

# Estimación de caudales extremos no instantáneos en cuencas de la región nororiental andina de Colombia

## Estimation of extreme non-instantaneous flows in watersheds of the northeastern Andean region of Colombia

Yurby Vargas-Peñaranda <sup>1a</sup>, Nelson Cely-Calixto <sup>1b</sup>, Gustavo Carrillo-Soto <sup>1c</sup>

<sup>1</sup> Grupo de investigación HYDROS, Maestría en Ingeniería de Recursos Hidráulicos, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. Orcid: [0000-0002-8292-2994](https://orcid.org/0000-0002-8292-2994)<sup>a</sup>, [0000-0002-2083-6978](https://orcid.org/0000-0002-2083-6978)<sup>b</sup>, [0000-0001-6772-4431](https://orcid.org/0000-0001-6772-4431)<sup>c</sup>. Correos electrónicos: [yurbyesleydyvp@ufps.edu.co](mailto:yurbyesleydyvp@ufps.edu.co)<sup>a</sup>, [nelsonjaviercc@ufps.edu.co](mailto:nelsonjaviercc@ufps.edu.co)<sup>b</sup>, [gustavocarrillo@ufps.edu.co](mailto:gustavocarrillo@ufps.edu.co)<sup>c</sup>.

Recibido: 11 noviembre, 2023. Aceptado: 2 mayo, 2024. Versión final: 21 mayo, 2024.

### Resumen

Esta investigación se centra en la estimación de caudales extremos para cuencas hidrológicas en la región nororiental andina de Colombia, considerando periodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años. Se aplicó la prueba de bondad y ajuste de Kolmogórov-Smirnov a 39 estaciones limnimétricas en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Santander y Norte de Santander. Se evaluaron funciones de distribución como Normal, Log Normal, Log Pearson y Gumbel. Se aplicaron las ecuaciones de amplificación de caudales no instantáneos de Fuller, Tonini (1939), Tonini (1969), Cotecchia (1965) y Tucci (1991). Los resultados revelan que la distribución Normal demostró ser la más apropiada, abarcando un 36% de las estaciones analizadas y que los modelos de Tonini (1939) y Cotecchia tienden a sobreestimar, mientras que los de Fuller, Tonini (1969) y Tucci son más conservadores para la estimación de caudales extremos no instantáneos para los periodos de retorno analizados. La selección de un modelo de amplificación incorrecto, puede incurrir en el incremento de costos de las obras hidráulicas, pero también favorece el factor de seguridad, por lo cual se recomienda la calibración de los modelos de amplificación de los caudales no instantáneos y el aumento de estaciones limnigráficas en la región Nororiental Andina de Colombia.

**Palabras clave:** caudales no instantáneos; cuencas hidrológicas; estaciones limnimétricas; periodo de retorno.

### Abstract

This research focuses on the estimation of extreme flows for hydrological basins in the northeastern Andean region of Colombia, considering return periods of 10, 50, 100 and 200 years. The Kolmogorov-Smirnov goodness-of-fit test was applied to 39 limnometric stations in the departments of Boyacá, Cundinamarca, Santander and Norte de Santander. Normal, Log Normal, Log Pearson and Gumbel distribution functions were evaluated. The non-instantaneous flow amplification equations of Fuller, Tonini (1939), Tonini (1969), Cotecchia and Tucci were applied. The results reveal that the Normal distribution proved to be the most appropriate, covering 36% of the stations analyzed and that the models of Tonini (1939) and Cotecchia tend to overestimate, while those of Fuller, Tonini (1969) and Tucci are more conservative for the estimation of extreme non-instantaneous flows for the return periods analyzed. The selection of an incorrect amplification model can lead to increased costs of hydraulic works,

but it also favors the safety factor. Therefore, it is recommended to calibrate the amplification models of non-instantaneous flows and to increase the number of limnigraph stations in the Northeastern Andean region of Colombia.

**Keywords:** hydrological basins; limnimetric stations; non-instantaneous flows; return period.

## 1. Introducción

Colombia se destaca por ser uno de los países con una riqueza natural considerable, incluyendo agua, bosques y suelos, por lo tanto, contiene una gran diversidad de fauna y flora [1]. La Región Nororiental Andina de Colombia se caracteriza por su geografía montañosa y una gran variedad de ecosistemas. Al estar ubicada en la zona ecuatorial y cercana a los océanos, la región exhibe una amplia diversidad de climas, suelos y, sobre todo, una gran disponibilidad de recursos hídricos. La región Norte tiene muchos tipos de bosques secos, y la precipitación anual refleja dos sistemas acoplados: un patrón bimodal en los Andes, temporadas de lluvia entre los meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre, y un patrón unimodal en el oriente de Colombia [2].

La clasificación de los climas se basa en elementos como la vegetación y los tipos de suelos, ya que la vegetación actúa como un indicador de la humedad y la temperatura, mientras que los suelos desempeñan un papel importante en la compleja interacción entre la vegetación y el clima. Aunque la región andina colombiana se encuentra en la zona ecuatorial y está mayormente influenciada por la zona de convergencia intertropical y los vientos alisios, las clasificaciones climáticas a veces han categorizado a las cordilleras como climas fríos o fríos húmedos [3].

La gestión eficaz y sostenible de los recursos hídricos es esencial para el desarrollo socioeconómico y ambiental de cada región. En el caso específico de la Región Nororiental Andina de Colombia, que se destaca por su riqueza en biodiversidad, ecosistemas únicos y una población en constante crecimiento. El análisis de los caudales a lo largo del tiempo permite una visión más completa de la disponibilidad y el comportamiento del agua en la región, lo que resulta fundamental para tomar decisiones informadas y planificar estrategias efectivas para el manejo de los recursos hídricos. En este contexto, la investigación y estudio de los caudales no instantáneos adquiere un papel crucial para garantizar el desarrollo sostenible y la preservación de los valiosos recursos naturales de la Región Nororiental Andina de Colombia.

Las cuencas hidrográficas representan áreas geográficas donde se entrelaza un sistema acuático generador de

agua con un sistema socioeconómico influenciado por la actividad humana [4]. Se caracterizan por un límite conceptual llamado cuenca hidrográfica, que delimita áreas de drenaje que conducen a diferentes arroyos. Además, es importante proporcionar una descripción que refleje con precisión las necesidades reales de recursos del área de captación, abarcando toda el área donde los humanos utilizan los recursos naturales, incluso más allá de los límites hidrológicos establecidos [5]. Parámetros morfológicos de la cuenca utilizando la cuenca y red de drenaje en el sistema hidrogeomorfo [6].

Los efectos de estos cambios son evidentes en la vulnerabilidad de las infraestructuras cercanas a los cuerpos de agua, como viviendas, caminos y sistemas de abastecimiento de agua. Además, la dinámica de los caudales ha generado situaciones de riesgo para la seguridad de las comunidades, especialmente durante épocas de lluvias intensas o eventos climáticos extremos. El aumento de los caudales también ha afectado la calidad del suelo, contribuyendo a la pérdida de tierras cultivables y a la degradación de los ecosistemas circundantes [7].

Por lo tanto, el objetivo de este estudio se basa en el estudio y análisis de flujos extremos en 39 cuencas ubicadas en las provincias de Norte de Santander, Santander, Cundinamarca y Boyacá, en la región de los Andes del noreste de Colombia. Este estudio se enfoca en los flujos no instantáneos, lo que implica investigar el comportamiento del agua a lo largo del tiempo y considerar los diversos factores que afectan su dinámica. La prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov y los métodos de distribución se emplean en esta investigación para estimar y analizar las características de los flujos no instantáneos en estas cuencas.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Fase 1. Zona de estudio

La zona Nororiental de la Región Andina de Colombia es una subregión geográfica ubicada al noreste del país, en la cordillera de los Andes. Esta región se caracteriza por su geografía montañosa, con altitudes variables que van desde valles interandinos hasta picos montañosos, esta abarca varios departamentos, incluyendo Boyacá,

Santander, Norte de Santander, Arauca y Cundinamarca, entre otros [8]. Cada uno de estos departamentos presenta una amplia diversidad de ecosistemas, climas y recursos naturales, lo que la convierte en una región rica en biodiversidad, en la investigación se seleccionaron 4 departamentos, Norte de Santander, Santander, Cundinamarca, Boyacá, como se muestra en la [Figura 1](#) y [Figura 2](#).



Figura 1. Área de estudio de los departamentos seleccionados.

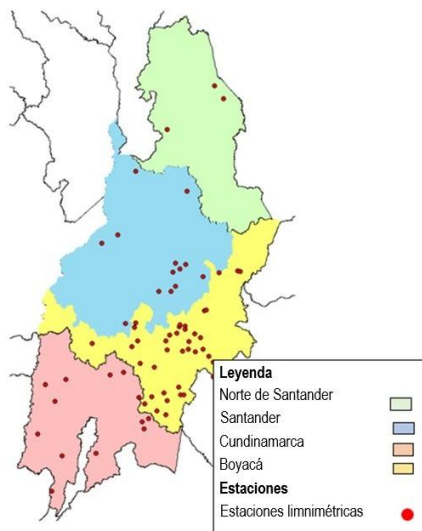


Figura 2. Localización área de estudio y estaciones limnimétricas.

De acuerdo a los 4 departamentos anteriormente mencionados, se seleccionaron 39 estaciones [limnimétricas](#) como se muestran en la [Tabla 1](#).

Se seleccionan los datos de las estaciones limnimétricas especificadas de la página del IDEAM, en este sentido,

no se tienen en cuenta las estaciones limnigráficas, debido a que estas aportan caudales instantáneos y no requieren de un factor de corrección; teniendo en cuenta el estado de las estaciones (estén activas o suspendidas), cumpliendo con los criterios como un intervalo de tiempo de por lo menos quince años de información y que cuente con un área de drenaje entre 1 y 3000 km<sup>2</sup>, lo que permitirá analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca en relación con eventos climáticos y patrones estacionales [9].

Utilizando las herramientas de análisis geoespacial de ArcGIS, se procederá a calcular los parámetros morfométricos de la cuenca. Estos parámetros son fundamentales para comprender la forma y la topografía de la cuenca, lo que influye en su respuesta hidrológica, la hidrología cuenta con algunos aspectos relevantes como es la precipitación, escorrentía, infiltración, caudales y calidad del agua [10].

Con los parámetros morfométricos calculados y los datos limnimétricos disponibles, se realizará un análisis hidrológico integral. Se explorará la relación entre los parámetros morfométricos y el comportamiento hidrológico de la cuenca. Se identificarán patrones de respuesta ante eventos climáticos y se evaluará la distribución espacial de los niveles de agua.

## 2.2. Fase 2. Aplicación de ecuaciones

### 2.2.1. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov

Se realiza la prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov, una prueba estadística no paramétrica utilizada para evaluar si una muestra de datos se ajusta a una distribución determinada [11]. El objetivo es determinar si la distribución teórica elegida puede describir de manera apropiada el patrón de los niveles de agua registrados en las estaciones limnimétricas. Se establece un nivel de significancia que sirve como punto de referencia para rechazar la hipótesis nula. Usualmente se utiliza  $\alpha = 0.05$  como punto de corte [12]. En la [Tabla 2](#) se describe la ecuación.

### 2.2.2. Métodos de distribución

A partir de lo anterior, se procede a aplicar un análisis en los métodos de distribución normal, log-normal, Pearson III y Gumbel, los cuales son diferentes tipos de distribuciones estadísticas utilizadas para modelar diferentes tipos de datos. Por consiguiente, se describen cada uno de los métodos [11].

Tabla 1. Estaciones limnimétricas

| Departamento | Estación         | Departamento  | Estación           |                    |
|--------------|------------------|---------------|--------------------|--------------------|
| Boyacá       | Chapasia         | Boyacá        | Maguncia           |                    |
|              | Los Cedros       |               | Vegas Las          |                    |
|              | Chiticuy         |               | Norte de Santander | Campanario         |
|              | Criadero         |               |                    | Campo Seis         |
|              | La Copa          | Soledad La    |                    |                    |
|              | Guican           | Boqueron      |                    |                    |
|              | La Gruta         | Cundinamarca  | Corralitos         |                    |
|              | La Resaca        |               | La Boyera          |                    |
|              | La Vega          |               | Silvania           |                    |
|              | Páez             |               | Ubalá              |                    |
|              | Puente Adriana   |               | Santander          | Ayacucho           |
|              | Puente Colonial  |               |                    | Justo Pastor Gómez |
|              | Puente Colorado  | Nemizaque     |                    |                    |
|              | Puente Forero    | Puente Llano  |                    |                    |
|              | Puente Las Canas | Puente Panega |                    |                    |
|              | San Francisco    | San Gil       |                    |                    |
|              | San Luis         | San Rafael    |                    |                    |
|              | Sutamarchan      | Conquistador  |                    |                    |
|              | Puente Totumo    | Esperanza     |                    |                    |
|              | La Trinidad      |               |                    |                    |

Fuente. elaboración propia.

Tabla 2. Prueba de Kolmogórov-Smirnov

| Método                                       | Ecuación   | Descripción   |
|--|--|---|
| Prueba de bondad de Kolmogórov- Smirnov [12] | $\Delta c = \max  F(Q) - P(Q)  \quad (1)$ $P(Q) = 1 - \frac{m}{N+1} \quad (2)$ | <p><math>\Delta c</math>=Estadísticos de Smirnov calculado</p> <p>F(Q)= Función de distribución de probabilidad de ajuste.</p> <p>P(Q)=Función de distribución de probabilidad observada (probabilidad menor que) ecu. (2).</p> |

- Distribución Normal (Gaussiana): en la distribución normal, los datos se centran alrededor de la media, y la dispersión de los datos con respecto a la media está determinada por la desviación estándar. Esta distribución es ampliamente empleada en análisis estadísticos y se utiliza para modelar diversos fenómenos naturales y sociales.
- Distribución Log-Normal: se utiliza para modelar datos positivos que tienen una dispersión asimétrica hacia la derecha, lo que significa que hay valores atípicos o extremos en la parte superior de la distribución.
- Distribución Log Pearson (Distribución de Log Pearson): estas distribuciones se caracterizan por

tres parámetros principales: la media, la desviación estándar y el parámetro de asimetría, que influyen en el perfil de la distribución. La distribución de Pearson III se aplica en campos como la hidrología y climatología, siendo una opción para modelar conjuntos de datos que no siguen una distribución normal.

- Distribución Gumbel: también conocida como distribución Tipo I de extremos, es una distribución de valores extremos utilizada para modelar eventos inusuales o extremos. Tiene aplicaciones en hidrología, ingeniería, y en general, en el análisis de eventos raros o extremos. En la [Tabla 3](#) se describen las ecuaciones de cada método.

Tabla 3. Métodos de distribución

| Método                        | Ecuación   | Descripción  |
|-------------------------------|--|--|
| Distribución Normal [13]      | $\varphi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{Z^2}{2}} \quad (3)$ $F(Z) = \int_{-\infty}^Z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (4)$ $z = \frac{Q-Q_m}{S} \quad (5)$ $Q = Q_m + ZS \quad (6)$ $Q_T = Q_M + K_T S \quad (7)$       | Donde Z es la variable estandarizada.<br>Q = caudal.<br>Q <sub>m</sub> = Valor medio del caudal máximo instantáneo.<br>S = Desviación estándar máxima instantánea de flujo.  |
| Log Normal [13]               | $Z = \frac{Y-\gamma}{\phi} \quad (8)$ $\phi = \sqrt{\frac{\sum(Y_i-\gamma)^2}{N-1}} \quad (9)$   | Y= logaritmo del caudal máximo instantáneo.<br>γ = Valores medios de valores y.<br>φ = Desviación estándar de los valores de Y.  |
| Distribución Log Pearson [13] | $f(x) = \frac{(x-x_0)^{\alpha-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (10)$ <p>Función de distribución acumulada está dada</p> $F(y) = \int_0^y \frac{y^{\alpha-1} e^{-y}}{\Gamma(\alpha)} dy \quad (11)$              | La distribución de Pearson III se destaca por ser tanto asimétrica como no negativa, lo que la convierte en una elección apropiada para representar los caudales máximos<br>Donde<br>X= variable aleatoria.<br>x <sub>0</sub> = origen de la variable x,<br>parámetro de posición (valor inicial).<br>β = parámetro de escala.<br>α= parámetro de forma. |
| Distribución Gumbel [14]      | $f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)} e^{-e^{\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)}} \quad (12)$ $w = \frac{x-\beta}{\alpha} \quad (13)$ $dx = \alpha dw \quad (14)$ $f(w) = \frac{1}{\alpha} e^{-w-e^{-w}} \quad (15)$ | Donde<br>X=variable aleatoria.<br>β, α= Los parámetros de la distribución de valores extremos son de tipo I o siguen una distribución doble exponencial.   |

### 2.3. Caudales no instantáneos

Esta metodología se centra en el cálculo de caudales no instantáneos utilizando diversas ecuaciones desarrolladas por distintos investigadores a lo largo del tiempo. Las ecuaciones de Fuller (1914) [15], Tonini (1939) [16], Tonini (1969) [16], Cotecchia (1965) [17] y Tucci (1993) [18], las cuales se utilizan para estimar caudales en diferentes contextos hidrológicos.

A través de estas ecuaciones, se busca comprender el flujo de agua en ríos y cuerpos de agua, considerando la temporalidad y variabilidad de los caudales, como se menciona en la [Tabla 4](#).

Tabla 4. Ecuaciones de caudales no instantáneos

| Método                  | Ecuación   | Referencia |
|-------------------------|--|------------|
| <b>Fuller (1914)</b>    | $Q_p = Q_0(1 + 2.66 * A^{-0.3})$   | [15]       |
| <b>Tonini (1939)</b>    | $Q_i = (1 + 68A^{-0.50})Q_{med}$   | [16]       |
| <b>Tonini (1969)</b>    | $Q_i = (2.39A^{-0.112})Q_{med}$  | [16]       |
| <b>Cotecchia (1965)</b> | $Q_i = (32A^{-0.313})Q_{med}$<br>Para áreas de drenajes mayores que 120 Km <sup>2</sup><br><br>$Q_i = (16A^{-0.190})Q_{med}$<br>Para áreas de drenajes menores que 120 km <sup>2</sup> | [17]       |
| <b>Tucci (1993)</b>     | $Q_{ins} = Q_{max}(1 * 15.03 * A^{-0.59})$   | [18]       |

### 3. Resultados

#### 3.1. Cálculo de los parámetros morfométricos

Al calcular los parámetros físicos, el relieve y la forma de la cuenca para las treinta y nueve (39) estaciones distribuidas en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Santander y Norte de Santander, se determina su contribución a la observación hidrológica. Los valores correspondientes se detallan en la [Tabla 5](#).

En cuanto a las características topográficas de las cuencas, se definen como áreas geográficas que son mayormente planas, suaves y moderadamente accidentadas, con pendientes bajas. Los parámetros de forma dan el índice de compacidad con respecto a la circunferencia de la piscina y la circunferencia de un círculo con la misma área que la piscina. Esta relación describe la forma de la cuenca y está estrechamente relacionada con el tiempo de concentración del sistema hidrológico. Esto significa que a medida que este índice se acerca a la unidad, la concentración de agua tiende a ser mayor. Las formas de las cuencas varían de ovaladas y oblongas a rectangulares, como se detalla en la [Tabla 6](#).

Los resultados morfométricos revelan diversas características significativas de la cuenca hidrológica bajo estudio. Con una superficie de captación de 12.70 km<sup>2</sup> y una forma que oscila entre ovalada y oval oblonga, la cuenca presenta una propensión a acumular considerables volúmenes de agua con un flujo moderado, lo que, en circunstancias naturales, podría haber contribuido a regular el caudal. Sin embargo, esta dinámica cambia en la parte baja de la cuenca debido a

la filtración del suelo provocada por el desarrollo urbano.

Tabla 5. Parámetros físicos de la cuenca

| Estación           | Área (km <sup>2</sup> ) | Perímetro (km) | Longitud (km) |
|--------------------|-------------------------|----------------|---------------|
| La Copa            | 6.56                    | 12.61          | 4575.41       |
| Puente Colonial    | 31.99                   | 26.29          | 7374.18       |
| Las Vegas          | 33.37                   | 28.02          | 6552.54       |
| Criadero           | 35.61                   | 34.89          | 8728.90       |
| La Esperanza       | 40.62                   | 30.70          | 12247.79      |
| La Trinidad        | 42.9                    | 34.34          | 9688.06       |
| Campanario         | 45.55                   | 41.10          | 14826.37      |
| Puente Las Canas   | 49.23                   | 38.97          | 4180.32       |
| Chiticuy           | 58.76                   | 36.87          | 10937.76      |
| Boquerón           | 62.98                   | 39.61          | 10103.58      |
| Ubalá              | 68.32                   | 38.60          | 7720.11       |
| Conquistador       | 77.24                   | 48.18          | 19083.80      |
| Puente Forero      | 83.15                   | 46.46          | 8763.32       |
| La Vega            | 100.77                  | 57.25          | 18105.21      |
| La Soledad         | 102.6                   | 54.17          | 19015.33      |
| La Gruta           | 103.89                  | 50.65          | 14692.60      |
| Maguncia           | 139.72                  | 63.52          | 20585.44      |
| San Francisco      | 148.82                  | 57.49          | 15751.14      |
| Guican             | 151.54                  | 58.85          | 15612.05      |
| Silvania           | 158.57                  | 59.09          | 19213.54      |
| La Boyera          | 174.94                  | 70.61          | 19772.51      |
| Cedros Los         | 215.96                  | 70.43          | 21254.57      |
| San Luis           | 225.27                  | 76.28          | 19052.88      |
| Puente Panega      | 245.94                  | 70.77          | 20260.14      |
| Puente Colorado    | 247.62                  | 82.46          | 23995.60      |
| Corralitos         | 247.96                  | 83.21          | 29773.10      |
| Campo Seis         | 286.51                  | 90.79          | 26817.46      |
| Justo Pastor Gómez | 320.45                  | 128.81         | 40964.16      |
| Sutamarchan        | 326.85                  | 93.40          | 29631.72      |
| Puente Adriana     | 344.6                   | 142.87         | 35360.14      |
| La Resaca          | 376.76                  | 118.54         | 33999.72      |
| Puente Llano       | 606.44                  | 124.93         | 33684.64      |
| Nemizaque          | 623.4                   | 142.48         | 46954.46      |
| Chapasía           | 915.91                  | 156.39         | 44098.36      |
| Páez               | 1033.16                 | 167.47         | 55127.12      |
| Puente Totumo      | 1080.87                 | 159.18         | 45500.84      |
| San Rafael         | 1211.01                 | 230.76         | 74221.40      |
| Ayacucho           | 1458.64                 | 229.90         | 72320.84      |
| San Gil            | 2085.65                 | 271.64         | 88502.75      |

Tabla 6. Características del relieve de la cuenca

| Estación           | Características pendientes | Tipo de relieve          |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|
| La Copa            | 0.07%                      | Plano                    |
| Puente Colonial    | 8.64%                      | Medianamente accidentado |
| Las Vegas          | 8.35%                      | Medianamente accidentado |
| Criadero           | 0.53%                      | Plano                    |
| La Esperanza       | 7.57%                      | Medianamente Accidentado |
| La Trinidad        | 6.70%                      | Suave                    |
| Campanario         | 5.79%                      | Suave                    |
| Puente Las Canas   | 5.78%                      | Suave                    |
| Chiticuy           | 2.90%                      | Plano                    |
| Boquerón           | 4.85%                      | Suave                    |
| Ubalá              | 4.06%                      | Suave                    |
| Conquistador       | 8.12%                      | Medianamente Accidentado |
| Puente Forero      | 6.94%                      | Suave                    |
| La Vega            | 3.27%                      | Suave                    |
| La Soledad         | 4.34%                      | suave                    |
| La Gruta           | 3.15%                      | Suave                    |
| Maguncia           | 2.49%                      | Plano                    |
| San Francisco      | 2.84%                      | Plano                    |
| Guican             | 9.57%                      | Medianamente accidentado |
| Silvania           | 5.01%                      | Suave                    |
| La Boyera          | 2.25%                      | Plano                    |
| Cedros Los         | 4.89%                      | Suave                    |
| San Luis           | 8.89%                      | Medianamente accidentado |
| Puente Panega      | 7.29%                      | Medianamente accidentado |
| Puente Colorado    | 1.14%                      | Plano                    |
| Corralitos         | 2.29%                      | Plano                    |
| Campo Seis         | 1.23%                      | Plano                    |
| Justo Pastor Gómez | 1.55%                      | Plano                    |
| Sutamarchan        | 1.04%                      | Plano                    |
| Puente Adriana     | 3.04%                      | Suave                    |
| La Resaca          | 1.06%                      | Plano                    |
| Puente Llano       | 2.99%                      | Plano                    |
| Nemizaque          | 2.84%                      | Plano                    |
| Chapasía           | 3.10%                      | Suave                    |
| Páez               | 2.46%                      | Plano                    |
| Puente Totumo      | 4.42%                      | Suave                    |
| San Rafael         | 0.40%                      | Plano                    |
| Ayacucho           | 1.13%                      | Plano                    |
| San Gil            | 1.16%                      | Plano                    |

De acuerdo con el estudio realizado por Belmonte et al., [19], se señala que el sistema hídrico de la cuenca se distingue por ser intermitente, con una longitud total de 38.25 km. La clasificación como un sistema de cuarto orden, sugiere la presencia de una red de drenaje eficaz y ramificada. La cuenca del estudio en mención presenta formas ovales alargadas, con una densidad de drenaje de 3.01 km/km<sup>2</sup>, que indica que la cuenca tiene un drenaje moderado, su tiempo de concentración sugiere una evacuación lenta del agua, debido a la forma de la misma, lo que podría incrementar el riesgo de inundaciones en condiciones específicas. En contraste, se especifica que la cuenca está en un estado de transición y que las actividades humanas, como cambios en el uso del suelo, podrían influir en sus características hídricas y geomorfológicas [20]. En comparación con el resultado obtenido, se observa una semejanza con lo presentado anteriormente, debido a que se analizaron 39 cuencas, según se muestra en la [Tabla 7](#), y en las cuales se analiza la forma de cada cuenca.

En el estudio de Montoya et al. [21], menciona que la microcuenca de la quebrada Los Andes revela una serie de características morfométricas y ambientales significativas. Esta área, que abarca solo 2.87 km<sup>2</sup>, presenta una forma ovalada a oval oblonga y se caracteriza por su topografía empinada, lo que contribuye a una alta densidad de drenaje y una frecuencia de drenaje superior a la unidad. Estas características indican que la microcuenca es propensa a un rápido flujo de agua superficial.

La investigación sugiere que las características morfométricas y la red de drenaje desempeñan un papel fundamental en la dinámica hidrológica y ecológica de la microcuenca. Además, se resalta la influencia positiva del manejo conservacionista del suelo en la preservación de la calidad del agua [22].

### 3.2. Modelo probabilístico

El modelo probabilístico empleado, como previamente mencionado, se ha definido a través de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov, con un nivel de significancia del 5%. Se realizaron pruebas a funciones de distribución como la normal (37.5%), Gumbel (12.5%), Log-normal (21.9%), y Log Pearson (28.1%), asignando el porcentaje a aquella que mejor se ajustó para las treinta y nueve (39) estaciones. La [Figura 3](#) ilustra la distribución de los caudales no instantáneos para un periodo de retorno de 10 años en relación con el área de drenaje y la tendencia de los caudales para un aumento y disminución del 50 %.

Tabla 7. Parámetros morfométricos de la cuenca

| Estación         | Kc  | Descripción | Estación           | Kc  | Descripción |
|------------------|-----|-------------|--------------------|-----|-------------|
| La Copa          | 1.4 | *           | La Boyera          | 1.5 | **          |
| Puente Colonial  | 1.3 | *           | Cedros Los         | 1.4 | *           |
| Las Vegas        | 1.4 | *           | San Luis           | 1.4 | *           |
| Criadero         | 1.6 | **          | Puente Panega      | 1.3 | *           |
| La Esperanza     |     | *           | Puente Colorado    | 1.5 | *           |
| La Trinidad      | 1.5 | *           | Corralitos         | 1.5 | *           |
| Campanario       | 1.7 | **          | Campo Seis         | 1.5 | **          |
| Puente Las Canas | 1.6 | **          | Justo Pastor Gómez | 2.0 | **          |
| Chiticuy         | 1.4 | *           | Sutamarchan        | 1.5 | *           |
| Boquerón         | 1.4 | *           | Puente Adriana     | 2.2 | **          |
| Ubalá            | 1.3 | *           | La Resaca          | 1.7 | **          |
| Conquistador     | 1.5 | **          | Puente Llano       | 1.4 | *           |
| Puente Forero    | 1.4 | *           | Nemizaque          | 1.6 | **          |
| La Vega          | 1.6 | **          | Chapasía           | 1.5 | *           |
| La Soledad       | 1.5 | **          | Páez               | 1.5 | *           |
| La Gruta         | 1.4 | *           | Puente Totumo      | 1.4 | *           |
| Maguncia         | 1.5 | **          | San Rafael         | 2.3 | **          |
| San Francisco    | 1.3 | *           | Ayacucho           | 1.7 | **          |
| Giicán           | 1.3 | *           | San Gil            | 1.7 | **          |
| Silvania         | 1.3 | *           |                    |     |             |

Nota: \* Forma Oval – Oblonga, \*\* Forma Oval- Oblonga A Rectangular – Oblonga

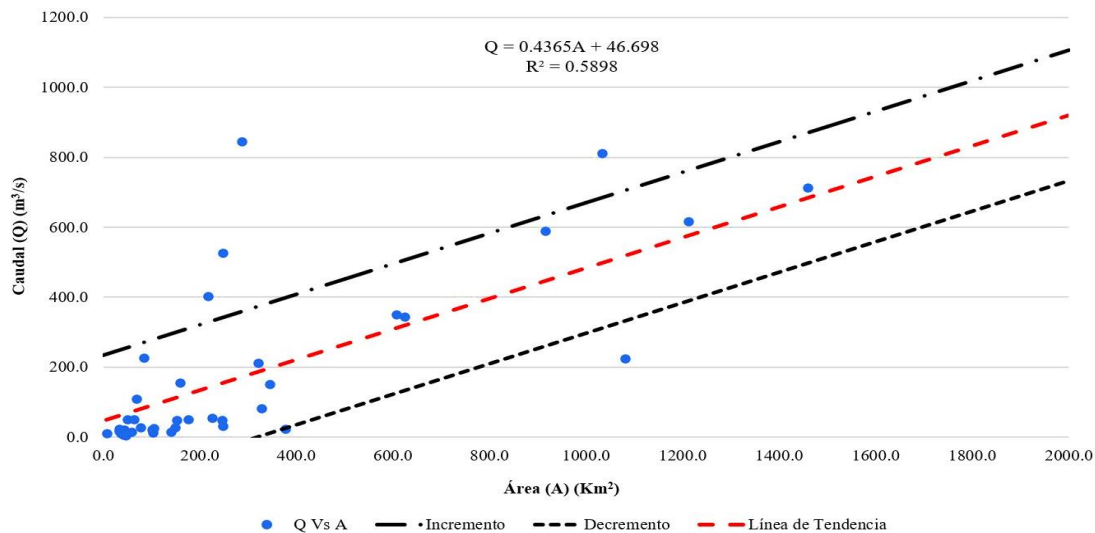


Figura 3. Caudales no instantáneos para un periodo de retorno de 10 años.

Esto evidencia la posibilidad de que dos cuencas con la misma área de drenaje presenten caudales diferentes, lo cual podría resultar en una sobreestimación o subestimación de la tendencia del caudal.

Tal como se observa en la Figura 3, la comparación entre los caudales y el área tiende a no presentar una dispersión en gran parte de los puntos observados,

manteniéndose cercanos a la línea de tendencia; así mismo, este valor R encontrado, representa la correlación entre las variables analizadas. Como resultado de la prueba de Kolmogórov-Smirnov de bondad y ajuste a las funciones de distribución de probabilidad: Normal, Log normal, Log Pearson y Gumbel, a las 39 estaciones limnimétricas de las cuencas hidrológicas de los departamentos de Boyacá,



Cundinamarca y Santander, se observó que el 36% de las estaciones la mejor distribución fue la Normal, seguido del 31% con Log Pearson, 21% con Log Normal y 13% con Gumbel, asimismo se amplificaron los caudales no instantáneos con los modelos de Fuller, Tonini (1939), Tonini (1969), Cotecchia y Tucci, como se muestra en la **Figura 4**, demostrando que los modelos Tonini (1939) y Cotecchia sobreestiman entre 2.5 y 13 veces los caudales, mientras que los modelos de Fuller, Tonini (1969) y Tucci son más conservadores amplificando los caudales entre 1.17 y 2.95 veces. La selección de un modelo de amplificación incorrecto, puede incurrir en el incremento de costos de las obras hidráulicas, pero también favorece el factor de seguridad, por lo cual se recomienda la calibración de los modelos de amplificación de los caudales no instantáneos y el aumento de estaciones limnigráficas en la región Nororiental Andina de Colombia.

En la **Figura 4** se presenta la estimación de caudales para cada una de las cuencas analizadas en la investigación, por cada uno de los métodos de corrección de lectura de las estaciones limnigráficas, aplicando las ecuaciones planteadas anteriormente y en las cuales se observa la relación entre el caudal corregido con el obtenido sin modificar. Esto se observa en contraste con lo presentado en 2015 por José Gamba [22], quien se enfocó en encontrar la mejor distribución de probabilidad para proyectar caudales máximos en el

río Magdalena utilizando datos del IDEAM. Se determinó que la distribución Log-Pearson Tipo III ofrecía el mejor ajuste, con un valor promedio de 2.427, utilizando la prueba de Tres Momentos. Este enfoque difiere del método de Kolmogórov-Smirnov utilizado en la evaluación de otras distribuciones. La elección de la distribución consideró la más adecuada para futuros análisis y gestión de recursos hídricos en el río Magdalena.

La investigación llevada a cabo por Rodríguez en 2018 se enfocó en la Microcuenca Los Cojos y la quebrada La Virgen, identificando la pendiente pronunciada y el relieve escarpado como factores de alto riesgo para movimientos de flujo imprevistos. La aplicación de coeficientes específicos para la lluvia de 24 horas garantizó la fiabilidad del método estocástico, evitando subestimaciones. Las simulaciones revelaron un patrón coherente en el comportamiento del flujo y desbordamiento del caudal, resaltando áreas con cambios abruptos de pendiente. A pesar de incrementos significativos en el caudal, la quebrada La Virgen, con su geomorfología y profundidad de cauce, no experimentó desbordamientos significativos. La textura del suelo (arcillo-limosa) aceleró el proceso de escorrentía. En resumen, el estudio subraya la importancia de la topografía y la textura del suelo en la gestión del riesgo en zonas propensas a inundaciones [23].

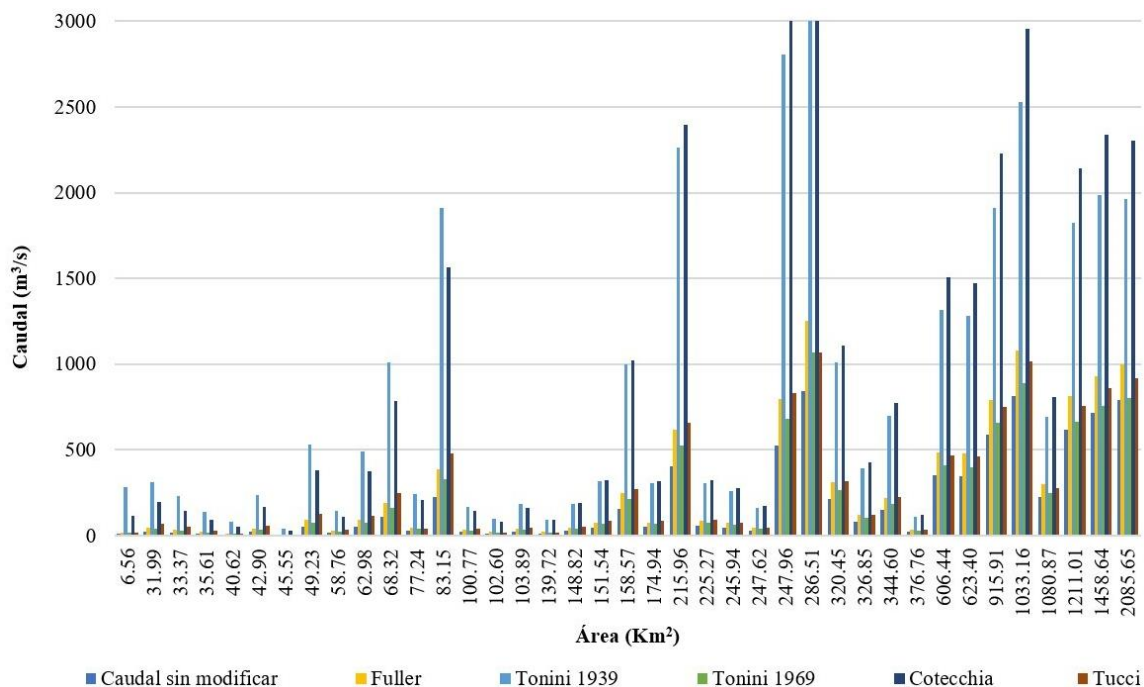


Figura 4. Caudales máximos no instantáneos y caudales amplificados.

Otro estudio significativo revela que el uso urbano del suelo y su cobertura impactan la respuesta hidrológica de una cuenca. La impermeabilidad del suelo y la rugosidad afectan los volúmenes de escorrentía y la rapidez de la respuesta. La investigación destaca que, en áreas urbanas, la respuesta es rápida, especialmente con alta impermeabilidad, mientras que en zonas menos intervenidas y con menor impermeabilidad, la respuesta es más lenta. Se concluye que, aunque la topografía influye, el uso del suelo es el factor determinante. Se sugiere mejorar la recopilación de datos para futuras investigaciones, especialmente en cuencas con pendientes pronunciadas y diversos usos del suelo. Estos estudios son cruciales para comprender el comportamiento de sistemas de alcantarillado en áreas urbanas [24].

#### 4. Conclusiones

La elección del modelo probabilístico más adecuado para la estimación de caudales máximos está vinculada al método empleado en la prueba de bondad. De acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación, la distribución Normal demostró ser la más apropiada mediante la prueba de bondad de Kolmogórov-Smirnov, abarcando un 36 % de las estaciones analizadas. Los métodos de mayoración utilizados, como Fuller, Tonini (1969) y Tucci, se destacan por ser más conservadores al amplificar los caudales no instantáneos para periodos de retorno de 10, 50, 100 y 200 años. La investigación contribuye a la identificación de métodos adecuados para la estimación de caudales extremos no instantáneos para la zona de estudio en la zona nororiental de la región andina, de esta forma, se establece una metodología que permite estimar caudales extremos con una correlación alta entre los valores estimados y los valores observados de campo, esto representa un avance en el estudio y análisis hidrológico de la región.

Se enfatiza la necesidad de calibración y expansión de estaciones limnigráficas en la región para una mejor estimación de los caudales extremos. Así mismo, es necesario implementar una validación y calibración de estaciones limnimétricas en función al coeficiente de escorrentía, con lo cual se abarque mayor cantidad de variables de calibración y se obtenga una mayor precisión del modelo.

#### Financiación

No aplica.

#### Contribución de los autores

Y. Vargas-Peñaranda: Recolección y análisis de datos, redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición, Redacción – documento final. N. Cely-Calixto: Metodología, Investigación, Administración del proyecto, Supervisión, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición, Redacción – documento final. G. Carrillo-Soto: Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Redacción – borrador original.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

#### Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

#### Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

#### Declaración de consentimiento informado

No aplica.

#### Referencias

- [1] IDEAM, “Operación Estadística Monitoreo de la Superficie de Bosque Natural en Colombia,” Bogotá, Jun. 2019.
- [2] K. Sedano-Cruz, Y. Carvajal-Escobar, and J. Á. Díaz, “análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia,” *Luna Azul*, vol. 37, no. 1909–2474, pp. 219–238, 2013.
- [3] G. Narváez, G. León, “Caracterización y zonificación climática de la región andina,” *Meteorol. Colomb*, vol. 4, pp. 121–126, 2001.
- [4] CORPONOR, “Línea base cargas contaminantes de vertimientos en los 40 municipios jurisdicción de Norte de Santander,” San José de Cúcuta, 2019.
- [5] Á. Gutiérrez, Y. Zambrano, and L. Ospina, “Propuesta metodológica de priorización de áreas para conservación de cuencas. Validación en río Caquinal, Fómeque, Cundinamarca, Colombia,” *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, vol. 6, no. 2145–6097, pp. 199–214, 2015.

- [6] W. Méndez, J. Córdova, L. Bravo, “Predictive models of instantaneous maximum discharges for catchments of mountainous environments, supported by morphometric parameters,” *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, vol. 38, no. 0254–0770, pp. 229–238, 2015.
- [7] H. Y. Chona-Jurado, N. J. Cely-Calixto, G. A. Carrillo-Soto, “Comparación obras de reducción del riesgo sobre áreas de amenaza alta por inundación sobre un sector de la Quebrada Tonchala en San José de Cúcuta,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 22, no. 3, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023012>
- [8] G. Duque-Escobar, “Amenazas Naturales en los Andes de Colombia,” Cátedra Pedro Nel Gómez, 2007.
- [9] B. Lux, “Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas,” Guatemala, 2016.
- [10] N. J. Cely-Calixto, G. A. Carrillo-Soto, C. A. Bonilla-Granados, *Fundamentos de Hidrología*. Bogotá, 2022.
- [11] F. Aparicio, *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa, 2015.
- [12] V. W. Berger, Y. Zhou, *Wiley StatsRef: Statistics Reference*. 2014, doi: <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat06558>
- [13] P. M. Acosta, L. X. Sierra, “Evaluación de métodos de construcción de curvas IDF a partir de distribuciones de probabilidad y parámetros de ajuste,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 22, no. 35, pp. 25–33, 2013.
- [14] S. Beguería, “Revisión de métodos paramétricos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en Climatología e Hidrología: El uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales,” Reunión Nacional de Climatología, Universidad de Zaragoza, 2002.
- [15] J. Montes, M. Álvarez, L. Pertierra, J. Moralo, J. Baztán, “Análisis regional de frecuencia de avenidas en la vertiente cantábrica y noratlántica de España,” *Ingeniería del agua*, vol. 22, no. 2, p. 93, 2018, doi: <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8782>
- [16] D. Tonini, *Elementi di idrografia ed idrologia*. Libreria universitaria, 1959.
- [17] F. Cotecchia, “Rapporto tra la portata massima giornaliera e quella al colmo nelle piene dei corsi d'acqua italiani”, *L'Energia Elettrica*, 1965.
- [18] C. E. Tucci, *Hidrología 4 Ciénciae aplicaçao*. 1993.
- [19] S. Belmonte, E. D. L. M. López, M. D. L. Á. García, “Identification of priority areas for water management in the Chaco salteño, Argentina,” *Água y Territorio*, no. 17, pp. 7–32, 2021, doi: <https://doi.org/10.17561/at.17.4868>
- [20] N. J. García, N. F. Salinas, L. C. Blandón Chavarría, “Parámetros morfométricos de la unidad hidrológica 69-95259905 Masaya, Nicaragua; como primera etapa en la caracterización hidrológica,” *Revista Científica de FAREM-Estelí*, no. 38, pp. 230–244, 2021, doi: <https://doi.org/10.5377/farem.v0i38.11954>
- [21] Y. Montoya, B. Montoya, “Caracterización morfométrica de la microcuenca de la quebrada los andes, el Carmen de Viboral, Antioquia-Colombia,” *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 8, no. 15, pp. 11–29, 2009.
- [22] J. D. Gamba, J. G. González, “Curvas de rendimiento de caudales máximos instantáneos asociados a diferentes periodos de retorno en Colombia, caso de estudio río Magdalena,” Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Bolívar, 2015.
- [23] F. Rodríguez-Corso, “Dynamic simulation of flooding in a critical state of maximum runoff, under five return periods, in La Virgen stream in the San Jose de Miranda Municipality-Santander,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 17, no. 1, pp. 251–270, 2018.
- [24] D. M. Rey Valencia, J. Zambrano, “Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 17, no. 1, pp. 115–126, 2018, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018011>