

## Análisis espacial y temporal de la precipitación en la Orinoquía Colombiana (1981–2024) a partir de imágenes satelitales CHIRPS

Spatial and Temporal Analysis of Precipitation in the Colombian Orinoquía (1981–2024) Using CHIRPS Satellite Images

  Oscar Iván Vargas-Pineda<sup>1,2</sup>;  Daniel Santiago Castañeda-Rodríguez<sup>2</sup>;  Irene Blanco-Gutiérrez<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad de los Llanos, Doctorado en Ciencias Agrarias, Villavicencio – Colombia

<sup>2</sup>Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Industrial, Villavicencio - Colombia

<sup>3</sup>Universidad Politécnica de Madrid, CEIGRAM, Madrid - España

Correspondencia: [oscarvargasp@unillanos.edu.co](mailto:oscarvargasp@unillanos.edu.co)

**Recibido:** 4 Noviembre 2024

**Aceptado:** 29 Agosto 2025

**Disponible:** 8 Octubre 2025

### Cómo citar / How to cite

O. I. Vargas-Pineda, D. S. Castañeda-Rodríguez, and I. Blanco-Gutiérrez, "Análisis espacial y temporal de la precipitación en la Orinoquía Colombiana (1981–2024) a partir de imágenes satelitales CHIRPS," *Tecnológicas*, vol. 28, no. 64, e3305, 2025. <https://doi.org/10.22430/22565337.3305>



### Resumen

La gestión de recursos hídricos en la Orinoquía colombiana, región estratégica para el desarrollo agrícola del país, es limitada por la escasez de registros pluviométricos, lo que genera incertidumbre en la planificación. Para abordar esta limitación, el objetivo de esta investigación fue realizar una validación espacial y temporal de los datos de precipitación del producto satelital Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) para el periodo 1981-2024 en la región de la Orinoquía, con el fin de evaluar su utilidad como fuente alternativa de información climática. La metodología empleada consistió en la comparación de las series temporales de CHIRPS con los registros históricos de 226 estaciones pluviométricas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. La validación se fundamentó en un análisis estadístico comparativo, utilizando métricas de desempeño como coeficientes de correlación (R), coeficiente de determinación ( $R^2$ ), sesgo (BIAS), error cuadrático medio (RMSE) y desviación media absoluta (MAD). Los resultados indicaron correspondencia notable entre ambas fuentes de datos. El 56.18 % de los datos están fuertemente relacionados, mientras que el 49.44 % de los datos explicaron adecuadamente la variabilidad de la precipitación, con valores de  $R^2$  que oscilaron entre 0.74 y 0.90. Las métricas de error, aunque mayoritariamente aceptables, revelaron una tendencia a la subestimación por parte del producto satelital, la cual fue particularmente significativa durante los meses de mayor pluviosidad, como julio y octubre. Finalmente, se concluye que los datos de precipitación de CHIRPS constituyen una fuente de información válida y robusta para complementar la red de monitoreo terrestre en la Orinoquía. A pesar de las subestimaciones estacionales identificadas, que deben ser consideradas en estudios específicos, su desempeño general respalda su aplicación directa en la modelación hidrológica y la planificación agrícola, como una herramienta crucial para avanzar hacia una gestión de recursos más eficiente y sostenible en la región.

### Palabras clave

Precipitación, teledetección, análisis de series temporales, recursos hídricos, agricultura.

## Abstract

The management of water resources in the Colombian Orinoquía region, a strategic region for the country's agricultural development, is limited by the scarcity of rainfall records, which generates uncertainty in planning. To address this limitation, the objective of this research was to perform a spatial and temporal validation of precipitation data from the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS) satellite product for the period 1981–2024 in the Orinoquía region, in order to evaluate its usefulness as an alternative source of climate information. The methodology employed consisted of comparing the CHIRPS time series with historical records from 226 rainfall stations of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM). The validation was based on a comparative statistical analysis, using performance metrics such as correlation coefficients (R), coefficient of determination ( $R^2$ ), bias (BIAS), root mean square error (RMSE), and mean absolute deviation (MAD). The results indicate a remarkable correspondence between both data sources. A total of 56.18% of the data are strongly correlated, while 49.44% adequately explained precipitation variability, with  $R^2$  values ranging from 0.74 to 0.90. The error metrics, although mostly acceptable, revealed a tendency toward underestimation by the satellite product, which was particularly significant during the rainiest months, such as July and October. Finally, it is concluded that the CHIRPS precipitation data constitute a valid and robust source of information to complement the terrestrial monitoring network in the Orinoquía. Despite the seasonal underestimations identified, which should be considered in specific studies, its overall performance supports its direct application in hydrological modeling and agricultural planning, as a crucial tool for moving toward more efficient and sustainable resource management in the region.

## Keywords

Precipitation, remote sensing, time series analysis, water resources, agriculture.

## 1. INTRODUCCIÓN

La cuenca de la Orinoquía colombiana constituye una región de elevada relevancia geoestratégica para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de Colombia. Dicha región se distingue por albergar una notable biodiversidad y, de forma simultánea, por poseer una considerable aptitud para la expansión de la frontera agrícola. Su contribución actual se materializa en la producción de materias primas de alto valor económico, lo que la posiciona como un pilar del sector agrícola nacional [1]. En esta extensa área, la agricultura se erige como una de las actividades económicas predominantes, aun cuando enfrenta limitaciones edáficas, principalmente asociadas a la baja concentración de materia orgánica en sus suelos. La producción de cultivos de importancia estratégica, tales como plátano, palma de aceite, yuca y arroz (tanto en sistemas de regadía como de secano), es significativa no solo por su impacto a escala regional, sino también por su trascendencia en el ámbito nacional. Hacia el año 2019, la Orinoquía había destinado 565,000 hectáreas a estos cultivos, y se proyecta que su potencial productivo es sustancialmente mayor, lo cual podría catalizar un crecimiento económico significativo para el país y mejorar la seguridad alimentaria, bajo la condición de que se implementen políticas de gestión territorial y de recursos que sean adecuadas [2]-[4].

El aprovechamiento sostenible de dicho potencial está supeditado a una comprensión rigurosa de la dinámica del ciclo hidrológico regional, particularmente en el contexto de la variabilidad y el cambio climático. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) es la entidad rectora en esta materia, operando una red de estaciones que registran sistemáticamente variables ambientales, incluyendo precipitación, humedad y temperatura. Esta información es un insumo indispensable para la gestión de recursos hídricos, la planificación agrícola y la interpretación de los patrones climáticos locales [5]. La infraestructura de monitoreo del IDEAM, que comprende estaciones hidrológicas y radares hidrometeorológicos, garantiza la obtención de datos de alta calidad, los cuales son fundamentales para el desarrollo de sistemas de alerta temprana y la mitigación de riesgos vinculados a fenómenos hidrometeorológicos extremos [6]. De forma complementaria, se han investigado técnicas de inteligencia artificial para la imputación de datos históricos ausentes, las cuales han demostrado ser una alternativa robusta para la predicción de patrones de precipitación [7].

La variabilidad intrínseca de los registros pluviométricos es exacerbada por forzantes de escala global, entre los cuales el cambio climático se manifiesta como un agente de alteración

primordial. Se proyecta que este fenómeno ejercerá un impacto sustancial sobre la producción agrícola del país; Los escenarios climáticos para el año 2100 sugieren que ciertos sectores de la Orinoquía podrían experimentar incrementos térmicos de hasta 2.6 °C, mientras que otros podrían afrontar una disminución de las precipitaciones de hasta un 30 %. Tales alteraciones intensifican el riesgo de sequías, la pérdida de cosechas y la reducción de la disponibilidad hídrica [8]. La comunidad científica ha empleado los datos del IDEAM para cuantificar estas tendencias y generar proyecciones climáticas a escala local, como ha sido documentado en estudios para otras regiones de Colombia [9].

No obstante, la dependencia exclusiva de mediciones *in situ*, si bien proporciona datos de alta fidelidad, está sujeta a limitaciones importantes. En regiones de gran extensión y difícil acceso como la Orinoquía, lograr una cobertura espacial con una densidad de muestreo adecuada supone importantes desafíos logísticos y económico, lo que restringe la capacidad para caracterizar con precisión la variabilidad espaciotemporal de la precipitación. Para superar esta barrera, se han desarrollado productos de precipitación estimados por satélite, entre los que destaca el *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data* (CHIRPS). Este proyecto genera mapas de precipitación con una resolución de 0.05° (aproximadamente 5.5 km en la línea ecuatorial, sobre el datum WGS84), proveyendo una cobertura espacial continua que las redes terrestres no pueden igualar [10], [11].

La literatura científica internacional ha validado extensamente el producto CHIRPS, revelando un desempeño que, si bien es generalmente robusto, varía significativamente en función de las condiciones climáticas y topográficas locales. A nivel global, se ha demostrado su idoneidad para la modelización hidrológica en cuencas de África [12] y para el monitoreo de sequías con alta efectividad en regiones semiáridas como Marruecos [13]. Sin embargo, se han identificado patrones de sesgo sistemáticos en CHIRPS, que tienden a sobrestimar las precipitaciones de baja intensidad y a subestimar los eventos de alta intensidad [14]. Esta limitación ha sido observada en distintas regiones, tanto en Asia [15] como en Sudamérica, donde se ha reportado en los llanos venezolanos [16] y en la cuenca del Mearim en Brasil [17]. Adicionalmente, su precisión puede verse afectada por la topografía; mientras algunos estudios reportan una disminución en el desempeño de CHIRPS en elevaciones superiores a los 3000 m [18], otros realizados en el suroeste de Colombia han encontrado un mejor rendimiento en áreas de mayor altitud en comparación con las zonas costeras [19]. Esta heterogeneidad también se ha observado en otras cuencas andinas como la del Katari en Bolivia, donde se han registrado sobreestimaciones de hasta un 20 % [20]. En el contexto colombiano más directo, un estudio en la cuenca del río Chicamocha [21] corroboró el buen desempeño de CHIRPS para captar los patrones estacionales de precipitación, pero reforzó la necesidad de realizar validaciones locales. La variabilidad en los resultados obtenidos en diferentes regiones subraya la importancia de llevar a cabo una evaluación específica para la cuenca de la Orinoquía, cuyas características fisiográficas y climáticas difieren notablemente de las de otras zonas previamente estudiadas.

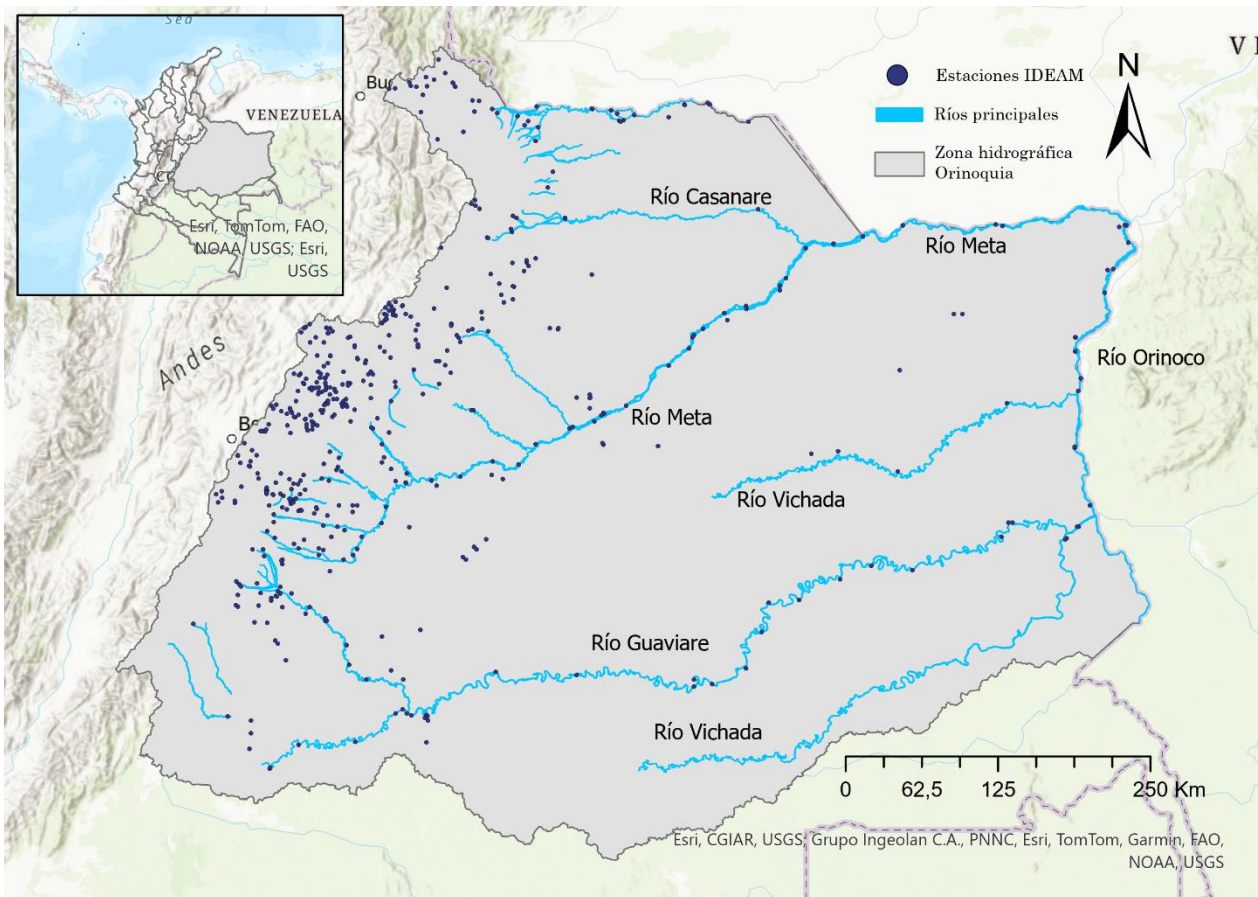
A pesar de la relevancia estratégica de la Orinoquía y la probada variabilidad regional en el desempeño de CHIRPS, existe una notable ausencia de estudios de validación exhaustivos y sistemáticos que abarquen la totalidad de esta cuenca en el contexto colombiano. Este vacío de conocimiento constituye una barrera para la adopción de tecnologías de teledetección que podrían mejorar significativamente la planificación agrícola. En este marco, el objetivo de esta investigación fue evaluar el desempeño del producto de precipitación satelital CHIRPS, tanto a escala espacial como temporal, mediante su comparación con los registros de la red de estaciones pluviométricas del IDEAM en la cuenca hidrográfica de la Orinoquía durante el periodo 1981-2024. El presente estudio busca cuantificar la fiabilidad y los sesgos del producto con el fin de establecerlo como una alternativa viable y robusta para complementar los datos *in situ*, y mejorar la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos y la planificación agrícola sostenible en la región.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1 Área de estudio

La presente investigación se centra en la cuenca colombiana del río Orinoco, comúnmente denominada la región de la Orinoquía. Esta macrocuenca abarca aproximadamente 348,000 km<sup>2</sup> (Figura 1), lo que corresponde al 35 % del área total de la cuenca del Orinoco, la cual es compartida con Venezuela [4]. La región es de vital importancia para los recursos hídricos y la producción agrícola de Colombia, y sus dinámicas hidrológicas son alimentadas principalmente por los aportes de la Cordillera Oriental de los Andes y el Escudo Guayanés.

Climáticamente, la Orinoquía colombiana se caracteriza por un régimen tropical con una marcada estacionalidad, definida en gran medida por el desplazamiento latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Este fenómeno genera un patrón de precipitación predominantemente monomodal, con una temporada de lluvias concentrada entre abril y noviembre y una temporada seca de diciembre a marzo.



**Figura 1.** Área de estudio y distribución espacial de estaciones del Ideam en la cuenca de la Orinoquía. Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, el comportamiento espacial de la precipitación es notablemente heterogéneo, influenciado por una compleja interacción de factores locales y de macroescala. En primer lugar, el relieve juega un papel fundamental; en la zona de piedemonte llanero, la interacción de los vientos húmedos con la Cordillera Oriental genera los mayores acumulados de precipitación, creando un gradiente que disminuye progresivamente hacia las sabanas y llanuras orientales.

La variabilidad interanual está fuertemente modulada por fenómenos de teleconexión. El principal modulador es El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), aunque su impacto presenta una clara diferenciación espacial. La influencia del ENOS es más pronunciada en la porción occidental de la cuenca, donde la fase cálida (El Niño) se asocia con importantes déficits de lluvia. En contraste, su señal es más débil o inconsistente en las llanuras orientales, donde la dinámica de las cuencas del Atlántico y el Amazonas cobra mayor relevancia [22], [23]. Adicionalmente, la variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en el Océano Atlántico Tropical también juega un rol en la modulación de las precipitaciones, afectando el transporte de humedad hacia la cuenca. Las fuentes de humedad para la región provienen tanto del Océano Atlántico, transportada por los vientos alisios, como de un importante componente de reciclaje de humedad terrestre desde la cuenca del Amazonas y la propia Orinoquía [24].

Dada esta complejidad climática y la heterogeneidad espacial de la precipitación, la validación de fuentes de datos alternativas como las estimaciones del satélite CHIRPS es fundamental para una adecuada caracterización y monitoreo hidrológico. Este estudio se enfoca precisamente en analizar la relación y validación de los datos de precipitación de CHIRPS frente a los registros de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en la jurisdicción colombiana de la cuenca del río Orinoco.

## **2.2 Recopilación y procesamiento de datos**

### **2.2.1 Datos observados de estaciones IDEAM**

Se descargaron las series de precipitación diaria para el periodo comprendido entre enero de 1981 y diciembre de 2024 desde la base de datos nacional del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Inicialmente, se identificó un conjunto de 334 estaciones pluviométricas ubicadas dentro de los límites de la cuenca colombiana del río Orinoco.

Posteriormente, se realizó un riguroso proceso de control de calidad y depuración para asegurar la robustez de los datos base. Este proceso es un paso metodológico fundamental para minimizar errores que puedan afectar los resultados de la validación [25]. Se aplicó un criterio de selección, descartando todas aquellas estaciones que no contaran con un mínimo del 40 % de datos registrados a escala mensual para el periodo de análisis de 44 años. Este filtro busca garantizar la continuidad y representatividad temporal de las series, resultando en la exclusión de 108 estaciones. El banco de datos final quedó consolidado por 226 estaciones, cuyas series diarias fueron agregadas a una escala de tiempo mensual.

Es importante aclarar que, para el análisis comparativo, los meses con datos faltantes en los registros del IDEAM no fueron rellenados. En su lugar, dichos meses fueron excluidos del análisis pareado con los datos de CHIRPS en cada estación correspondiente. De este modo, la validación se realizó únicamente sobre los datos de precipitación efectivamente observados, evitando la introducción de datos sintéticos que pudieran sesgar los resultados.

### **2.2.2 Datos satelitales (CHIRPS)**

Para el estudio, se realizó la descarga de la base de datos CHIRPS V2.0, plataforma desarrollada por científicos de la USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) y CHC Climate Hazards Center, de la precipitación dada en escala mensual desde enero de 1981 a diciembre de 2024 compuesta por 528 imágenes satelitales con una resolución de 0.05° [11]. Posteriormente, se llevó a cabo la delimitación de las imágenes satelitales de precipitación histórica para nuestra área de estudio, la cuenca de la Orinoquia, mediante la herramienta de ArcGIS.

Para la estimación de la precipitación desde sensores remotos, se utilizó el producto CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) Versión 2.0. Se descargaron las imágenes mensuales para el mismo periodo (enero 1981 - diciembre 2024), resultando en una serie temporal de 528 imágenes. Este producto combina datos de satélites infrarrojos con datos de estaciones in-situ para generar una cuadrícula de precipitación con una alta resolución espacial de  $0.05^\circ$  ( $\sim 5.5$  km) [26]. Las imágenes globales fueron recortadas utilizando la capa vectorial de la cuenca de la Orinoquía en Colombia mediante herramientas del Python.

### 2.2.3 Integración de datos punto-píxel

La comparación directa entre los datos observados en las estaciones (puntos) y los datos satelitales (cuadrícula) requirió un proceso de integración. Para cada una de las 226 estaciones, se extrajo la serie temporal de precipitación mensual del píxel de CHIRPS que contenía las coordenadas geográficas exactas de la estación. Este procedimiento generó 226 pares de series temporales (IDEAM vs. CHIRPS), que constituyen la base para la validación estadística en cada ubicación.

## 2.3 Métricas de validación estadística

Para cuantificar el grado de acuerdo y la magnitud del error entre las series de precipitación observadas por el IDEAM (consideradas como el valor de referencia) y las estimadas por CHIRPS, se empleó un conjunto de métricas estadísticas estándar en estudios de validación de variables agroclimáticas e hidrológicas [27].

### 2.3.1 Correlación de Spearman

Se planteó el análisis de correlación de Spearman dada por (1), puesto que es indispensable conocer qué tan relacionados se encuentran los conjuntos de datos de precipitación, por lo que debemos hacer uso de una medida no paramétrica en la que se comparen los datos sin asumir la existencia de una normalidad en los datos [28].

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum D^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

Siendo

$r_s$  = Coeficiente de correlación de Spearman

$D$  = Diferencia entre los rangos de las observaciones de la variable de precipitación CHIRPS con respecto a la variable de precipitaciones de estaciones IDEAM

$n$  = Número de observaciones

El resultado obtenido para cada estación determinará qué tan relacionada está la información, teniendo en cuenta que los datos del IDEAM será considerados los “reales” y se buscará la validación con respecto a los datos CHIRPS. Este mismo se dará en un intervalo entre  $[-1,1]$  para cada uno de los puntos evaluados. Si el valor  $r_s$ , toma el valor de 1, será una correlación perfecta y si toma valores cercanos a este podremos afirmar que son dos variables correlacionadas. Si por el contrario tiende a un valor por debajo de 0 significaría que existiría una correlación negativa y, finalmente, si toma el valor de 0, significa que no existe una relación entre las variables.

### 2.3.2 Coeficiente de determinación ( $R^2$ )

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se calculó a través de (2), este coeficiente no es un modelo en sí mismo, sino una medida de la bondad de ajuste que indica la proporción de la varianza de los datos observados que establece la relación entre la variación de los datos de precipitación CHIRPS, considerados como la variable dependiente, en relación con la variable independiente representada por los datos del IDEAM. La obtención de un valor final en un rango de 0 a 1 es fundamental, ya que cuanto más se acerque a 1, mejor se explicará el modelo de nuestra variable dependiente y señalará la existencia de predicciones precisas por parte de CHIRPS.

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$\sigma_r^2$  = Varianza residual

$\sigma^2$  = Varianza de la variable dependiente

$y_i$  = Valor observado de precipitación

$\hat{y}$  = Valor de precipitación predicho por el modelo

$\bar{y}$  = Promedio de los valores de precipitación observados

$n$  = Cantidad de datos a evaluar

### 2.3.3 Bias

Para comparar los datos se analizaron métricas estadísticas de error. La herramienta Bias, dada en (3), es una métrica estadística de validación [29] cuya función radica en comparar los datos CHIRPS con los del IDEAM, tomando como referencia estándar este último. El objetivo es determinar si el instrumento CHIRPS produce mediciones desviadas de manera sistemática en una situación meteorológica dada.

$$Bias = \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - P_o)}{N} \quad (3)$$

$P_i$  = Precipitación mensual por imagen satelital CHIRPS

$P_o$  = Precipitaciones observadas

$N$  = Número total de observaciones

### 2.3.4 Error cuadrático relativo (RMSE)

Se considero el análisis del error cuadrático medio relativo (RMSE), según (4). Esta métrica posibilita la comparación entre los dos conjuntos de datos y extraer su error relativo partiendo de la regresión lineal de los datos [30].

$$RMSE = \left[ \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - P_o)^2}{N}}}{P_o} \right] * 100 \% \quad (4)$$

$P_i$  = Precipitación mensual por imagen satelital CHIRPS

$P_o$  = Precipitaciones observadas

$N$  = Número total de observaciones

### 2.3.5 Desviación media absoluta (MAD)

Otro parámetro incorporado fue la desviación media absoluta, dada en (5), que permite medir la dispersión entre los datos de precipitación observados mediante imágenes satelitales de CHIRPS comparándolos con un valor esperado real que haya sido captado por las estaciones del IDEAM [31].

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - \underline{P}|}{N} \quad (5)$$

$P_i$  = Precipitación mensual por imagen satelital CHIRPS

$\underline{P}$  = Promedio de datos de precipitaciones

$N$  = Número total de observaciones

### 2.3.6 Prueba U de Mann-Whitney

Para el análisis espacial entre la diferencia de los dos grupos de bases de datos de precipitación evaluados (CHIRPS e IDEAM) en una escala mensual se aplicó la prueba de U de Mann-Whitney, presentada en (6). Para determinar la significancia estadística de esta relación entre cada una de las 226 estaciones hidrometeorológicas pertenecientes a nuestra área de estudio, la cuenca del Orinoco, se evaluó la variabilidad mensual entre los meses de enero hasta diciembre mediante el cálculo del p valor.

Para los meses en los que el p valor arrojó un valor mayor a 0.05, se consideraron periodos de tiempo en donde no hubo una diferencia estadísticamente significativa entre las estaciones según los datos de CHIRPS e IDEAM. Los meses donde el p valor es inferior a 0.05 se identificaron como periodos en los que hay diferencias significativas y los datos no podrían validarse.

$$U = n_1 * n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - \sum_{i=n_2+1}^{n_2} R_1 \quad (6)$$

$U$  = Estadístico de prueba U de Mann-Whitney

$n_1$  = Tamaño de muestra del conjunto de datos de precipitación CHIRPS

$n_2$  = Tamaño de muestra del conjunto de datos de precipitación por estaciones IDEAM

$R_1$  = Suma de los rangos del conjunto de datos de precipitación CHIRPS

### 2.3.7 Análisis de la influencia de la altitud

Para evaluar si el desempeño del producto CHIRPS está condicionado por el relieve, se realizó un análisis de regresión lineal simple. Se investigó la relación entre la altitud de cada una de las 226 estaciones (variable independiente) y los valores obtenidos para el coeficiente de correlación de Spearman ( $\rho$ ) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) (variables dependientes). Este análisis busca determinar si existe una tendencia sistemática, positiva o negativa, en la capacidad del producto satelital para representar la precipitación observada a diferentes elevaciones, un factor crítico en regiones con gradientes topográficos como el piedemonte de la Orinoquía.

## 2.4 Análisis de datos

Los datos disponibles de las dos fuentes de datos, el procesamiento, cálculo de métricas, análisis estadístico y visualización gráfica de los datos, se realizó a través del lenguaje de

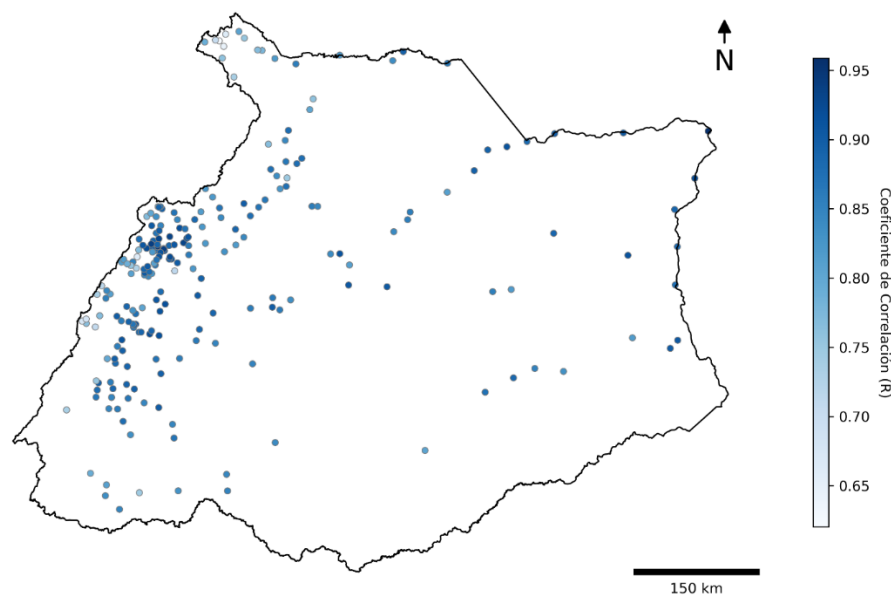
programación Python 3.12 en el entorno de Jupyter Notebook utilizando bibliotecas como Pandas, NumPy y SciPy. Para asegurar la replicabilidad, el proyecto está disponible en un repositorio de [GITHUB](#), dispuesto para su consulta. Los resultados obtenidos se consolidaron en archivos de Excel.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan y discuten de manera integrada los resultados de la validación estadística del producto de precipitación satelital CHIRPS frente a los datos de 226 estaciones del IDEAM en la cuenca colombiana del Orinoco. Cada hallazgo se interpreta en el contexto del territorio y se contrasta con la literatura científica pertinente. Al final, se consolidan las conclusiones generales sobre el valor del estudio, sus implicaciones prácticas y sus limitaciones.

#### 3.1 Correlación y bondad de ajuste

El análisis de la distribución de las estaciones (Figura 2) revela una alta concentración en la zona noroccidental de la cuenca (piedemonte llanero), evidenciando una baja densidad de monitoreo en extensas áreas de las llanuras orientales como Vichada y Guainía.



**Figura 2.** Nivel de correlación con imágenes satelitales IDEAM vs CHIRPS. Fuente: elaboración propia.

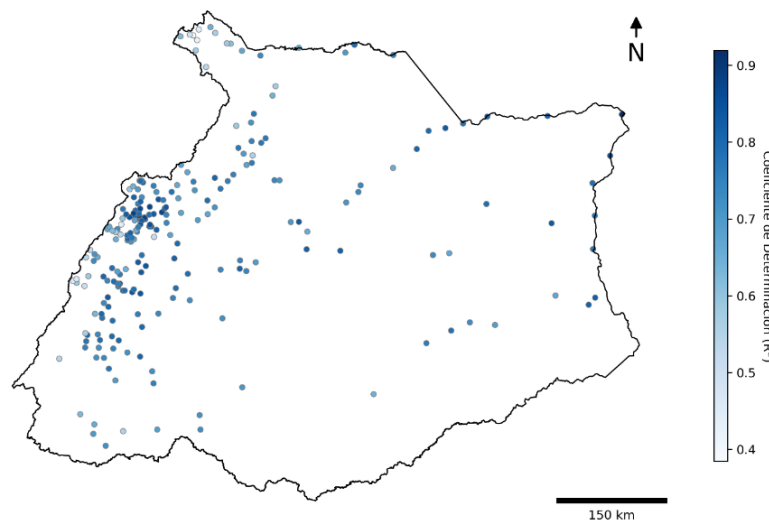
Los resultados del coeficiente de correlación de Spearman (Tabla 1) indican una asociación monotónica positiva y fuerte, con un 85.4 % de las estaciones (193) presentando una correlación en el rango más alto ( $\rho > 0.8$ ). Este hallazgo es de notable significancia, pues sugiere que CHIRPS captura adecuadamente la variabilidad temporal de la precipitación mensual en la mayor parte de la región. Este alto rendimiento concuerda con la literatura global, que posiciona a CHIRPS como un producto robusto a escala mensual en regiones tropicales, superando a menudo a otros productos satelitales en entornos con escasez de datos. La arquitectura misma de CHIRPS, que incorpora datos de estaciones en su algoritmo de generación, contribuye intrínsecamente a esta alta correlación, al beneficiarse de observaciones directas para su calibración [32], [33].

**Tabla 1.** Puntos de estudio agrupados según nivel de correlación. Fuente: elaboración propia.

Correlación	# Estaciones	Porcentaje
0	0	0.0
0.1 a 0.3	0	0.0
0.3 a 0.5	0	0.0
0.5 a 0.8	33	14.6
0.8 a 1	193	85.4
Total	226	100.0

Asimismo, estos resultados demuestran que en regiones de baja disponibilidad de datos como en África se alcanzas correlación del 87 % con el producto CHIRPS detectando predicciones menos precisas en las zonas costeras y montañosas [33]. Se señala entonces que las características topográficas de la cuenca de la Orinoquia podrían desempeñarse mejor en cuanto a la precisión en la estimación de datos. Por otra parte, en regiones de Brasil las imágenes satelitales arrojaron un 94 % para este coeficiente [34].

De manera similar, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) (Figura 3 y Tabla 2) muestra que para una abrumadora mayoría de las estaciones (96.9 %), CHIRPS explica más del 50 % de la varianza de los datos observados ( $R^2 > 0.5$ ). Específicamente, un 24.78 % de las estaciones (56) alcanzan un  $R^2$  superior a 0.8. Esta menor capacidad predictiva en comparación con la correlación de Spearman es un indicador de que, si bien CHIRPS reproduce adecuadamente el ciclo estacional de meses secos y húmedos, la magnitud de la precipitación no siempre es bien representada, lo que apunta a la influencia de factores locales no capturados por el satélite. Se postula que las estaciones con menor  $R^2$  se concentran en zonas de alta complejidad topográfica, donde la variabilidad espacial de la lluvia a escala sub-píxel es mayor.



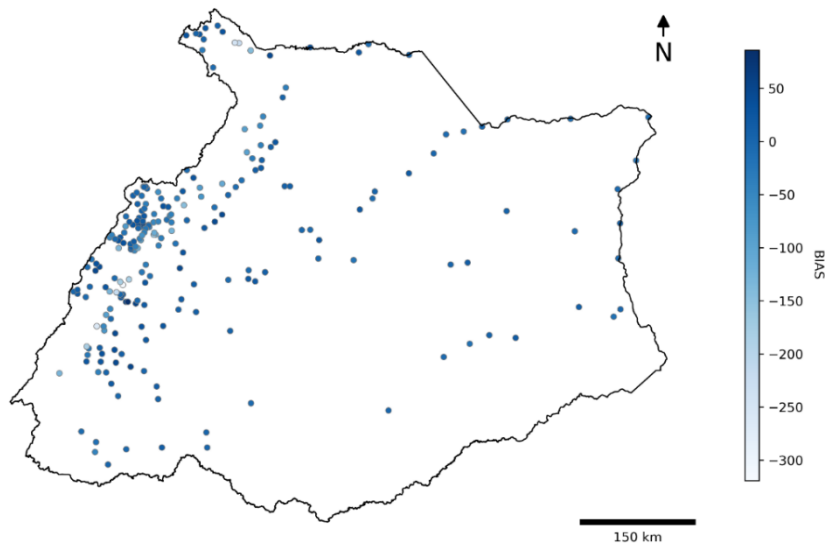
**Figura 3.** Nivel de coeficiente de determinación estaciones IDEAM vs CHIRPS. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2.** Puntos de estudio agrupados según coeficiente de determinación. Fuente: elaboración propia.

Rango de R2	# Estaciones	Porcentaje
0.1 - 0.3	0	0.00
0.3 - 0.5	7	3.10
0.5 - 0.8	163	72.12
0.8 - 1.0	56	24.78
Total	226	100.00

### 3.2 Magnitud y naturaleza de los errores

El análisis del sesgo (Bias) (Figura 4 y Tabla 3) revela que la mayoría de las estaciones (70.35%) se encuentran en un rango de Bias entre -15.2 y 86.0 mm/mes, lo que indica una tendencia general del producto a la sobreestimación. Por otro lado, un 29.65% de las estaciones presentan una subestimación, con valores extremos que alcanzan los -319.6 mm/mes. Esta dualidad en el comportamiento del error es consistente con la literatura, que ha documentado que CHIRPS puede sobreestimar lluvias leves y subestimar eventos de precipitación intensa. La fuerte subestimación probablemente se deba a la incapacidad del satélite para capturar correctamente los eventos de lluvia convectiva extrema, de corta duración y alta intensidad, comunes en el piedemonte. Por el contrario, la sobreestimación puede estar ligada a la dificultad de los sensores infrarrojos para distinguir entre nubes de alto desarrollo vertical que sí generan lluvia y nubes altas y frías (como los cirros) que no la producen, un fenómeno conocido como "contaminación por nubes frías" [35], [36].



**Figura 4.** Mapa de métrica de error Bias de datos pluviométricos IDEAM vs CHIRPS. Fuente: elaboración propia.

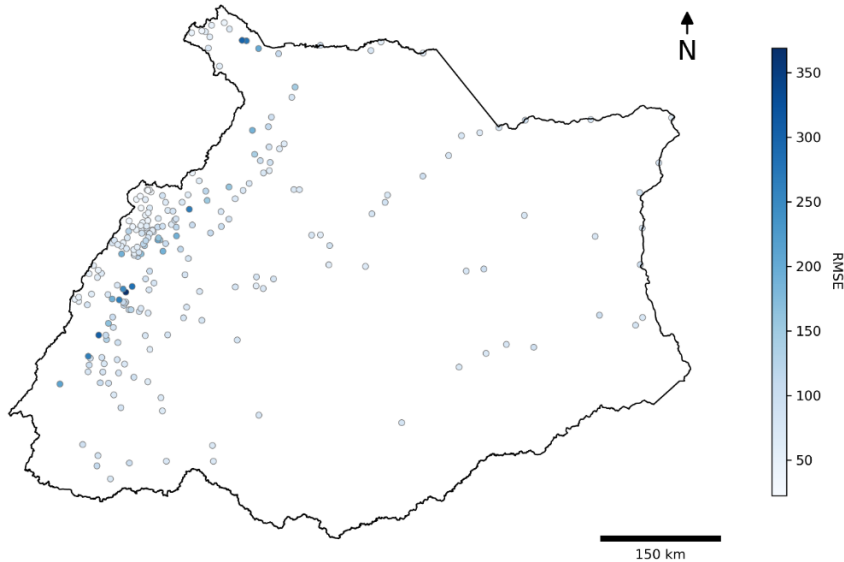
**Tabla 3.** Puntos de estudio agrupados por rangos de Bias. Fuente: elaboración propia.

Rango Bias	# Estaciones	Porcentaje
-319.6, -217.8	5	2.21
-217.8, -116.5	11	4.87
-116.5, -15.2	51	22.57
-15.2, 86.0	159	70.35
Total	226	100.00

Los resultados sugieren una posible relación con extremos de precipitación (lluvias intensas o escasas), lo cual es consistente con análisis realizados en el noreste de Brasil mediante imágenes satelitales [25]. En dichos estudios, se observó que las estimaciones tienden a subestimar las lluvias fuertes y sobreestimar las leves [34]. No obstante, un análisis de sesgo (Bias) en Etiopía determinó que el producto CHIRPS es una herramienta de alta precisión, con un Bias cercano a 1, superando incluso a las fuentes de datos locales [37].

Los resultados de RMSE (Figura 5 y Tabla 4) y MAD (Tabla 5) confirman que, aunque la correlación es alta, las desviaciones absolutas son considerables. Con una gran mayoría de las

estaciones (82.74 %) presentando un RMSE en el rango de 22.0 a 109.0 mm/mes, se evidencia que la magnitud del error, aunque contenida para la mayoría de los puntos, puede ser significativa para aplicaciones hidrológicas que dependen de volúmenes precisos de precipitación. Un error de esta magnitud puede tener un impacto considerable en los cálculos de balance hídrico, la estimación de la escorrentía y el diseño de obras hidráulicas, subrayando la necesidad de cautela al usar los datos sin una calibración previa.



**Figura 5.** Mapa de métrica de error RMSE de datos pluviométricos de IDEAM vs CHIRPS. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 4.** Puntos de estudio agrupados según nivel de RMSE. Fuente: elaboración propia.

RMSE	# Estaciones	Porcentaje
22.0, 109.0	187	82.74
109.0, 195.6	27	11.95
195.6, 282.2	8	3.54
282.2, 368.8	4	1.77
Total	226	100.00

**Tabla 5.** Puntos de estudio agrupados según nivel de MAD. Fuente: elaboración propia.

MAD	# Estaciones	Porcentaje
16.7, 92.6	199	88.05
92.6, 168.3	19	8.41
168.3, 243.9	5	2.21
243.9, 319.5	3	1.33
Total	226	100.00

Este margen de error, considerado bajo-moderado, podría proporcionar una explicación válida para la mayoría de las condiciones meteorológicas observadas a lo largo del tiempo. En el suroeste del país se determinó que la cantidad mínima de error cuadrático se dio en las áreas más lluviosas, con un máximo de 2 %, seguido de la zona montañosa de hasta un 12 % y por último de la zona costera con un error máximo de 20 % [33].

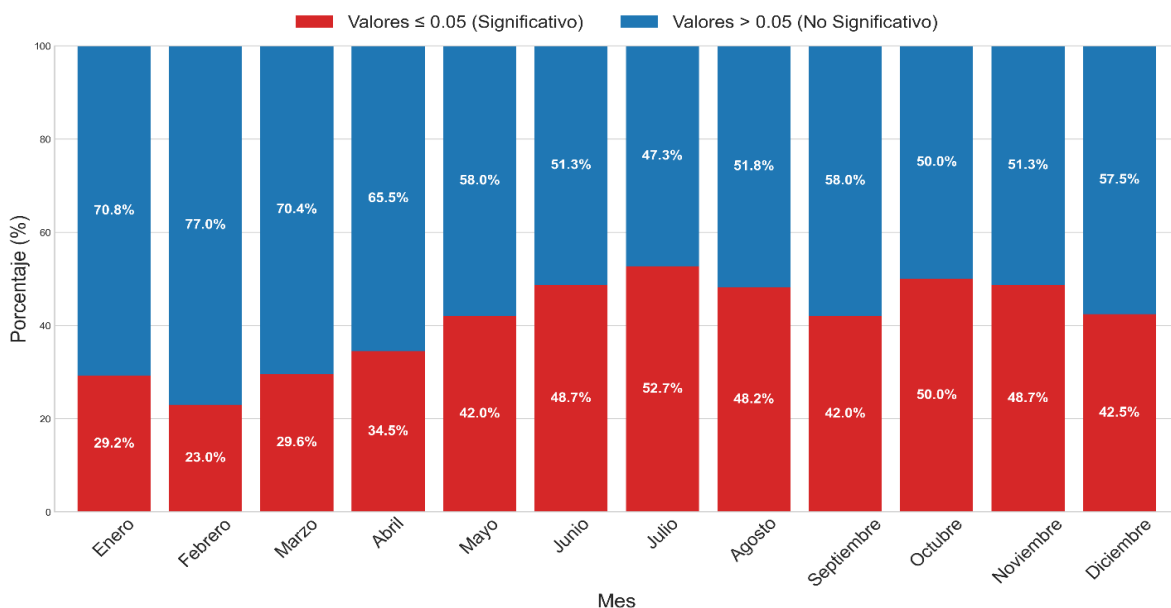
Para la técnica de medición de la desviación media absoluta (MAD) se aplicó la fórmula correspondiente a la comparación histórica de datos de precipitación en cada uno de los 226 puntos de interés. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Los resultados del análisis de medición de error MAD revelan que el 84.83 % de los puntos de estudio muestran una dispersión en el intervalo de 17.06 a 92.39. Esto indica que, en términos promedio, los errores de pronóstico asociados a estos puntos se sitúan dentro de este rango. El 9.55 % de los puntos de estudio presentan un MAD que oscila entre 92.39 y 167.72, lo que sugiere que los errores de pronóstico se califican como moderados. Por otro lado, el 3.93 % de los puntos de estudio registran un MAD en el intervalo de 167.72 a 243.05, lo cual apunta a errores de pronóstico considerablemente mayores, caracterizados por una dispersión elevada. Finalmente, el 1.69 % de los puntos de estudio arrojaron un MAD superior a 243.05, lo que indica que los errores de pronóstico son notables, aunque relativamente infrecuentes, sin que se desprenda una invalidación de los datos.

Un estudio realizado en Perú [38] determinó que existe un menor error en la estación de invierno, con un 10 % y que tiende a ser mayor en verano en la ubicación Andina Central, donde se encuentran valores por encima del 25 %.

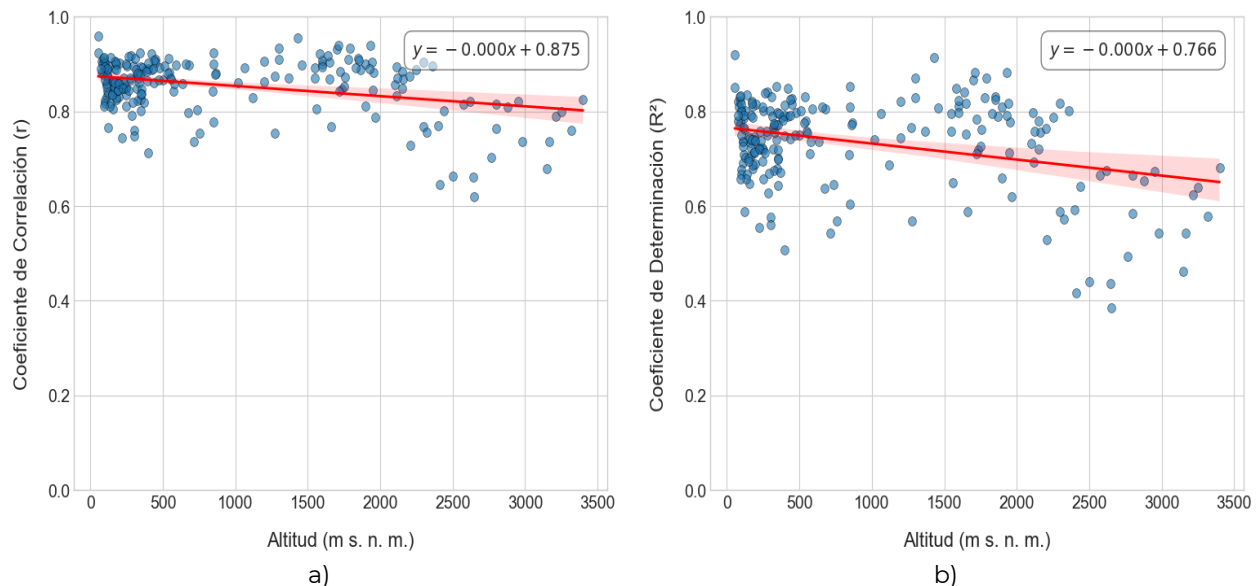
### 3.3 Desempeño estacional y dependencia de la altitud

La prueba U de Mann-Whitney (Figura 6 y Tabla 5) demuestra que el desempeño de CHIRPS tiene una clara dependencia estacional. Los meses de junio, julio, agosto, octubre y noviembre, que corresponden a la temporada de lluvias, presentan las mayores discrepancias, con casi la mitad o más de las estaciones mostrando diferencias estadísticamente significativas, alcanzando un pico en julio (52.7 %). Esto refuerza la idea de que la precisión de CHIRPS disminuye en condiciones de alta precipitación. En contraste, la alta concordancia durante la temporada seca (febrero, con solo 23 % de estaciones con diferencias significativas) sugiere que el producto es muy fiable para monitorear condiciones de estiaje. Esta estacionalidad en el error es crítica, ya que la degradación del desempeño del producto ocurre precisamente cuando los volúmenes de agua son mayores y más relevantes para la gestión del riesgo de inundaciones y la agricultura.



**Figura 6.** Gráfico de barras apiladas de la prueba t-student para el histórico de datos agrupados por meses. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, el análisis de la influencia de la altitud (Figuras 7a y 7b) revela una tendencia negativa, aunque débil, en el desempeño de CHIRPS a medida que aumenta la elevación. Este es un hallazgo crucial y consistente con investigaciones en los Andes colombianos, el Himalaya y Nepal. La topografía compleja del piedemonte introduce una mayor variabilidad espacial en la precipitación (lluvia orográfica) que los sensores satelitales con una resolución de ~5 km no logran capturar con precisión, lo que resulta en una menor correlación y una menor bondad de ajuste en las zonas más altas. Este resultado valida la hipótesis de que los efectos orográficos son una de las principales fuentes de incertidumbre para los productos de precipitación satelital en la región [38]-[41].



**Figura 7.** Gráficos de dispersión de métricas de coeficientes de correlación de Spearman y determinación respecto a la altitud. a) Relación entre altitud y correlación y b) Relación entre altitud y determinación ( $R^2$ ). Fuente: elaboración propia.

### 3.4 Valor agregado de la investigación

Este trabajo representa la primera validación exhaustiva y detallada del producto CHIRPS V2.0 en la cuenca de la Orinoquía colombiana utilizando un denso conjunto de estaciones en superficie. El valor agregado radica en la cuantificación precisa del desempeño de CHIRPS a escala local, identificando no solo la magnitud de los errores, sino también sus patrones espaciales (dependencia de la altitud) y temporales (variación estacional). Más allá de una simple validación, este estudio establece una línea base cuantitativa para la incertidumbre del producto (RMSE entre 22 y 109 mm/mes para la mayoría de las estaciones) que puede servir como referencia para futuros estudios de modelación hidrológica en la región. Estos hallazgos son fundamentales para la comunidad científica y los tomadores de decisiones de la región, pues establecen una base de confianza sobre cuándo y dónde este producto satelital puede ser utilizado con mayor seguridad.

### 3.5 Implicaciones prácticas

El buen desempeño general de CHIRPS a escala mensual lo convierte en una herramienta estratégica para la gestión de recursos hídricos y la planificación agrícola en la Orinoquía. En las vastas llanuras orientales (Vichada, Guainía), donde la red de estaciones es prácticamente inexistente, CHIRPS es la única fuente viable de información de precipitación con cobertura espacial completa. Sus datos pueden ser utilizados para; Modelación hidrológica en cuencas

no instrumentadas, monitoreo de la sequía a escala regional mediante índices como el SPI y la planificación de calendarios agrícolas y estimación de necesidades de riego. No obstante, los resultados implican que para aplicaciones que requieran alta precisión, especialmente en el piedemonte o durante la temporada de lluvias, es recomendable aplicar métodos de corrección de sesgo antes de su uso [42], [43]. Además, para aplicaciones críticas como el pronóstico de crecientes o el diseño de infraestructura hidráulica, el uso de datos CHIRPS sin una calibración y validación local exhaustiva no es aconsejable.

### 3.6 Limitaciones del estudio

La principal limitación de esta investigación es la distribución desigual de las estaciones de validación, que se concentran en la porción noroccidental de la cuenca. Esto significa que la validación es más robusta en la zona de piedemonte que en las llanuras orientales, donde la escasez de datos in situ impide una evaluación igualmente rigurosa. Otra limitación inherente es la comparación de datos puntuales (estaciones) con datos satelitales (píxeles de ~5 km<sup>2</sup>), lo que puede introducir incertidumbres, especialmente en áreas de alta variabilidad espacial de la lluvia. Este "error de representatividad" es un desafío conocido en la validación de satélites y puede ser particularmente pronunciado en esta región debido a la naturaleza convectiva de la precipitación. Futuras investigaciones podrían explorar el uso de datos de radar para una validación a mayor escala espacial.

## 4. CONCLUSIONES

La validación espacial y temporal de los datos de precipitación obtenidos a través de imágenes satelitales CHIRPS con los datos observados de estaciones meteorológicas del IDEAM en la cuenca hidrográfica de la Orinoquia Colombiana demuestra una alta correlación general. Esto subraya la confiabilidad de CHIRPS como herramienta para la estimación y análisis de precipitaciones en la región. A pesar de algunas discrepancias en puntos específicos y variaciones en meses puntuales como julio y octubre, los resultados muestran una sólida correlación del 56.18 % entre ambos conjuntos de datos, con un modelo de variación que explica positivamente el 49.44 % de los puntos de interés.

El análisis de error reveló que más del 40 % de los puntos presentan un sesgo bajo, mientras que un porcentaje menor exhibe sobreestimaciones moderadas y subestimaciones profundas. Los resultados del RMSE y MAD también respaldan la calidad de las predicciones en la mayoría de los puntos de interés, siendo adecuado el 30.89 % de los puntos con un error menor al 20 % en estimaciones de precipitación, y el 84.83 % con una desviación menor a 92.39 mm.

Estos hallazgos validan el uso de CHIRPS como una herramienta confiable para la planificación agrícola y la gestión hídrica en la región, donde la escasez de estaciones físicas limita la cobertura espacial de los datos pluviométricos. Además, subrayan la importancia de continuar explorando y perfeccionando el uso de tecnologías satelitales para mejorar la precisión de los pronósticos meteorológicos, lo que, a su vez, puede contribuir a la optimización de los recursos agrícolas y el cumplimiento de la demanda alimentaria en la Orinoquia Colombiana.

## 5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a la Universidad Santo Tomás seccional Villavicencio por el financiamiento en nómina y apoyo económico con el proyecto denominado "Diseño de Sistemas de monitoreo por medio de energías limpias y material reciclado para los cultivos de Cacao y maracuyá de la región del Ariari en el departamento del Meta" aprobado

en la convocatoria “MISIONES EN CIENCIA 2025-2026”, a la Universidad de los Llanos y Universidad Politécnica de Madrid por su aporte contextual y conceptual para la reflexión y autocrítica de las discusiones planteadas sobre los resultados.

## 6. REFERENCIAS

- [1] F. A. Rodríguez Cruz, and J. C. Fernández Lizarazo, Eds., *Producción agrícola de la Orinoquía colombiana: investigación aplicada*, Bogotá, Colombia: Ediciones Unisalle, 2021. <https://doi.org/10.19052/978-958-5148-92-5>
- [2] J. E. Mariño Martínez. *Las aguas de la Orinoquía Colombiana y el cambio climático*. Tunja, Colombia: Editorial UTPC, 2023. <https://doi.org/10.19053/9789586607827>
- [3] MinAgricultura, “Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo,” Agronet, May. 2024. [Online]. Available: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- [4] A. Vásquez Cerón, C. Bustamante Zamudio, A. Buitrago, B. Brigitte, and J. Echeverri, *El gran libro de la Orinoquía colombiana*, Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt-GIZ Colombia, 2019. <https://repository.humboldt.org.co/entities/publication/74aa82cf-be07-4d1c-86b2-a32dbfd394ac>
- [5] Congreso de la República de Colombia, “Ley 99 de 1993: Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones,” 1993. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>
- [6] S. Cárdenas-Rodríguez, A. Pardo-García, and O. Maldonado-Bautista, “Adquisición y análisis de datos hidrometeorológicos open source,” *AiBi Rev. Inv. Admin. Ing.*, vol. 12, no. 2, pp. 180-187, May. 2024. <https://doi.org/10.15649/2346030X.3852>
- [7] J. S. Del Castillo-Gómez, T. Canchala, W. A. Torres-López, Y. Carvajal-Escobar, and C. Ocampo-Marulanda, “Estimation of monthly rainfall missing data in Southwestern Colombia: comparing different methods,” *RBRH*, vol. 28, p. e9, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.282320230008>
- [8] Ideam, PNUD, MADS, DNP, and Cancillería, “Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones– Nivel Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático,” Bogotá, 2015. [Online]. Available: <https://www.andi.com.co/Uploads/NUEVOS%20ESCENARIOS%20DE%20CAMBIO%20CLIM%C3%81TICO%20COLOMBIA%202011%20-%202100.pdf>
- [9] L. C. Correa Ortiz, O. L. Ocampo López, and M. F. Alba Castro, “Análisis de tendencia de temperatura y precipitación para el departamento de Caldas (Colombia), mediante wavelets,” *Cien. Ing. Neogranadina*, vol. 31, no. 1, pp. 37-52, Jul. 2021. <https://doi.org/10.18359/rcin.4900>
- [10] D. P. Rogers, and V. V. Tsirkunov, *Weather and Climate Resilience Effective Preparedness through National Meteorological and Hydrological Services*. Washington, USA: The World Bank, 2013, pp. 4-18. [Online]. Available: <URL>
- [11] Climate Hazards Center, “CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations,” Climate Hazards Center-University of California, Santa Barbara. Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>
- [12] A. Boluwade, “Spatial-Temporal Evaluation of Satellite-Derived Rainfall Estimations for Water Resources Applications in the Upper Congo River Basin,” *Remote Sens.*, vol. 16, no. 20, p. 3868, Oct. 2024. <https://doi.org/10.3390/rs16203868>
- [13] W. Salih, A. G. Chehbouni, and T. Epule Epule, “Evaluation of the Performance of Multi-Source Satellite Products in Simulating Observed Precipitation over the Tensift Basin in Morocco,” *Remote Sens.*, vol. 14, no. 5, p. 1171, Feb. 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14051171>
- [14] C. López-Bermeo, R. D. Montoya, F. J. Caro-Lopera, and J. A. Díaz-García, “Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America,” *Phys. Chem. Earth A/B/C*, vol. 127, p. 103184, Oct. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>
- [15] M. Naveed Anjum et al., “Assessment of PERSIANN-CCS, PERSIANN-CDR, SM2RAIN-ASCAT, and CHIRPS-2.0 Rainfall Products over a Semi-Arid Subtropical Climatic Region,” *Water*, vol. 14, no. 2, p. 147, Jan. 2022. <https://doi.org/10.3390/w14020147>

- [16] F. J. Paredes Trejo, H. Álvarez Barbosa, M. A. Peñaloza-Murillo, M. A. Moreno, and A. Farias, "Intercomparison of improved satellite rainfall estimation with CHIRPS gridded product and rain gauge data over Venezuela," *Atmósfera*, vol. 29, no. 4, pp. 323-342, Sep. 2016. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.04.04>
- [17] A. C. Freitas Xavier, A. P. Rudke, E. A. de Oliveira Serrão, P. M. de Bodas Terassi, and P. R. Monteiro Pontes, "Evaluation of Satellite-Derived Products for the Daily Average and Extreme Rainfall in the Mearim River Drainage Basin (Maranhão, Brazil)," *Remote Sens.*, vol. 13, no. 21, p. 4393, Oct. 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13214393>
- [18] H. Hafizi, and A. A. Şorman, "Performance Assessment of CHIRPSv2.0 and MERRA-2 Gridded Precipitation Datasets over Complex Topography of Turkey," *Environ. Sci. Proc.*, vol. 19, no. 1, p. 21, Jul. 2022. <https://doi.org/10.3390/ecas2022-12815>
- [19] C. Ocampo-Marulanda, C. Fernández-Álvarez, W. L. Cerón, T. Canchala, Y. Carvajal-Escobar, and W. Alfonso-Morales, "A spatiotemporal assessment of the high-resolution CHIRPS rainfall dataset in southwestern Colombia using combined principal component analysis," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 5, p. 101739, Sep. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101739>
- [20] J. E. Ureña, A. G. Vallejos, O. C. Saavedra, and A. C. Escalera, "Evaluación de la precipitación distribuida en la cuenca Katari basado en tecnología satelital y productos derivados," *I&D*, vol. 18, no. 1, pp. 35-51, Jul. 2018. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10053291>
- [21] E. Cepeda Arias, and J. Cañon Barriga, "Performance of high-resolution precipitation datasets CHIRPS and TerraClimate in a Colombian high Andean Basin," *Geocarto Int.*, vol. 37, no. 27, pp. 17382-17402, Sep. 2022. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2129816>
- [22] O. Mesa, V. Urrea, and A. Ochoa, "Trends of Hydroclimatic Intensity in Colombia," *Climate*, vol. 9, no. 7, p. 120, Jul. 2021. <https://doi.org/10.3390/CL19070120>
- [23] J. D. Giraldo-Osorio, D. E., Trujillo-Osorio, and O. M. Baez-Villanueva, "Analysis of Enso-Driven Variability, and Long-Term Changes, of Extreme Precipitation Indices in Colombia, Using the Satellite Rainfall Estimates CHIRPS," *Water*, vol. 14, no. 11, p. 1733, May. 2022. <https://doi.org/10.3390/w14111733>
- [24] I. Hoyos et al., "Moisture origin and transport processes in Colombia, northern South America," *Clim. Dyn.*, vol. 50, no. 3, pp. 971-990, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1007/S00382-017-3653-6>
- [25] D. S. Wilks, K, 2nd ed. San Diego, CA, United States of America: Academic Press, 2005. <https://www.sciencedirect.com/bookseries/international-geophysics/vol/100/suppl/C>
- [26] C. Funk et al., "The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes," *Sci. Data*, vol. 2, no. 1, pp. 1-21, Dec. 2015. <http://dx.doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- [27] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations," *Transact. ASABE*, vol. 50, no. 3, pp. 885-900, 2007. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23153>
- [28] L. F. Restrepo, and J. González, "De Pearson a Spearman," *Rev. Col. Cienc. Pec.*, vol. 20, no. 2, pp. 183-192, Apr-Jul. 2007. <https://www.redalyc.org/pdf/2950/295023034010.pdf>
- [29] E. Morales-Acuña, J. R. Linero-Cueto, and F. A. Canales, "Assessment of Precipitation Variability and Trends Based on Satellite Estimations for a Heterogeneous Colombian Region," *Hydrology*, vol. 8, no. 3, p. 128, Aug. 2021. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030128>
- [30] J. C. Triana-Madrid, C. Ocampo Marulanda, Y. Carvajal Escobar, W. A. Torres-López, J. Triana, and T. Canchala, "Estimación de evapotranspiración de referencia con información escasa utilizando machine learning en el suroccidente colombiano," *Meteorol.*, vol. 48, no. 2, p. 24, Oct. 2023. <http://dx.doi.org/10.24215/1850-468Xe024>
- [31] A. Huerta, W. Lavado-Casimiro, and O. Felipe-Obando, "Desarrollo de datos grillados de precipitación horaria para el Perú. Estudio Final. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú Estudio Final," Lima, Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI, 2022. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1784>
- [32] J. M. Andrade, A. Ribeiro Neto, R. L. B. Nóbrega, M. A. Rico-Ramirez, and S. M. G. L. Montenegro, "Efficiency of global precipitation datasets in tropical and subtropical catchments revealed by large sampling hydrological modelling," *J. Hydrology*, vol. 633, p. 131016, Apr. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131016>
- [33] T. Dinku et al., "Validation of the CHIRPS satellite rainfall estimates over eastern Africa," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 144, no. S1, pp. 292-312, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1002/qj.3244>
- [34] F. J. Paredes-Trejo, H. A. Barbosa, and T. V. Lakshmi Kumar, "Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil," *J. Arid Environ.*, vol. 139, pp. 26-40, Apr. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.009>

- [35] F. Alsilibe, K. Bene, G. Bilal, K. Alghafli, and X. Shi, "Accuracy Assessment and Validation of Multi-Source CHIRPS Precipitation Estimates for Water Resource Management in the Barada Basin, Syria," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 7, p. 1778, Mar. 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15071778>
- [36] S. Upadhyay et al., "Evaluating Magnitude Agreement and Occurrence Consistency of CHIRPS Product with Ground-Based Observations over Medium-Sized River Basins in Nepal," *Hydrology*, vol. 9, no. 8, p. 146, Aug. 2022. <https://doi.org/10.3390/hydrology9080146>
- [37] G. Tesfaye Ayehu, T. Tadesse, B. Gessesse, and T. Dinku, "Validation of new satellite rainfall products over the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 11, no. 4, pp. 1921-1936, Apr. 2018. <https://doi.org/10.5194/amt-11-1921-2018>
- [38] N. K. Shrestha, F. M. Qamer, D. Pedreros, M. S. R. Murthy, S. Md. Wahid, and M. Shrestha, "Evaluating the accuracy of Climate Hazard Group (CHG) satellite rainfall estimates for precipitation based drought monitoring in Koshi basin, Nepal," *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 13, pp. 138-151, Oct. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.08.004>
- [39] E. Cepeda Arias, and J. Cañon Barriga, *Performance of high-resolution precipitation datasets CHIRPS and TerraClimate in a Colombian high Andean Basin*. London, U.K.: Taylor & Francis, 2022. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.21280099>
- [40] R. Khatakho, A. Firoz, N. A. Elagib, and M. Fink, "Hydrological Modelling Using Gridded and Ground-Based Precipitation Datasets in Data-Scarce Mountainous Regions," *Hydrolog. Process.*, vol. 38, no. 12, p. e70024, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1002/hyp.70024>
- [41] B. Guo et al., "Multiple Spatial and Temporal Scales Evaluation of Eight Satellite Precipitation Products in a Mountainous Catchment of South China," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 5, p. 1373, Feb. 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15051373>
- [42] X.-H. Le, L. N. Van, D. H. Nguyen, G. V. Nguyen, S. I. Jung, and G. Lee, "Comparison of bias-corrected multisatellite precipitation products by deep learning framework," *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.*, vol. 116, p. 103177, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jaq.2022.103177>
- [43] T. Diriba Beyene, F. Atanaw Zimale, S. Tekleab Gebrekristos, and D. Nedaw, "Evaluation of a multi-staged bias correction approach on CHIRP and CHIRPS rainfall product: a case study of the Lake Hawassa watershed," *J. Water Clim. Change*, vol. 14, no. 6, pp. 1847-1867, Jun. 2023. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.457>

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros, profesionales o personales que hayan influido de forma inapropiada en los resultados obtenidos o en las interpretaciones propuestas en este estudio.

## CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

El presente artículo fue elaborado con la colaboración de todos los autores, quienes realizaron contribuciones sustanciales en diferentes etapas del proceso de investigación y redacción. Específicamente, Oscar Vargas fue responsable de la concepción de la idea, la obtención de financiamiento y el desarrollo de los aspectos prácticos y los cálculos del estudio. Santiago Castañeda participó en la estructuración del documento y la organización del contenido. Irene Blanco contribuyó en la mejora de la redacción y en el fortalecimiento de la conceptualización y la discusión del manuscrito. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del documento, y garantizan que no existen autores fantasmas ni de cortesía.

El autor de correspondencia, Oscar Vargas, avala que las declaraciones de autoría reflejan con precisión las contribuciones de cada uno de los participantes en este estudio.