos se utilizaron las funciones de valor extremo tipo I (Gumbel) y tipo III (Weibull).

Para el análisis se usarán series de los caudales anuales extremos en ríos de todo el país, con al menos 25 años de registros, cuyas estaciones están localizadas como se muestra en el mapa de la Figura. 4.

La definición de los meses y eventos El Niño, No ENSO, y La Niña se obtienen del CPC (Climate Prediction Center) de NOAA<sup>1</sup> (Administración Nacional del Océano y la Atmósfera de Estados Unidos)

<sup>1</sup> Entidad que reporta las anomalías de la temperatura de la superficie del mar, y el ONI (Índice Oceánico del Niño) en la región Niño 3-4 del Océano Pacífico tropical (5°N-5°S, 120°-170°W). [http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)

### FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES MIXTAS TIPO I PARA CAUDALES MÁXIMOS. RESULTADOS

En el proceso de separación de las distintas muestras se encontró una marcada diferencia en los comportamientos de los caudales máximos en las diferentes fases del ENSO, especialmente, en la zona occidental y nororiental del país. A su vez, se pudo corroborar que los caudales máximos se incrementan durante la fase La Niña en la mayor parte del territorio colombiano. Para la costa Caribe, las diferencias son mayores entre los caudales máximos en las épocas de La Niña, en comparación con los caudales máximos durante las otras dos fases.

Para el caso de la discriminación de los caudales máximos anuales en dos y tres poblaciones, se observa que en la costa Pacífica y en la región centro-oriental de Colombia, la media y la desviación estándar de los caudales máximos y mínimos anuales observados aumentan con La Niña. En la región de la costa Caribe aparecen dos tipos de comportamiento: en la parte nororiental (La Guajira) hay decrecimientos en la media de los caudales máximos durante La Niña, pero en la parte noroccidental se presentan aumentos de los caudales máximos en La Niña, y los caudales mínimos de esta zona disminuyen durante la ocurrencia de El Niño. La zona de los Llanos Orientales presenta una tendencia contraria, es decir, caudales más altos en El Niño que en La Niña. Sin embargo, las diferencias de las medias de las diferentes fases, respecto a la media del caudal anual mínima, no son estadísticamente significativas. Este tema merece mayor investigación.

Para el caso de la discriminación según la Muestra 1 para los caudales máximos, se encontró una diferencia relevante entre los caudales de La Niña con respecto a las fases de El Niño y No ENSO, en la mayor parte del territorio colombiano. En el caso de la discriminación según la Muestra 2, se hace notoria la diferencia de los valores de la media de los caudales máximos; La Niña respecto a El Niño en el inte-

rior del país, representado en este caso por las estaciones ubicadas en los departamentos de Caldas, Antioquia, Santander y Norte de Santander.

En la Figura 5 se muestran los resultados del ajuste de funciones de distribución de probabilidades Fréchet según las fases del ENSO, para el río Catatumbo en la estación Puerto Gabarra. La probabilidad de no excedencia fue estimada con la función de distribución Fréchet acumulada, para la cual se utilizaron la media y la desviación de los logaritmos de los datos, con la discriminación 1.

Al comparar los valores de los caudales extremos estimados mediante funciones de distribución de probabilidad (FDP) simple y mixta, se encontró que las zonas de la Costa Caribe y suroriental del país (ríos Sinú y Meta), exhiben las mayores diferencias en los resulta-

dos. En zonas como la costa Pacífica y el interior del territorio colombiano, se encontraron diferencias negativas para períodos de retorno menores a 5 años; esto indica que las funciones de distribución simple utilizadas sobrestiman los valores de caudal para diferentes períodos de retorno, debido a que no tienen en cuenta el fenómeno ENSO.

Para algunos casos como el del río Ranchería (estación 1506705), se encontró que la FDP Fréchet produce las mayores diferencias entre los caudales estimados mediante las FDP simple y mixta. Esto se debe al decaimiento de tipo potencial de la cola de la función de distribución Fréchet, que está asociada con una mayor probabilidad de ocurrencia de eventos máximos extremos. Se podría decir entonces que en las estaciones en donde es muy notoria la diferencia entre las dos metodologías



Fuente: Tomada de [1].

Figura 4. Localización de las estaciones de medición de caudales usadas en el estudio.

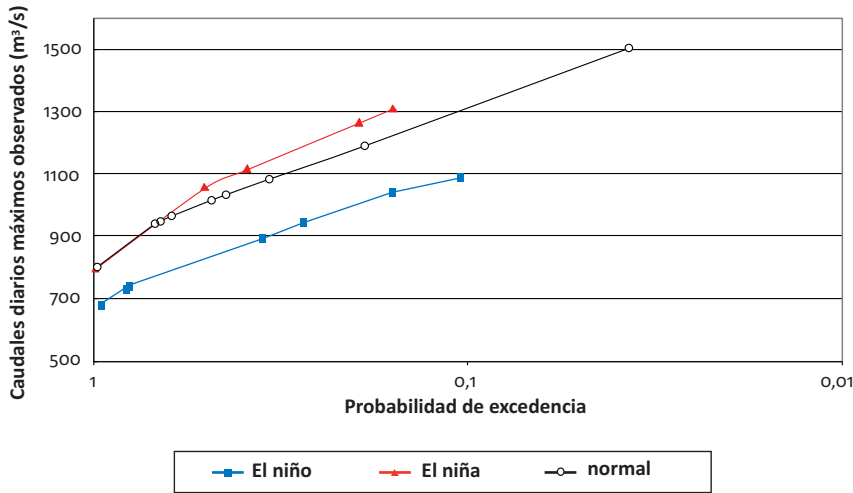


Figura 5. Función de distribución de probabilidades Fréchet ajustado según las fases del ENSO, para la serie de caudales máximos anuales, según la discretización 1 para el Río Catatumbo, estación Puerto Gabarra.

se recomienda utilizar la distribución Fréchet mixta que es más conservativo al estimar caudales para periodos de retorno determinados.

Finalmente, se observa que las estaciones que mostraron las menores diferencias entre las diversas fases del ENSO son aquellas que se ajustan de mejor forma a la distribución de probabilidad mixta. Esto puede ser explicado por dos posibles causas: la primera, que la falta de longitud en los registros genere una sobre-estimación de los factores de ponderación en las funciones de probabilidad mixtas, durante la fase El Niño y No ENSO, afectando los caudales máximos estimados. La segunda causa podría ser que otros factores macroclimáticos que afectan la climatología colombiana simultáneamente inciden en forma local de una manera más acentuada que el fenómeno ENSO.

FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES MIXTAS TIPO I PARA CAUDALES MÍNIMOS. RESULTADOS

La estimación de caudales mínimos de distinto período de retorno se hace de manera similar al caso de los caudales máximos anuales, teniendo en cuenta dos distinciones fundamentales: (1) la serie de caudales mínimos anuales se

estima con el mínimo promedio de una ventana móvil de 7 días durante todo el año hidrológico, este valor se supone que tendrá un periodo de retorno de 10 años (7Q10). Con esta técnica se pretende simular los periodos de sequía los caudales se asocian a los caudales mínimos extremos. (2) Para el caso de caudales mínimos anuales, éstos disminuyen en tanto aumenta el período de retorno, consistentemente con la definición de riesgo en el suministro de agua para consumo humano.

De acuerdo con el análisis realizado para los caudales mínimos, se encontró

que la mayoría de las estaciones tienen diferencias estadísticamente significativas durante las diferentes fases del ENSO, en especial cuando los caudales mínimos pertenecen a la muestra de los años La Niña. En la zona occidental de Colombia se presentan las mayores diferencias entre los caudales mínimos dependiendo de la fase del ENSO. Sin embargo, las diferencias entre los caudales de la muestra El Niño y No ENSO son similares en el 80% de las estaciones de acuerdo a la prueba de Wilcoxon con un nivel de confianza de 0.05. Este fenómeno puede deberse a que el fenómeno EL Niño es más frecuente que La Niña.

Tras ajustar las funciones de distribución de probabilidad se concluye que la función Weibull presenta los menores valores estimados de caudales mínimos, tanto para la FDP simple como para la mixta; siendo la FDP mixta tipo Weibull la que arrojó siempre los menores valores estimados de caudales mínimos. Los caudales mínimos para diferentes periodos de retorno se estimaron con la inversa de la función de distribución acumulada de cada una de las FDP, aplicando los parámetros de la serie anual de caudal mínimo de la estación 1606701 del río Catatumbo, sin discretizar, así como usando la Discretización 1 4. Los resultados se presentan en la Figura. 6.

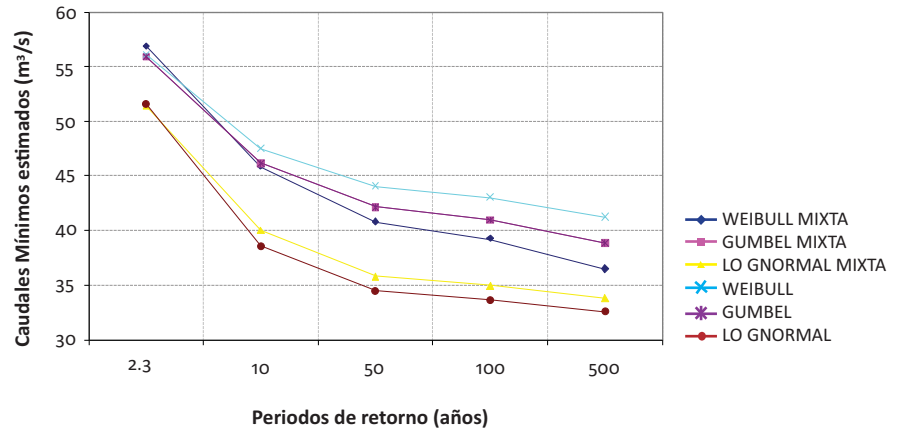


Figura 6. Caudales mínimos anuales estimados para diferentes periodos de retorno, para el Río Catatumbo, Norte de Santander, usando distintas FDPs tradicionales y las propuestas en este trabajo.

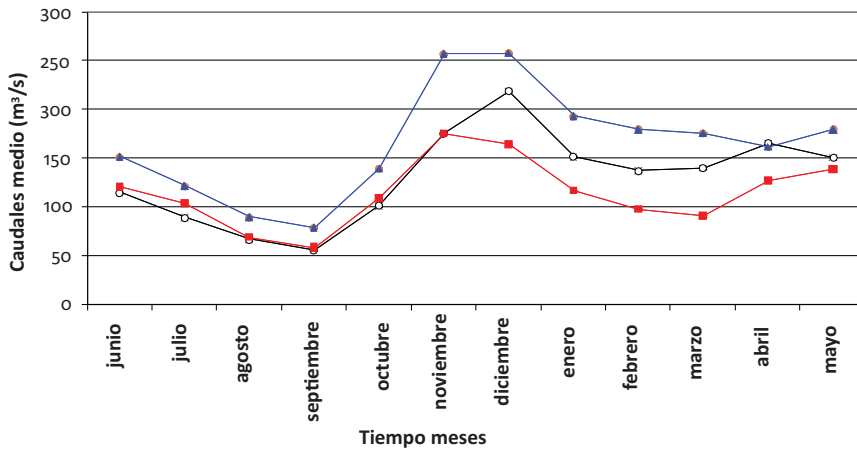


Figura 7. Ciclo anual promedio de los caudales máximos mensuales durante las fases del ENSO: La Niña (azul), Normal (negro) y El Niño (rojo), para el Río Cauca en la estación Salvajina.

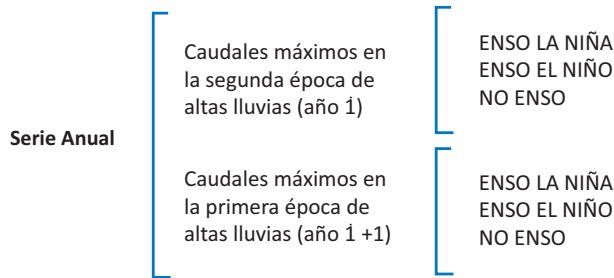


Figura 8. Esquema representativo para el análisis de caudales máximos con función de distribución de probabilidades mixta Tipo II.

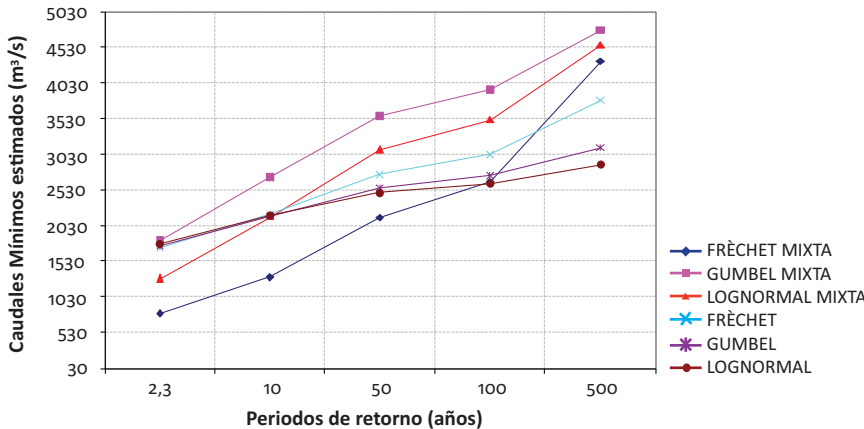


Figura 9. Caudales máximos estimados para diferentes periodos de retorno, según las distintas FDPs usadas en este trabajo, para el Río Nechí, en la estación La Esperanza, Antioquia.

### FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD MIXTAS TIPO II PARA CAUDALES MÁXIMOS. MÉTODO Y DATOS

Este método separa las distintas muestras estadísticas según la estacionalidad del ciclo anual de caudales, la cual está directamente asociada con el fenómeno climático de mayor influencia en la zona a la escala anual. En el caso de las series colombianas se toma en cuenta la bimodalidad del ciclo anual de caudales, debido a la oscilación meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), y las distintas fases del fenómeno ENSO. En la Figura. 7 se ilustra el ciclo anual de caudales máximos mensuales en el río Cauca, estación Salvajina.

Para nuestro caso de aplicación, se usará una estructura de separación de las series en muestras, tal como se ilustra en la Figura. 8 para el caso de caudales máximos. El procedimiento para la aplicación de la metodología es el siguiente:

- Identificar el proceso generador en el año. En el caso de los caudales extremos en Colombia el proceso generador anual más importante es la oscilación meridional de ZCIT (Zona de Convergencia Intertropical).
- Seleccionar para cada año las temporadas de máximos (o mínimos) caudales asociados con el proceso generador, en este caso teniendo en cuenta la bimodalidad ejercida por la ZCIT. Se toman dos máximos debido a que hay dos épocas de mayores caudales en el año en Colombia.
- Clasificar los valores máximos (o mínimos) anuales obtenidos en el paso anterior de acuerdo con las fases del ENSO.
- La distribución mixta estará dada por:

$$\begin{aligned}
 F_t &= r_1 \cdot F_{1A} + r_2 \cdot F_{2A} + r_3 \cdot F_{3A} \\
 F_1 &= F_{1A} \cdot F_{1B} \\
 F_2 &= F_{2A} \cdot F_{2B} \\
 F_3 &= F_{3A} \cdot F_{3B}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

<sup>2</sup> Las épocas del año A y B, están determinadas de acuerdo al paso de la ZCIT por Colombia. Tomando como épocas de altas lluvias los periodos entre Marzo - Abril y Septiembre- Octubre, y como épocas de menores lluvias, los periodos entre Junio-Julio y Diciembre-Enero.



Donde  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F_3$  representan los modelos mixtos estacionales bajo cada fase del ENSO.  $F_i$  (A ó B) es la probabilidad de ocurrencia de un caudal máximo (o mínimo), bajo el ENSO en fase  $i$ , en la época del año A ó B.<sup>2</sup> Y  $r_1$  es el factor de ponderación.

**FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD MIXTAS TIPO II PARA CAUDALES MÁXIMOS. RESULTADOS**

De acuerdo con los resultados obtenidos, los caudales máximos de las series que exhiben un ciclo anual con comportamiento bimodal exhiben una influencia más fuerte de La Niña que

los caudales máximos de que exhiben un ciclo anual unimodal. Esto se debe a que las series que presentan comportamiento unimodal están regidas por fenómenos climáticos locales que tienen más peso dentro de la serie que el mismo fenómeno ENSO. Las series del Caribe, por ejemplo, están influenciadas por los fenómenos que suceden sobre el Océano Atlántico tropical Norte y del Mar Caribe, incluyendo la NAO [18].

Al aplicar las funciones de distribución de probabilidad simples y mixtas, se encuentra que en las estaciones ubicadas en Antioquia y Chocó, así como en algunos sectores de la costa Caribe, que los mayores valores estimados se

obtienen mediante la función de distribución de probabilidad Gumbel Mixta. En la Fig. 9, se ilustran los resultados, para los caudales máximos anuales de distinto período de retorno del río Nechí en la estación La Esperanza (Antioquia).

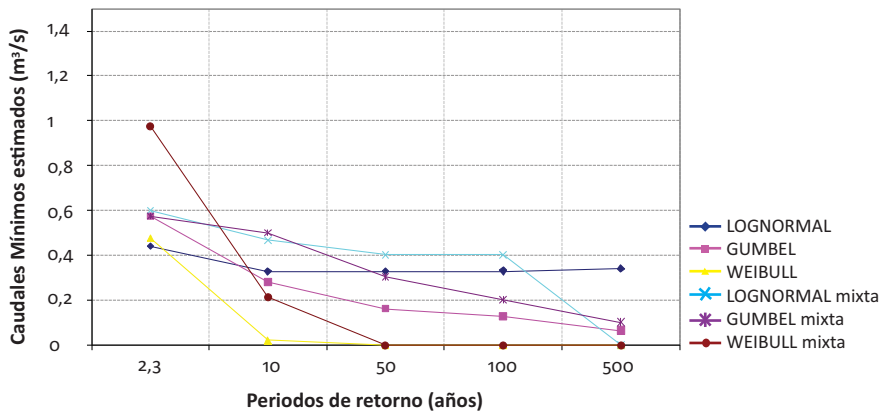
Como una conclusión generalizada, se encontró que entre las FDP empleadas, las de Gumbel Mixta tipo II y Lognormal Mixta tipo II producen los valores estimados más altos para diferentes periodos de retorno.

**FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD MIXTAS TIPO II PARA CAUDALES MÍNIMOS: RESULTADOS**

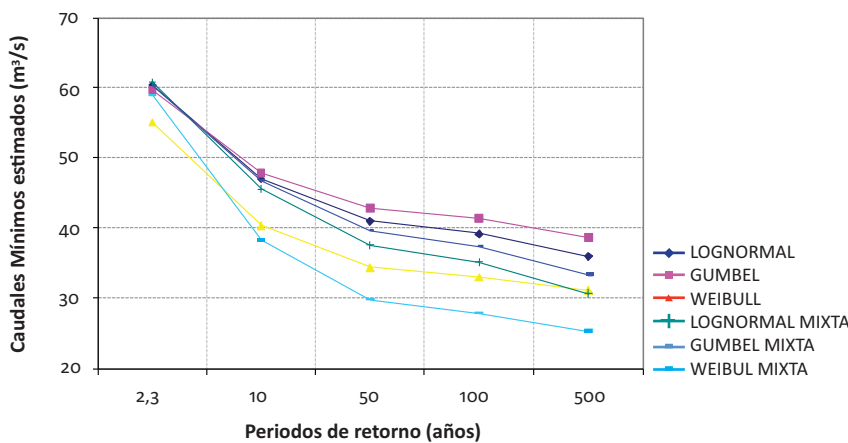
Al igual que para las series de caudales máximos, el ciclo anual de los caudales mínimos mensuales refleja el comportamiento de los caudales medios mensuales, es decir, un comportamiento bimodal (o unimodal) dependiendo de su localización en el territorio colombiano. Las series con comportamiento bimodal presentan sus caudales mínimos en las temporadas junio-julio y diciembre-enero, siendo ésta última la temporada de caudales más bajos. Las series con comportamiento unimodal también presentan sus menores caudales generalmente en la temporada diciembre-enero.

En las estimaciones de caudales mínimos se encontraron valores muy similares para todas las estaciones con los diferentes periodos de retorno, en especial en las estaciones ubicadas en la Guajira y en la zona central y nororiental del país. En la Figura 10 se presentan los resultados para el río Ranchería, en la estación Cuestecita, Guajira.

Para las regiones de la Guajira, la zona central y nororiental del país, los valores más bajos de los caudales mínimos para periodos de retorno entre 5-10 años, se obtuvieron usando la FDP Weibull simple, y para periodos de retorno mayores la FDP Weibull mixta arroja los menores estimativos. Las razones estadísticas de este comportamiento son que la FDP Weibull se ajusta mejor a los caudales mínimos, como se ha venido mencionando, pero al ser incluidos nue-



**Figura 10.** Caudales mínimos estimados para diferentes periodos de retorno, usando las FDP tradicionales y algunas de las propuestas en este trabajo, para el caso del Río Ranchería en la estación Cuestecita, Guajira.



**Figura 11.** Caudales mínimos estimados para diferentes periodos de retorno, mediante distintas funciones de distribución de probabilidades, para el caso del Río Patía, en la estación Puente Guasca, Nariño.

vos valores en las muestras, como es el caso de los caudales de años La Niña, las series extremas de los caudales mínimos tienden a aumentar su media, generando valores menos bajos pero que representan de manera más adecuada la dinámica hidrológica. Para las estaciones del sur del país se encuentra que los menores caudales para diferentes periodos de retorno, fueron estimados mediante la FDP Weibull mixta. En la Fig. 11 se ilustran los resultados obtenidos para el río Patía en la estación Puente Guasca, Nariño.

## CONCLUSIONES

0. La hipótesis de estacionariedad ha muerto. Las funciones de distribución de probabilidad sí dependen del tiempo por cambio climático, por variabilidad climática en distintas escalas, por cambios en los usos del suelo, y se reitera la preocupación de la deforestación. Esto tiene consecuencias fundamentales en el cambio de todo el ciclo hidrológico: lluvias, caudales, humedad de suelo, evapotranspiración, aguas subterráneas, infiltración. Sabemos que existe y tenemos que convivir con El Niño y La Niña como fenómenos naturales del clima de la Tierra que tienen incidencias muy claras en el clima del planeta. El ENSO no es causado por el cambio climático, pero una pregunta válida y fundamental es si el ENSO y si El Niño y La Niña serán más intensos y más frecuentes en un escenario de cambio climático. Sobre eso todavía no hay claridad y nos falta mucha investigación por hacer. A la escala de tiempo interanual está el ENSO, pero también están otros fenómenos macro climáticos como la NAO (Oscilación del Atlántico norte), la PDO (Oscilación Decadal del Pacífico), la MDO (Oscilación Multidecadal del Atlántico), la MJO (Oscilación de Madden-Julian), etc. Todos estos fenómenos macro-climáticos afectan la hidroclimatología de Colombia, y por tanto es necesario involucrarlos en tareas de entendimiento y de pronóstico.
1. Este trabajo ofrece alternativas para superar las limitaciones de los métodos que se usan tradicionalmente en tareas de ingeniería hidrológica relacionadas con la estimación de caudales extremos (máximos y mínimos) de distinto periodo de retorno. En particular, las limitaciones provienen de la violación de las hipótesis de independencia, homogeneidad y estacionariedad de las series de caudales extremos anuales, inherente en los análisis tradicionales, así como en el tipo de ley de decaimiento exponencial (colas delgadas) que asumen las FDP Gumbel y Weibull. La dinámica temporal hidro-climática es dependiente y no estacionaria, dados los efectos de las fases del fenómeno del ENSO: El Niño, La Niña y Normal, así como por los efectos del cambio climático y la deforestación. Por otra parte, hay ya muchas evidencias sobre la ley de decaimiento potencial (cola pesada, tipo Fréchet) de la distribución de caudales máximos anuales. Estos temas tienen implicaciones fundamentales en tareas de diseño hidrológico.
2. Los cambios detectados en la media para las series anuales de caudales máximos y mínimos, en su mayoría están asociados con la fase cálida del ENSO (El Niño). Esto se debe al gran impacto que tiene en las series colombianas y a que su frecuencia es mayor que la fase fría (La Niña). Es necesario disponer de mayor información en el tiempo para poder evaluar la significancia estadística de este resultado.
3. Los métodos que se implementan en este trabajo para superar las limitaciones de los análisis tradicionales son: ajuste de FDP Fréchet (equivalente al Tipo II de Funciones de Valores Extremos Generalizados), así como las FDP Mixtas, Fréchet, Gumbel y Weibull (Tipos I y II).
4. Una de las alternativas más promisorias es la estimación de caudales extremos usando funciones de distribución de probabilidades mixtas, discretizadas en poblaciones según las fases del ENSO. Los resultados indican que la función mixta Weibull tipo I, presenta buenos estimativos en los caudales mínimos extremos, y la función mixta Fréchet Tipo I es adecuada para estimar caudales máximos extremos.
5. En el presente trabajo se hace un aporte novedoso al entendimiento de la influencia de las fases del ENSO sobre hidrología Colombiana. Éste se refiere a la cuantificación del ciclo anual promedio de los caudales máximos y mínimos mensuales. Las conclusiones más generales se resumen en los numerales siguientes, discriminados para cuatro grandes regiones de Colombia.
6. La zona norte del país se caracteriza porque sus caudales máximos anuales se ven aumentados en la fase La Niña y se presentan tendencias negativas en los caudales máximos multianuales. La función que mostró mejor desempeño en el ajuste de los datos fue la Fréchet Mixta Tipo I. Para las series anuales de caudales mínimos no presentan cambios estadísticos significativos respecto a la media anual pero presentan tendencias positivas en la mayoría de sus estaciones. Las estimaciones de caudal de menor magnitud se manifiestan en las funciones Weibull y Weibull Mixta Tipo I para los periodos de retorno menores que 30 años. Para los periodos de retorno mayores que 30 años, las funciones Gumbel y Gumbel Mixta tipo I, presentan las menores estimaciones.
7. Las funciones de distribución de probabilidad que presentaron un mejor ajuste para los caudales mínimos en la zona oriental son las de Weibull y Weibull mixta tipo I. Para los caudales máximos se presentan aumentos durante La Niña; las funciones de distribución de probabilidad para los caudales máximos extremos que mostraron mejor desempeño en el ajuste fueron la Lognormal Mixta Tipo II y la Gumbel Mixta tipo II.
8. La zona occidental del país exhibe la mayor influencia del fenómeno ENSO, en caudales máximos con La Niña y en caudales mínimos con El

Niño. En general, las series de caudales máximos anuales presentan tendencias positivas estadísticamente significativas, con un nivel de confianza de 0.05 y la FDP que mejor se ajusta de las funciones propuestas en este estudio, es la Gumbel Mixta Tipo II y Frèchet. Los caudales mínimos no presentan tendencias y las FDP más adecuadas para estudios de diseño hidrológico son la Weibull y la Weibull Mixta Tipo I.

9. La zona central del país es afectada por el fenómeno ENSO en su fase fría (La Niña), aumentando los caudales máximos. Las funciones que de mejor forma se ajustan a las series estudiadas en Colombia son la Frèchet Mixta Tipo II y la Lognormal Mixta Tipo II. Para los caudales mínimos, el fenómeno ENSO afecta los caudales mínimos en menor medida que a los departamentos ubicados entre las cordilleras central y occidental. Las FDP que presentaron mejores ajustes para los caudales mínimos fueron la Weibull y la Weibull Mixta Tipo I, evaluadas con la prueba Smirnov-Kolmogorov, con un nivel de confianza de 0.05.

10. La zona sur del país se caracteriza por presentar comportamientos opuestos al resto del territorio colombiano, asociando sus caudales máximos extremos a la ocurrencia de El Niño, y los caudales mínimos a la fase La Niña, aunque es necesario verificar la validez estadística de esta observación, ya que la información hidrológica de esta región adolece de muchos problemas de cobertura espacial y temporal. Esto puede ser debido a la “frontera climática” que se presenta entre Colombia y el Ecuador durante las dos fases del ENSO. Los caudales anuales mínimos de esta región presentan tendencias negativas pero que no son estadísticamente significativas en la mayoría de los casos. La FDP que mejor se ajustó a estos datos fue la función Weibull Mixta Tipo I. Para los caudales máximos la FDP que mejor ajuste presenta es la de Frèchet.

11. Se hace necesario resaltar la falta de información hidrológica de caudales instantáneos y diarios en todo el país.

12. Es necesario reconocer la importancia de involucrar FDPs que consideran las fases del fenómeno ENSO por varias razones. Primero, reconocer que los fenómenos físicos afectan la hidrología es un paso importante dentro de la estimación de caudales extremos, debido a que la herramienta estadística debe ser complementada con el conocimiento que se tiene sobre los fenómenos climáticos que afectan las cuencas colombianas. Segundo, al mejorar las estimaciones, aproximándose más a la realidad del sistema, los sistemas de alerta contra inundación, sequía, aumento de las enfermedades de transmisión por medio de vectores, etc. serán más precisos. Finalmente, los costos en construcción de obras civiles serán acondicionados a obras que realmente sean adecuadas para la cuenca analizada, previniendo así daños por inundaciones o sobre diseños.

13. Se hace necesario seguir explorando las posibilidades de incluir variables climáticas que afectan la hidrología colombiana, en las técnicas de estimación de caudal. Por ejemplo, incluir las metodologías de estimación de caudales son series de duración parcial, definiendo los umbrales en términos de las fases del fenómeno ENSO.

14. La investigación científica de nuestros ecosistemas y cuencas hidrográficas es una tarea imperativa urgente que debemos poner al día. Es necesario para poder entender mejor esta dinámica hidroecológica en múltiples escalas de espacio y tiempo. Colciencias tiene la obligación de estimular y financiar la investigación científica básica y aplicada de la hidrología de Colombia.

Agradecimientos: Al Dr. Peter R. Waylen (University of Florida, Gainesville, FL, USA) por sus valiosos aportes para la consolidación de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] D.M. Álvarez, G. Poveda. (Sept. 2006). “Análisis de frecuencia de caudales máximos diarios en ríos de Colombia considerando las fases del fenómeno ENSO”. Presentado en: *XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Sociedad Colombiana de Ingenieros*.
- [2] W.R. Anderegg, et al. “Expert credibility in climate change”. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Vol., 107 No. 27, 2010, pp. 12.107-12.109.
- [3] A.M. Carmona and G. Poveda (2011 Dec). “Detection of long-term trends in monthly hydroclimatic records of Colombia and the Amazon River basin through Empirical Mode Decomposition”. Paper GC22B-03 presentado en: 2011 Fall Meeting of the American Geophysical Union, San Francisco, CA, USA, Dec. 5-9.
- [4] V.T Chow, Maidment, D. & L. Mays, *Applied Hydrology*, New York: McGrawHill, 1988, pp 57-77.
- [5] J.L Ceballos, C. Euscátegui, J. Ramirez, M. Cañón, Huggel, C., Wilfred, H., and Machguth, H. “Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia”, *Annals. Glaciology*, Vol., 43, No 1. September, 2006, 194-201.
- [6] El Adlouni, S., B. Bobée, & T.B.M.J. Ouarda “On the tails of extreme event distributions in hydrology”, *Journal of Hydrology*, Vol., 355 No. 1-4. June, 2008 16-33.
- [7] V.K Gupta, “Emergence of statistical scaling in floods on channel networks from complex runoff dynamics”, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol., 19 No. 2 January, 2004 357-365.
- [8] Gupta, V.K., B.M. Troutman, & D.R. Dawdy (2007), “Towards a

Nonlinear Geophysical Theory of Floods in River Networks: An Overview of 20 Years of Progress". En *Nonlinear Dynamics in Geosciences*, New York, 2007 Springer, 121-151.

- [9] J.Heo & J.D. Salas. "Estimation of Quantiles and confidence intervals for the Log Gumel Distribution" In: *Stochastics Hydrology and Hydraulics*, New York, 1996, Springer, 187-207.
- [10] Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). "Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Core Writing Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.), IPCC, Geneva, pp 104.
- [11] M.N Khaliq, T.B.M.J. Ouarda, J.C. Ondo, P. Gachon, & B. Bobée. "Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review". *Journal of Hydrology*, Vol., 329 No. 3-4, October 2006 pp. 534-552.
- [12] Klemeš, V., "Dilettantism in hydrology: transition or destiny?". *Water Resources Research*, Vol., 22 No. 9, March 1986, pp. 177S-188S.
- [13] O.J. Mesa, G. Poveda, L.F. Carvajal. *Introducción al Clima de Colombia*. Imprenta Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1997, 390.
- [14] A. Ochoa & G. Poveda (2008). "Distribución espacial de señales de cambio climático en Colombia". Presentado en: XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- [15] G. Poveda. "Mixed memory, (non) Hurst effect, and maximum entropy of rainfall in the tropical Andes". *Advances in Water Resources*. Vol., 34 No. 2, February 2011, pp. 243-256.
- [16] G. Poveda. "La Hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diaria". *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias exactas, físicas y naturales*. Vol., 28 No. 107, Junio 2004, pp. 201-222.
- [17] G. Poveda & O.J. Mesa. "Metodologías de predicción de la hidrología Colombiana considerando el evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)". *Atmósfera*, No.17, agosto 1993, pp. 25-38
- [18] G. Poveda & O.J. Mesa. "Las fases extremas del ENSO - El Niño y La Niña - y su influencia sobre la hidrología de Colombia". *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XI, No. 1, 1996, pp. 21-37.
- [19] G. Poveda & O.J. Mesa. "Influencia de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) sobre la hidroclimatología de Colombia". En *Memorias XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica e Hidrología*. IAHR, Guayaquil, Ecuador, 1996, 343-354.
- [20] G. Poveda, & O.J. "Mesa Feedbacks between hydrological processes in tropical South America and large-scale ocean-atmospheric phenomena". *Journal of Climate*, Vol., 10 No. 10 October, 1997, pp. 2690-2702.
- [21] G. Poveda & K. Pineda. "Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: Are they bound to disappear during the 2010-2020 decade?" *Advances in Geosciences*, Vol., 22, 2009, pp.107-116.
- [22] G. Poveda, D.M. Álvarez, & O.A. Rueda. "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*, Vol., 36 No.11-12, pp. 2233-2249.
- [23] G. Poveda, A. Jaramillo, M.M. Gil, N. Quiceno, and R.I. Mantilla. "Seasonality in ENSO related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index (NDVI) in Colombia", *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 8, 2001, pp. 2169-2178.
- [24] G. Poveda, O.J. Mesa, L.F. Salazar, P.A. Arias, H.A. Moreno, S.C. Vieira, P.A. Agudelo, V.G. Toro, and J. F. Alvarez. "Diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia". *Monthly Weather Review*, Vol. 133, No.1, 2005 228-240.
- [25] P.R Waylen & C.N. Caviedes. "El Niño and annual floods in coastal Peru: Binghamton Symposia in Geomorphology". *International Series*, Vol., 18, 1982, pp.57-77.
- [26] P.R Waylen & C.N. Caviedes "Annual and seasonal fluctuations of precipitation and streamflow in the aconcagua river basin, Chile". *Journal of Hydrology*, Vol., 120, 1990, pp. 79-101.
- [27] P.R Waylen & G. Poveda (), El Niño-Southern Oscillation and aspects of western South America hydro-climatology, *Hydrological Processes*, Vol., 16, 2002, pp. 1247-1260.
- [28] P.R Waylen & M.K. Woo (), Annual low flows generated by mixed processes. *Hydrological Sciences Journal*, Vol., 32 No. 9, 1987, pp. 371-383.