

**ANÁLISIS DIFERENCIAL E INTEGRAL DE LA INTENSIDAD Y ACUMULACIÓN DE
PRECIPITACIONES EXTREMAS MEDIANTE SERIES TEMPORALES
DIFFERENTIAL AND INTEGRAL ANALYSIS OF THE INTENSITY AND
ACCUMULATION OF EXTREME PRECIPITATION USING TIME SERIES**

Autores: ¹Cristian David Buñay Marcatoma, ²Denisse Pamela Gonza Chicaiza, ³Carlos Fernando Heredia Villamarín y ⁴Lenin Gabriel Silva Tipantasig.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-3543-5111>

²ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-7506-930X>

³ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4369-1915>

⁴ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3696-3305>

¹E-mail de contacto: cristian.bunay@uaw.edu.ec

²E-mail de contacto: dpgonzal@espe.edu.ec

³E-mail de contacto: fernando.heredia@docentes.educacion.gob.ec

⁴E-mail de contacto: lgsilvat@uce.edu.ec

Afiliación: ¹*Universidad Intercultural de las Nacionalidades y Pueblos Indígenas Amawtay Wasi, (Ecuador). ²*Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, (Ecuador). ³*Ministerio de Educación, Deporte y Cultura, (Ecuador). ⁴*Universidad Central del Ecuador, (Ecuador).

Artículo recibido: 28 de Agosto del 2026.

Artículo revisado: 2 de Septiembre del 2026.

Artículo aprobado: 2 de Septiembre del 2026.

¹Matemático, graduado de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Ecuador). Magíster en Matemática Aplicada mención en Matemática Computacional, graduado de la Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador).

²Matemática, graduada de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Ecuador).

³Ingeniero Informático, graduado de la Universidad Central del Ecuador, (Ecuador). Magíster en Educación mención en Enseñanza de la Matemática de la Universidad Nacional de Educación, UNAE, (Ecuador). Máster Universitario en Formación del Profesorado de Educación Secundaria de Ecuador en la Especialidad de Matemáticas de la Universitat de Barcelona, (España).

⁴Ingeniero Civil, graduado de la Universidad Técnica de Ambato, (Ecuador). Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, (España). Máster Universitario en Ingeniería Matemática y Computación de la Universidad Internacional de la Rioja, (España).

Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar cómo la resolución temporal modifica la caracterización diferencial e integral de eventos de precipitación extrema. Se analizaron series satelitales de precipitación cada treinta minutos entre 2001 y 2024 para Guayaquil, Esmeraldas, Quito y Puyo. Los eventos se delimitaron mediante un intervalo mínimo sin lluvia de seis horas y se clasificaron como extremos a partir del percentil noventa y cinco de acumulación o de intensidad máxima. La serie de referencia de treinta minutos se agregó a una, tres y seis horas para comparar la conservación de la precipitación acumulada y la pérdida de intensidad máxima. También se evaluaron diferencias finitas progresivas y centrales, interpolación cúbica Hermite preservadora de forma, tasas de intensificación y análisis de sensibilidad. Se identificaron 24.239 eventos, de los cuales 1.724 fueron extremos. La pérdida mediana de intensidad máxima fue cercana al dieciséis por

ciento a una hora, cuarenta y seis por ciento a tres horas y sesenta y tres por ciento a seis horas, mientras que la acumulación permaneció prácticamente invariante. Los eventos extremos definidos solo por intensidad fueron los más sensibles y alcanzaron una pérdida mediana superior al ochenta por ciento a seis horas. Se concluye que la agregación temporal conservativa mantiene la magnitud integral, pero reduce de forma marcada la información diferencial asociada con máximos y cambios rápidos, por lo que la resolución temporal debe considerarse explícitamente en estudios de precipitación extrema.

Palabras clave: Cálculo diferencial, Cálculo integral, Precipitación extrema, Resolución temporal, Discretización, Matemática aplicada.

Abstract

The objective of this study was to evaluate how temporal resolution modifies the differential and

integral characterization of extreme precipitation events. Satellite precipitation series at thirty-minute intervals from 2001 to 2024 were analyzed for Guayaquil, Esmeraldas, Quito, and Puyo, Ecuador. Events were separated using a six-hour minimum dry interval and classified as extreme according to the ninety-fifth percentile of event accumulation or maximum intensity. The thirty-minute reference series was aggregated to one-, three-, and six-hour resolutions to compare preservation of accumulated precipitation with the loss of maximum intensity. Forward and central finite differences, shape-preserving piecewise cubic Hermite interpolation, intensification rates, and sensitivity analyses were also evaluated. A total of 24,239 precipitation events were identified, of which 1,724 were classified as extreme. The median loss of maximum intensity was approximately sixteen percent at one hour, forty-six percent at three hours, and sixty-three percent at six hours, whereas accumulated precipitation remained practically invariant. Events classified as extreme only because of intensity were the most sensitive, reaching a median loss greater than eighty percent at six hours. The results show that conservative temporal aggregation preserves the integral magnitude of an event but substantially degrades differential information associated with local maxima and rapid changes. Temporal resolution should therefore be treated explicitly as a mathematical and analytical constraint when extreme precipitation is characterized from discretely sampled time series.

Keywords: Differential calculus, Integral calculus, Extreme precipitation, Temporal resolution, Discretization, Applied mathematics.

Sumário

O objetivo deste estudo foi avaliar como a resolução temporal modifica a caracterização diferencial e integral de eventos de precipitação extrema. Foram analisadas séries satelitais de precipitação em intervalos de trinta minutos entre 2001 e 2024 para Guayaquil, Esmeraldas, Quito e Puyo, no Equador. Os eventos foram separados mediante um intervalo mínimo seco

de seis horas e classificados como extremos a partir do percentil noventa e cinco da acumulação do evento ou da intensidade máxima. A série de referência de trinta minutos foi agregada para resoluções de uma, três e seis horas, permitindo comparar a conservação da precipitação acumulada com a perda da intensidade máxima. Também foram avaliadas diferenças finitas progressivas e centrais, interpolação cúbica de Hermite preservadora de forma, taxas de intensificação e análises de sensibilidade. Foram identificados 24.239 eventos de precipitação, dos quais 1.724 foram classificados como extremos. A perda mediana da intensidade máxima foi de aproximadamente dezesseis por cento em uma hora, quarenta e seis por cento em três horas e sessenta e três por cento em seis horas, enquanto a precipitação acumulada permaneceu praticamente invariável. Os eventos classificados como extremos somente pela intensidade foram os mais sensíveis e apresentaram perda mediana superior a oitenta por cento em seis horas. Conclui-se que a agregação temporal conservativa preserva a magnitude integral, mas reduz de forma acentuada a informação diferencial associada a máximos locais e mudanças rápidas, razão pela qual a resolução temporal deve ser considerada explicitamente na análise de precipitações extremas.

Palavras-chave: Cálculo diferencial, Cálculo integral, Precipitação extrema, Resolução temporal, Discretização, Matemática aplicada.

Introducción

La precipitación es un proceso con elevada variabilidad temporal y espacial cuya caracterización depende de la escala con la que se registran y analizan las observaciones. La disponibilidad de datos de alta resolución temporal es particularmente importante en aplicaciones hidrológicas, porque las acumulaciones diarias u horarias pueden ocultar máximos de corta duración relevantes para drenaje urbano, inundaciones repentinas y estimación de extremos. Los estudios de

desagregación temporal muestran que recuperar la estructura subdiaria a partir de series más gruesas continúa siendo un problema metodológico, especialmente cuando se pretende conservar simultáneamente acumulaciones, secuencias húmedas y extremos de corta duración (Acharya et al., 2022; Guan et al., 2023; Maloku et al., 2023; Qin & Dai, 2024).

$$P(t) = \int_{t_0}^t I(\tau) d\tau \quad (1)$$

$$I(t) = dP(t)/dt \quad (2)$$

Desde una perspectiva matemática, la intensidad y la acumulación de precipitación están vinculadas por las operaciones fundamentales del cálculo. Si $I(t)$ representa la intensidad de precipitación, la cantidad acumulada $P(t)$ se obtiene como su integral temporal y, bajo condiciones de diferenciabilidad, la intensidad puede interpretarse como la derivada de la función acumulativa. En datos reales, sin embargo, estas funciones se observan únicamente en tiempos discretos. Por tanto, las estimaciones de máximos, pendientes y cambios rápidos dependen del intervalo Δt con el que se representa la serie.

La agregación temporal produce una forma de suavizado que puede conservar la suma total y, al mismo tiempo, reducir los máximos locales. Este efecto se ha documentado en registros pluviométricos y productos radar. Morbidelli et al. (2018) demostraron que la agregación temporal puede subestimar máximos de lluvia y modificar incluso inferencias de tendencia, mientras que Pöschmann et al. (2023) mostraron que la discretización genera diferencias entre máximos obtenidos con ventanas fijas y móviles. Más recientemente, Johnson et al. (2026) encontraron una pérdida sistemática de intensidad al degradar registros de quince minutos hacia escalas horarias y superiores, con

un comportamiento aproximadamente logarítmico durante las primeras horas de agregación. La sensibilidad a la escala tampoco es necesariamente igual para todos los eventos. Los perfiles subhorarios contienen información sobre suma, pico y forma temporal que puede desaparecer al aumentar el intervalo de análisis (Hundhausen et al., 2025). Asimismo, los extremos horarios y de veinticuatro horas pueden mostrar comportamientos diferentes porque representan propiedades temporales distintas de la precipitación (Evans y DeGaetano, 2025). Esta diferencia sugiere separar eventos dominados por una acumulación elevada de aquellos definidos por un pico intenso de corta duración.

Los productos satelitales permiten estudiar estas propiedades de manera homogénea en regiones con redes pluviométricas limitadas. El producto final de Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement proporciona estimaciones cada treinta minutos y una malla de 0,1 grados (Huffman et al., 2023). La influencia conjunta de resolución espacial y temporal de productos de precipitación sobre respuestas hidrológicas ha sido documentada por Woods et al. (2024). Para Ecuador, Iza-Wong et al. (2026) encontraron que este producto presentó el mejor desempeño general entre varias alternativas evaluadas, aunque con menor habilidad en zonas montañosas y limitaciones para algunos extremos.

A partir de estos antecedentes, el presente estudio aborda la resolución temporal como un problema de Matemática Aplicada y no únicamente como una característica instrumental del dato. El objetivo fue evaluar el efecto de la resolución temporal sobre la caracterización diferencial e integral de eventos de precipitación extrema mediante la degradación controlada de series semihorarias y la comparación de

aproximaciones numéricas en cuatro condiciones climáticas contrastantes de Ecuador. Se planteó que la agregación conservativa preservaría la acumulación total, pero reduciría progresivamente la intensidad máxima y las tasas de cambio, con una sensibilidad mayor en eventos definidos principalmente por intensidad.

Materiales y Métodos

Se desarrolló un estudio cuantitativo y computacional basado en un experimento de agregación temporal controlada. La unidad de análisis fue el evento individual de precipitación. Todas las escalas comparadas se generaron a partir de una única serie de referencia de treinta minutos, de manera que las diferencias observadas no estuvieran condicionadas por el uso de productos meteorológicos distintos. El periodo analizado comprendió del 1 de enero de 2001 al 31 de diciembre de 2024.

Se seleccionaron Guayaquil, Esmeraldas, Quito y Puyo para representar condiciones contrastantes de Costa, Costa húmeda, Andes y Amazonía. Para cada localización se extrajo la celda correspondiente del producto GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly V07B. El producto proporciona una tasa media de precipitación cada treinta minutos en una malla de 0,1 grados (Huffman et al., 2023). Antes del análisis se verificaron continuidad temporal, duplicados, valores faltantes y valores negativos. IMERG se utilizó como serie satelital de referencia y no como sustituto de una medición puntual en superficie, particularmente por las limitaciones documentadas para zonas montañosas de Ecuador (Iza et al., 2026). La variable utilizada corresponde a una tasa media de precipitación durante cada intervalo semihorario. La cantidad asociada con cada observación se obtuvo multiplicando la tasa por la duración del intervalo. La precipitación acumulada de un evento se calculó mediante

suma de las cantidades semihorarias, equivalente a la aproximación rectangular de la integral cuando la tasa se interpreta como promedio del intervalo.

$$p_i = I_i \Delta t, \Delta t = 0,5 \text{ h} \quad (3)$$

$$P_k = \sum_{i=1}^k p_i \quad (4)$$

Un intervalo se consideró húmedo cuando acumuló al menos 0,1 mm en treinta minutos. Los eventos independientes se delimitaron utilizando un tiempo mínimo entre eventos de seis horas, criterio que se empleó como configuración principal y que ha mostrado utilidad en ambientes de baja latitud (Brasil et al., 2022). Para cada evento se calcularon duración, acumulación, intensidad media e intensidad máxima. Los umbrales de extremidad se estimaron por separado para cada localización mediante el percentil 95 de la acumulación de los eventos y el percentil 95 de la intensidad máxima. Cada evento extremo se clasificó como solo acumulación, acumulación e intensidad, o solo intensidad.

$$A_e = \sum_{i=1}^{ne} p_i \quad (5)$$

$$I_{\max, e} = \max(I_i) \quad (6)$$

La serie de treinta minutos se conservó como referencia y los mismos intervalos se reagruparon a resoluciones de una, tres y seis horas. Para cada bloque agregado se sumaron las cantidades de precipitación y se dividieron por la duración del nuevo intervalo para obtener la intensidad media. Este procedimiento conserva algebraicamente la cantidad total precipitada y permite evaluar de manera separada el comportamiento de magnitudes integrales y diferenciales.

$$p_j^{\wedge}(\Delta t) = \sum_i \in_j p_i \quad (7)$$

La función acumulativa discreta se utilizó para comparar una diferencia progresiva, una diferencia central y una interpolación cúbica Hermite por tramos preservadora de forma. Esta última fue seleccionada por su capacidad para conservar monotonía y reducir oscilaciones artificiales entre nodos (Fritsch & Carlson, 1980). Para cada resolución se evaluó el error del máximo reconstruido con respecto al máximo observado en la serie semihoraria. También se estimó la segunda derivada de la función acumulativa, interpretada como tasa de cambio de la intensidad, y se obtuvieron las máximas tasas de intensificación y disminución.

$$D_f P_i = (P_{i+1} - P_i)/\Delta t \quad (8)$$

$$D_c P_i = (P_{i+1} - P_{i-1})/(2\Delta t) \quad (9)$$

$$\tilde{I}(t) = d\tilde{P}(t)/dt \quad (10)$$

$$R_e^+ = \max(dI/dt), \quad R_e^- = \min(dI/dt) \quad (11)$$

La pérdida relativa de intensidad máxima se expresó como porcentaje respecto de la serie de treinta minutos. Para cuantificar la rapidez del deterioro se relacionó la pérdida de cada evento con el logaritmo en base dos de la razón entre la resolución analizada y la escala de referencia; la pendiente se interpretó como pérdida adicional en puntos porcentuales por duplicación aproximada de la escala. Las resoluciones se compararon mediante la prueba de Friedman y el tamaño del efecto mediante W de Kendall. Las tres categorías de extremos se compararon con Kruskal-Wallis y epsilon cuadrado. Las medianas se acompañaron de intervalos de confianza del 95 % obtenidos mediante bootstrap.

$$L_I(\Delta t) = 100[1 - I_{\max}^{\wedge}(\Delta t)/I_{\max}^{\wedge}(0,5)] \quad (12)$$

$$E_A(\Delta t) = 100[A^{\wedge}(\Delta t) - A^{\wedge}(0,5)]/A^{\wedge}(0,5) \quad (13)$$

$$x = \log_2(\Delta t/0,5) \quad (14)$$

$$L_I = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (15)$$

La robustez de las conclusiones se comprobó repitiendo la identificación con tiempos mínimos entre eventos de tres, seis y doce horas y con umbrales de extremidad de los percentiles 95 y 99. También se desplazó el origen de los bloques de agregación en múltiplos de treinta minutos compatibles con cada resolución. Esta evaluación permitió distinguir el efecto general de la resolución de aquel producido por una elección particular de umbral, separación entre eventos o alineación temporal. Procedimientos de desagregación recientes muestran precisamente que la forma, asimetría y estructura de los perfiles condicionan la recuperación de estadísticas subdiarias (Green et al., 2024; Maloku et al., 2023; Qin y Dai, 2024).

El flujo de procesamiento fue reproducible y comprendió importación de las doce series bianuales, unión cronológica, conversión de tasas a cantidades, delimitación de eventos, cálculo de umbrales locales, clasificación de extremos, agregación multirresolución, aproximaciones diferenciales, cálculo de errores, pruebas no paramétricas, análisis de sensibilidad y generación de tablas y figuras. La evaluación de productos satelitales a escalas múltiples ha mostrado que la resolución temporal puede introducir sesgos diferentes de los asociados con el propio producto, por lo que todas las comparaciones se mantuvieron dentro de la misma fuente de datos (Woods et al., 2024).

Resultados y Discusión

El criterio de separación de seis horas permitió identificar 24.239 eventos de precipitación en las cuatro localizaciones. Puyo presentó 7.559 eventos, Quito 6.628, Esmeraldas 6.117 y Guayaquil 3.935. Los percentiles locales reflejaron diferencias entre regímenes: el umbral

de acumulación osciló entre 22,50 mm en Quito y 39,13 mm en Puyo, mientras que el percentil 95 de intensidad máxima varió entre 8,24 mm h⁻¹ en Guayaquil y 11,08 mm h⁻¹ en Puyo.

La unión de los eventos extremos por acumulación e intensidad generó una muestra de 1.724 episodios. De ellos, 511 fueron extremos únicamente por acumulación, 511 únicamente

por intensidad y 702 simultáneamente por ambas propiedades. Puyo presentó la mayor acumulación mediana y la mayor intensidad máxima mediana, mientras que Quito mostró eventos más cortos. Estas diferencias ofrecen condiciones suficientemente contrastantes para evaluar si la degradación temporal conserva un patrón matemático común.

Tabla 1. Características de los eventos extremos seleccionados.

Localidad	Eventos	P95 A (mm)	P95 I _{max} (mm/h)	Extremos	Duración (h)	A med. (mm)	I _{max} med. (mm/h)
Esmeraldas	6.117	31,14	10,09	420	15,5	39,40	11,74
Guayaquil	3.935	29,89	8,24	278	14,5	36,65	9,29
Puyo	7.559	39,13	11,08	550	16,0	46,24	12,40
Quito	6.628	22,50	9,09	476	11,5	26,90	10,42

Fuente: Elaboración propia.

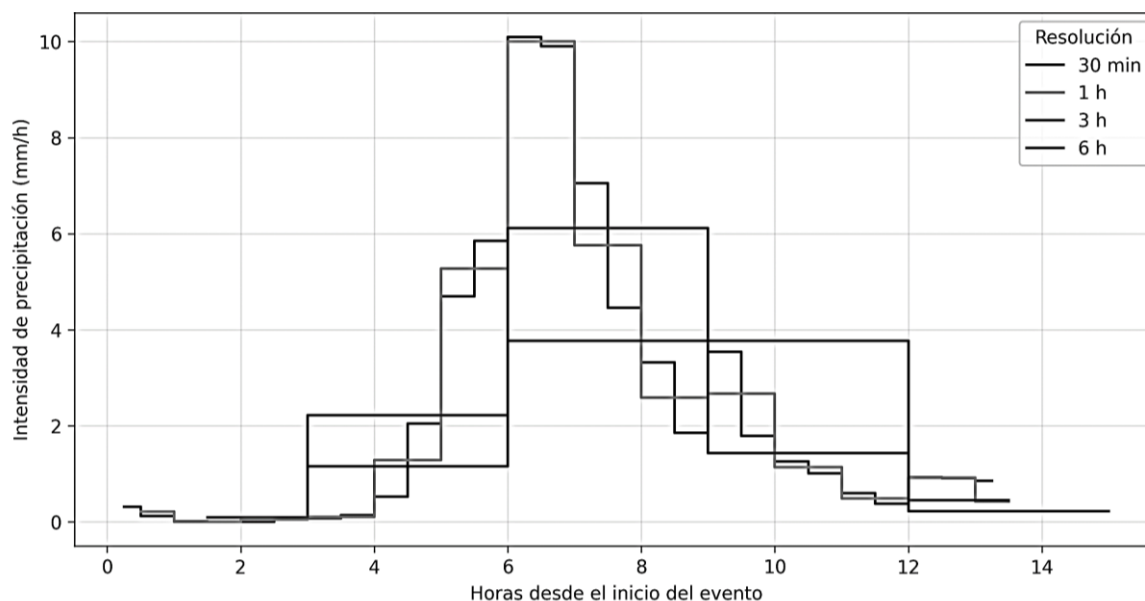


Figura 1. Evento representativo a 30 minutos, 1, 3 y 6 horas.

Fuente: Elaboración propia.

El incremento de Δt produjo una disminución sistemática de la intensidad máxima. Considerando el conjunto de eventos, la pérdida mediana fue 15,92 % a una hora, 45,96 % a tres horas y 62,66 % a seis horas. Por localización, la pérdida a seis horas osciló entre 57,85 % en Guayaquil y 65,65 % en Quito. Los intervalos de confianza bootstrap mostraron estimaciones

estables y sin solapamientos que sugirieran una reversión del patrón entre escalas. La reducción concuerda con la evidencia de que la agregación temporal atenúa máximos de corta duración (Morbidelli et al., 2018; Pöschmann et al., 2023). Johnson et al. (2026) observaron un comportamiento aproximadamente logarítmico en registros de Florida. En el presente estudio, la pendiente mediana fue 17,56 puntos

porcentuales por duplicación aproximada de la escala temporal, con un R^2 mediano de 0,95, lo que muestra una regularidad notable a nivel de evento. La prueba de Friedman confirmó diferencias entre las cuatro resoluciones en todas las localizaciones, con $p < 0,001$ y W de Kendall prácticamente igual a uno. Sin embargo, este

resultado no se interpreta como evidencia aislada de novedad, porque al sustituir valores de alta resolución por promedios de intervalos más amplios se espera una reducción de los máximos. La información relevante es la magnitud de la pérdida y su dependencia con la forma del evento.

Tabla 2. Pérdida mediana de intensidad máxima e intervalo de confianza del 95 %

Localidad	1 h (%)	3 h (%)	6 h (%)
Esmeraldas	17,77 (16,00–20,53)	47,70 (45,60–50,60)	63,36 (61,04–65,53)
Guayaquil	11,87 (10,57–14,34)	42,55 (39,33–45,57)	57,85 (56,33–60,40)
Puyo	14,86 (12,82–17,43)	44,10 (41,38–46,13)	61,40 (59,34–63,16)
Quito	16,99 (14,78–18,53)	48,49 (46,28–51,77)	65,65 (63,62–67,94)

Fuente: Elaboración propia.

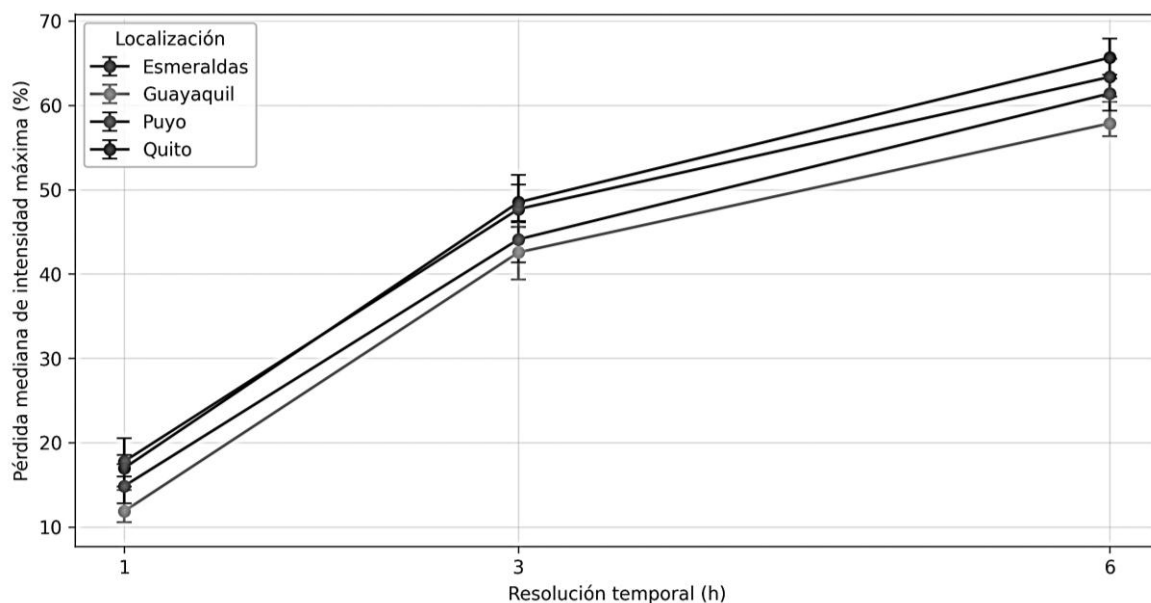


Figura 2. Pérdida de intensidad máxima según resolución temporal y localización.

Fuente: Elaboración propia.

La acumulación total permaneció prácticamente invariante al pasar de treinta minutos a una, tres y seis horas; los errores residuales fueron del orden de la precisión numérica. Este comportamiento se deriva de la suma conservativa empleada para construir cada bloque. En consecuencia, series con igual acumulación pueden representar de forma muy diferente el máximo de intensidad y la rapidez de cambio. La diferencia entre magnitudes integrales y diferenciales constituye el resultado

matemático central. La operación de agregación conserva el área asociada con la integral de la intensidad, mientras que modifica la representación de la derivada de la acumulación y afecta todavía más la segunda derivada. Acharya et al. (2022), Guan et al. (2023) y Maloku et al. (2023) han mostrado que reconstruir propiedades subdiarias a partir de información más gruesa requiere hipótesis adicionales sobre la distribución temporal. Los resultados obtenidos aquí muestran por qué esas

hipótesis son necesarias: la suma puede mantenerse sin que se preserve la geometría local del evento. La pérdida de intensidad dependió claramente del criterio de extremidad. A una hora, los eventos definidos solo por acumulación perdieron una mediana de 8,43 %, los eventos extremos por ambas características 13,27 % y los eventos definidos solo por intensidad 35,08 %. A seis horas, las pérdidas aumentaron a 50,61 %, 60,39 % y 80,71 %, respectivamente. Las diferencias entre categorías fueron significativas en las tres escalas, con $p < 0,001$. El tamaño del

efecto aumentó desde $\varepsilon^2 = 0,295$ a una hora hasta $\varepsilon^2 = 0,499$ a seis horas. Los eventos dominados por picos breves dependen de una propiedad local de la función y, por ello, son más vulnerables al promedio temporal que los eventos cuya condición extrema depende de una suma distribuida durante varias horas. Esta interpretación es consistente con el análisis de perfiles subhorarios de Hundhausen et al. (2025), quienes distinguen suma, intensidad pico y forma del evento como características complementarias.

Tabla 3. Pérdida mediana de intensidad máxima según el tipo de evento.

Tipo de extremo	1 h (%)	3 h (%)	6 h (%)
Solo acumulación	8,43	32,79	50,61
Acumulación e intensidad	13,27	42,63	60,39
Solo intensidad	35,08	67,17	80,71

Fuente: Elaboración propia.

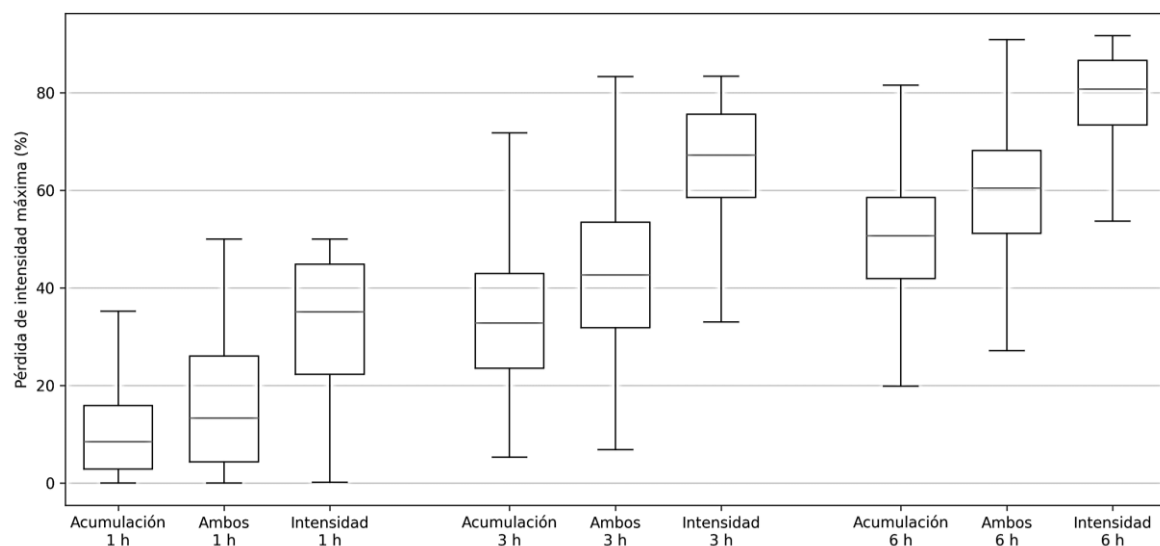


Figura 3. Sensibilidad temporal según el tipo de evento extremo.

Fuente: Elaboración propia.

La comparación de métodos mostró que la interpolación preservadora de forma produjo el menor error absoluto mediano en las resoluciones agregadas: 10,44 % a una hora, 32,48 % a tres horas y 52,64 % a seis horas. La diferencia progresiva presentó errores de 15,92 %, 45,96 % y 62,66 %, mientras que la diferencia

central mostró errores todavía mayores. A la resolución original, sin embargo, la interpolación produjo una sobreestimación mediana del pico de 15,62 %, lo que confirma que una curva continua interpolada introduce una hipótesis sobre el comportamiento entre observaciones. Por esta razón, la tasa media del intervalo

original se conservó como referencia física y la interpolación se utilizó únicamente como herramienta de reconstrucción matemática. La reducción de las tasas máximas de intensificación fue más severa que la pérdida del pico: al pasar a tres horas se eliminó

aproximadamente entre 85 % y 94 % de la máxima tasa de crecimiento, y a seis horas la pérdida se aproximó a la totalidad en numerosos eventos. Este resultado es coherente con el carácter diferencial de orden superior de la magnitud analizada.

Tabla 4. Error absoluto mediano del máximo reconstruido por método numérico.

Resolución	Progresiva (%)	Central (%)	PCHIP (%)
30 min	0,00	10,73	15,62
1 h	15,92	25,00	10,44
3 h	45,96	50,93	32,48
6 h	62,66	63,51	52,64

Fuente: Elaboración propia.

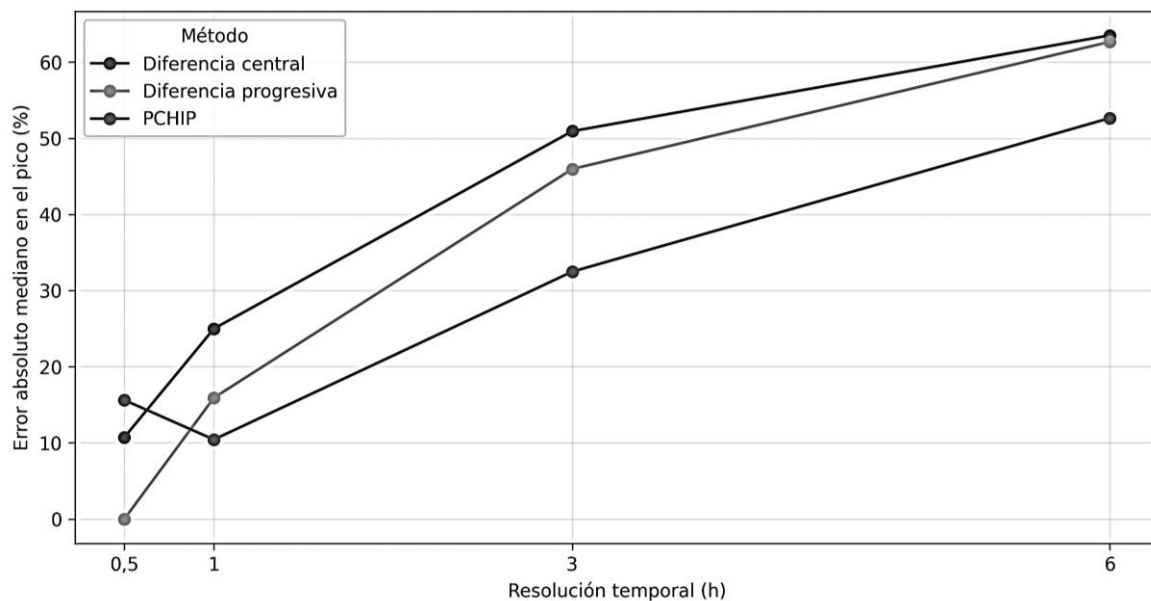


Figura 4. Error de reconstrucción de la intensidad máxima por método numérico.

Fuente: Elaboración propia.

Las conclusiones se mantuvieron al modificar el tiempo mínimo entre eventos y elevar el umbral desde el percentil 95 al 99. También persistieron al desplazar el origen de los bloques temporales. La alineación produjo variación adicional porque un máximo puede quedar centrado o dividido entre dos ventanas, pero ninguna fase eliminó la reducción creciente de intensidad con el aumento de Δt . Estos resultados complementan estudios que documentan diferencias entre extremos horarios y diarios (Evans y DeGaetano, 2025) y trabajos

que evalúan las consecuencias hidrológicas de cambiar la resolución de productos de precipitación (Woods et al., 2024). El análisis no pretende validar IMERG frente a pluviómetros ni generalizar los porcentajes a cualquier red de observación. Iza-Wong et al. (2026) muestran que el producto presenta un desempeño global favorable en Ecuador, pero también limitaciones en terrenos montañosos y para eventos extremos. La inferencia generalizable es matemática: una agregación que conserva cantidades integrales puede

degradar severamente máximos locales y tasas de cambio. Desde una perspectiva aplicada, la resolución temporal debe elegirse de acuerdo con la propiedad que se desea estudiar. Para acumulaciones totales, una agregación conservativa puede mantener la magnitud de interés; para intensidades máximas, transiciones rápidas o eventos dominados por picos, una escala demasiado gruesa elimina una fracción sustancial de la información. Este resultado refuerza la necesidad de conservar datos subhorarios cuando el objetivo analítico depende de características diferenciales de la precipitación.

Conclusiones

De los resultados obtenidos y de su interpretación matemática se concluye que la resolución temporal constituye un factor determinante en el análisis de precipitaciones extremas. A medida que aumenta el intervalo de agregación temporal, disminuye sistemáticamente la capacidad de representar los valores máximos y las variaciones rápidas de la precipitación, aun cuando el evento meteorológico subyacente sea el mismo. Esto evidencia que la escala temporal seleccionada condiciona directamente la identificación y caracterización de los eventos extremos.

Asimismo, la agregación temporal conservativa permite preservar la cantidad total acumulada de precipitación, pero no mantiene las propiedades dinámicas y diferenciales de la serie. En consecuencia, dos representaciones que presentan una acumulación total equivalente pueden diferir considerablemente en términos de intensidad, distribución temporal y comportamiento de los máximos, lo que demuestra que la conservación del volumen acumulado no garantiza la conservación de las características internas del evento. Los resultados también muestran que los eventos

caracterizados principalmente por su intensidad presentan una mayor sensibilidad ante la pérdida de resolución temporal que aquellos definidos a partir de la precipitación acumulada. Este comportamiento confirma que el análisis de los extremos pluviométricos no debe limitarse únicamente a la magnitud total registrada, sino que debe considerar también la estructura temporal del evento, particularmente su duración, intensidad máxima y velocidad de cambio.

Las reconstrucciones numéricas permiten recuperar parcialmente la geometría y continuidad de las series sometidas a procesos de degradación temporal; sin embargo, no pueden sustituir completamente la información contenida en las observaciones originales de alta resolución. Por esta razón, en investigaciones orientadas al análisis de picos de precipitación, tasas de intensificación y eventos extremos de corta duración, resulta fundamental conservar la mayor resolución temporal disponible y documentar explícitamente el intervalo de discretización empleado durante el procesamiento y análisis de los datos.

Referencias Bibliográficas

- Acharya, S. Nathan, R., Wang, Q., & Su, C. (2022). Temporal disaggregation of daily rainfall measurements using regional reanalysis for hydrological applications. *Journal of Hydrology*, 610, 127867. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127867>
- Brasil, J., Guerreiro, M., Andrade, E., de Queiroz, H., Medeiros, P., & Ribeiro, J. (2022). Minimum rainfall inter-event time to separate rainfall events in a low latitude semi-arid environment. *Sustainability*, 14(3), 1721. <https://doi.org/10.3390/su14031721>
- Evans, C., & DeGaetano, A. (2025). A comparison of the rates of change associated

- with hourly and 24-hour precipitation extremes across the eastern United States. *Water Resources Research*, 61, e2025WR040435.
<https://doi.org/10.1029/2025WR040435>
- Fritsch, F., & Carlson, R. (1980). Monotone piecewise cubic interpolation. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 17(2), 238–246.
<https://doi.org/10.1137/0717021>
- Green, A., Kilsby, C., & Bárdossy, A. (2024). A framework for space–time modelling of rainfall events for hydrological applications of weather radar. *Journal of Hydrology*, 630, 130630.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130630>
- Guan, X., Nissen, K., Nguyen, V., Merz, B., Winter, B., & Vorogushyn, S. (2023). Multisite temporal rainfall disaggregation using methods of fragments conditioned on circulation patterns. *Journal of Hydrology*, 621, 129640.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129640>
- Huffman, G., Stocker, E., Bolvin, D., Nelkin, E. J., & Tan, J. (2023). GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree × 0.1 degree V07 [Data set]. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center.
<https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/07>
- Hundhausen, M., Fowler, H., Feldmann, H., & Pinto, J. G. (2025). Sub-hourly precipitation and rainstorm event profiles in a convection-permitting multi-GCM ensemble. *Weather and Climate Extremes*, 48, 100764.
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2025.100764>
- Iza, A., Moldovan, G., Ben, Z., Hemingway, R., Chantry, M., & Lavers, D. (2026). Evaluation of precipitation observations across Ecuador. *Atmospheric Science Letters*, 27(1), e70002.
<https://doi.org/10.1002/asl.70002>
- Johnson, D., Misra, V., & Ahmadisharaf, E. (2026). Sensitivity of intensity–duration–frequency curves to the temporal resolution of rainfall observations. *Journal of Hydrologic Engineering*. Advance online publication.
<https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-6773>
- Maloku, K., Hingray, B., & Evin, G. (2023). Accounting for precipitation asymmetry in a multiplicative random cascade disaggregation model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27, 3643–3661.
<https://doi.org/10.5194/hess-27-3643-2023>
- Morbideilli, R., Saltalippi, C., Flammini, A., Corradini, C., Wilkinson, S. M., & Fowler, H. J. (2018). Influence of temporal data aggregation on trend estimation for intense rainfall. *Advances in Water Resources*, 122, 304–316.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.10.027>
- Pöschmann, J., Kronenberg, R., & Bernhofer, C. (2023). Variability of sampling adjustment factors for extreme rainfall in Germany. *Theoretical and Applied Climatology*, 153, 1463–1477. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04511-3>
- Qin, X., & Dai, C. (2024). Investigation of rainfall disaggregation with flexible timescales based on point process models. *Journal of Hydrology*, 634, 131101.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131101>
- Woods, D., Kirstetter, P.-E., Vergara, H., Duarte, J. A., & Basara, J. (2024). Hydrologic evaluation of the Global Precipitation Measurement mission over the U.S.: Effect of spatial and temporal scales. *Journal of Hydrology*, 635, 131134.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131134>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Cristian David Buñay Marcatoma, Denisse Pamela Gonza Chicaiza, Carlos Fernando Heredia Villamarín y Lenin Gabriel Silva Tipantasig.

Declaraciones éticas y editoriales del artículo

Contribución de los autores (Taxonomía CRediT)

Cristian David Buñay Marcotoma: conceptualización, metodología, análisis formal, redacción del borrador original y supervisión.

Denisse Pamela Gonza Chicaiza: curación de datos, software, validación y visualización.

Carlos Fernando Heredia Villamarín: investigación, recursos, validación y revisión crítica del manuscrito.

Lenin Gabriel Silva Tipantasig: metodología, análisis formal, supervisión y revisión y edición del manuscrito.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.

Declaración de financiamiento

La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.

Declaración del editor

El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.

Declaración de los revisores

Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.

Declaración ética de la investigación

Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.

