



XXV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA BOGOTÁ D.C., JUNIO 05 AL 07 DE 2024

APORTE AL DISEÑO HIDROLÓGICO EN EL CARIBE COLOMBIANO A TRAVÉS DE NUEVAS CURVAS IDF

Laura Torres, Kharoll Ávila, Alexander Villamizar, Aida Moreno, Kevin Barrera, María Mendoza, David Gómez, Anael Rubio, Brayan Mendieta, Juan Molano, Germán Niño, Laura Medina, Brian Gutiérrez, Santiago Suárez, Jonathan Melo, Jennifer Yanalá, Erasmo Rodríguez

Semillero de Investigación en Hidrología Urbana (SIHU), Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH), Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

lactorresto@unal.edu.co, ksavilab@unal.edu.co, avillamizarh@unal.edu.co, aimoreno@unal.edu.co, kbarrerac@unal.edu.co, mmendozal@unal.edu.co, dcgomezme@unal.edu.co, anvelandia@unal.edu.co, bfmendietam@unal.edu.co, jmolanob@unal.edu.co, ganinop@unal.edu.co, ldmedinago@unal.edu.co, bgutierrezv@unal.edu.co, sasuaezr@unal.edu.co, jmelod@unal.edu.co, jcyanalab@unal.edu.co, earodriguezs@unal.edu.co

RESUMEN:

El estudio aborda la obtención de 16 nuevas curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) a partir de la digitalización de 4000 cartas pluviográficas para la región Caribe colombiana, totalizando 42 curvas. Se analiza la variación temporal y espacial de las intensidades, validando el modelo de predicción por el IDW. Se observan diferencias importantes en las intensidades en estaciones de Norte de Santander y Montería debido a cambios en el régimen de precipitación. Las intensidades más altas se registran en Barrancabermeja, Antioquia y en el norte de Córdoba, mientras que las más bajas están en Norte de Santander y el sur de Bolívar. La predicción de la interpolación muestra aumento del error al expandir el área de análisis y al incrementar el número de estaciones consideradas. Las curvas IDF contribuyen significativamente al diseño hidrológico, por lo tanto, se destaca la necesidad de construir y actualizar más curvas para esta región, y en general para todo Colombia. La información detallada y los recursos generados en esta investigación están disponibles en el enlace proporcionado.

ABSTRACT:

The study involved the creation of 16 new Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for the Colombian Caribbean region, resulting in a total of 42 curves. This was done by digitizing 4000 pluviographic charts. The study analyzed variability in rainfall intensities over time and space and used the Inverse Distance Weighting (IDW) method to validate the prediction model. The study found significant differences in intensities across stations in Norte de Santander and Montería. Higher intensities were observed in Barrancabermeja, Antioquia, and northern Córdoba, while lower intensities were found in Norte de Santander and southern Bolívar. The study also found that as the analysis area expanded and more stations were included, the accuracy of the interpolation prediction decreased. While IDF curves are important for hydrological design, the study emphasized the need for more curves to be constructed and updated for the entire region and the whole of Colombia. Interested readers can access detailed information and resources on the study at the provided link.

PALABRAS CLAVE: Variabilidad espacial, diseño hidrológico, lluvias extremas.



INTRODUCCIÓN

La hidroclimatología colombiana se ve influenciada por diversos fenómenos que operan en diferentes escalas espaciotemporales (Poveda, 2004) y la región Caribe no es la excepción. Factores como el relieve, la ubicación geográfica, los vientos locales y la proximidad al Mar Caribe, juegan un papel fundamental en el comportamiento del clima de la región. La topografía que incluye la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), las Serranías de Perijá y Macuira y las extensas llanuras (Rangel & Carvajal, 2012) impacta directamente en los patrones de precipitación. Además, el ciclo anual de temperaturas superficiales provoca que la zona de convergencia intertropical (ZCIT) se desplace sobre el país, hacia el norte en el primer semestre y hacia el sur en el segundo semestre (Poveda, 2004), generando un régimen de precipitación principalmente monomodal en la región Caribe, alcanzando su máximo de precipitación entre mayo y octubre. No obstante, este pico se ve interrumpido por el fenómeno conocido como el veranillo de San Juan, que implica una reducción de la precipitación en un 40% en la región Caribe y el norte de Suramérica (Bernal et al., 2015).

En cuanto a la altitud, se observa un aumento hacia el sur de la región, correlacionado con el promedio anual de la precipitación. Mientras que al norte se registran valores de alrededor de 500 mm/año, hacia la Serranía de Perijá se alcanzan los 2,500 mm/año. Los eventos de tormenta en la región se caracterizan por su ocurrencia al mediodía (entre 11 am y 3 pm) y por ser de corta duración (1 a 3 horas) (Rodríguez & Ávila, 2022), a pesar de esto presentan altas intensidades, generando altos valores de escorrentía. Para realizar un análisis preciso de la precipitación, y diseñar estructuras hidráulicas adecuadas para gestionar la escorrentía, es esencial comprender el comportamiento de la intensidad para diferentes duraciones y periodos de retorno. Esta información se sintetiza en las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF), construidas a partir de registros históricos.

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), que representan patrones pluviométricos específicos de una estación determinada, se crean conectando puntos representativos de intensidad media a lo largo de diversos intervalos de tiempo, todos correspondientes al mismo periodo de retorno (Maldonado, Martínez & Matajira, 2007). Aunque la construcción de estas curvas se realiza a partir de la información pluviográfica disponible, comúnmente plasmada en cartas pluviográficas o pluviogramas, existen métodos alternativos que permiten estimar las curvas IDF utilizando información pluviométrica y características de la estación, entre los que se destacan los propuestos por Chen (1983), Vargas & Díaz-Granados (1998), Pulgarin & Poveda (2009) y UNAL (2016), entre otros.

Según el Catálogo Nacional de Estaciones (CNE) del IDEAM (2019), se tienen instaladas alrededor de 96 estaciones pluviográficas a nivel nacional, algunas de las cuales son recientes y carecen de datos extensos (> 30 años) para generar curvas IDF estadísticamente relevantes. Aunque el IDEAM ha publicado curvas IDF para solo 110 estaciones en el país, situadas principalmente en la región Andina, actualizadas hasta 2010 por el Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH) de la UNAL (2016), tan solo 16 están situadas en la región Caribe, de las cuales solo una se ubica en la región Insular. Por lo tanto, la Costa Caribe cuenta con tan solo el 12.3% de las curvas IDF disponibles en el IDEAM.

En este contexto, el propósito de la investigación presentada es dar continuidad al trabajo iniciado en 2016, y continuado en 2019 (Torres et al., 2021) desarrollando curvas IDF para nuevas estaciones en la región Caribe, esperando contribuir a la disponibilidad regional de información sobre lluvias extremas, sintetizada en curvas IDF, que respaldan el diseño hidrológico de diversas estructuras hidráulicas y la caracterización de lluvias extremas de corta duración.

ZONA DE ESTUDIO

La investigación se centró en la región caribe colombiana, que abarca siete departamentos. Para este estudio se seleccionaron cuidadosamente 26 estaciones con información pluviográfica disponible. De este conjunto, 15 estaciones (etapa 1) ya contaban con curvas IDF actualizadas al año 2010 (UNAL, 2016). Además, se incorporaron 9 estaciones (etapa 2) para las cuales se generaron nuevas curvas IDF (Torres et al., 2021), siendo la primera etapa de este proyecto. Durante el presente trabajo se adicionaron 16 nuevas estaciones (etapa 3). La Figura 1 presenta la localización de las 40 estaciones analizadas (excluyendo las localizadas en la zona insular). Mayoritariamente estas estaciones se encuentran ubicadas en la zona plana, cerca de la costa. Sin embargo, la segunda etapa del proyecto, abordada en este artículo, se enfocó en la construcción de curvas IDF en la parte central y sur de la región.

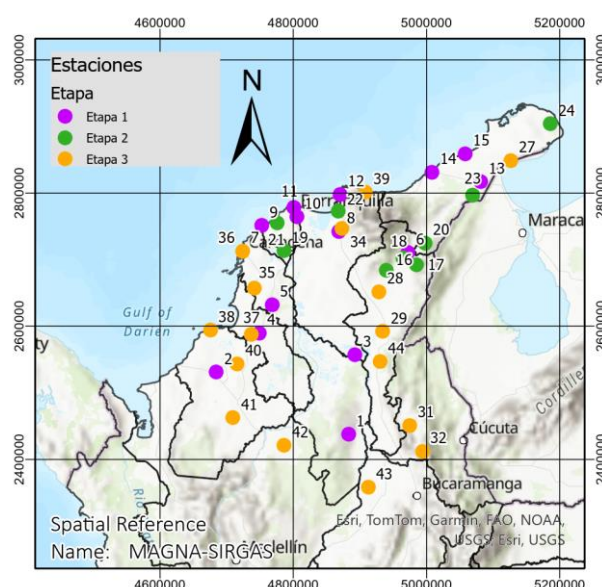


Figura 1.- Localización y códigos de estaciones seleccionadas

Tabla 1.- Localización y códigos de estaciones seleccionadas

Nº	Tipo IDF	Código	Nombre	Nº	Tipo IDF	Código	Nombre
1	Etapa 1	23205030	SANTA ROSA D SIMITI	21	Etapa 2	29045110	JUAN DE ACOSTA
2	Etapa 1	13070150	MOCARI	22	Etapa 2	15015020	YE LA
3	Etapa 1	25025090	AEROPUERTO LAS FLORES	23	Etapa 2	15085030	ESCUELA AGRICOLA CARRAIPIA - AUT
4	Etapa 1	25025080	AEROPUERTO RAFAEL BARVO	24	Etapa 2	15085020	NAZARETH
5	Etapa 1	29015020	CARMEN DE BOLIVAR	25	Etapa 3	15085040	RANCHO GRANDE
6	Etapa 1	28025502	AEROPUERTO ALFONSO LOPEZ -	26	Etapa 3	28035040	GUAYMARAL
7	Etapa 1	14015080	AEROPUERTO RAFAEL NUNEZ	27	Etapa 3	25025250	CHIRIGUANA
8	Etapa 1	29065020	PADELMA	28	Etapa 3	16055040	ABREGO CENTRO ADMO
9	Etapa 1	14015010	GALERAZAMBA - AUT	29	Etapa 3	23195180	ESCUELA AGRICOLA CACHIRA
10	Etapa 1	29045190	AEROPUERTO E. CORTISSOZ - AUT	30	Etapa 3	29065030	PRADO SEVILLA
11	Etapa 1	29045120	FLORES LAS	31	Etapa 3	29035040	NUEVA FLORIDA
12	Etapa 1	15015120	UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA - AUT	32	Etapa 3	14015030	ESCUELA NAVAL CIOH
13	Etapa 1	15085010	AEROPUERTO MAICAO	33	Etapa 3	25025270	UNISUCRE
14	Etapa 1	15065180	AEROPUERTO ALM. PADILLA -	34	Etapa 3	13085030	SAN BERNARDO DEL VIENTO
15	Etapa 1	15075030	MANAURE	35	Etapa 3	13075020	SALADO EL
16	Etapa 2	28035010	VILLA ROSA	36	Etapa 3	25015010	CENTRO ALEGRE
17	Etapa 2	28025020	RINCON EL	37	Etapa 3	27045020	CASERI
18	Etapa 2	28035020	CALLAO EL	38	Etapa 3	24065010	BRISAS LAS HACIENDA
19	Etapa 2	29035080	NORMAL MANATI - AUT	39	Etapa 3	15010300	GUACHACA
20	Etapa 2	28015070	URUMITA	40	Etapa 3	25025330	COLEGIO AGROPECUARIO PAILITAS - AUT



MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de trabajo se presenta en el siguiente diagrama de flujo (Ver Figura 2) y se desarrolla a lo largo del documento:

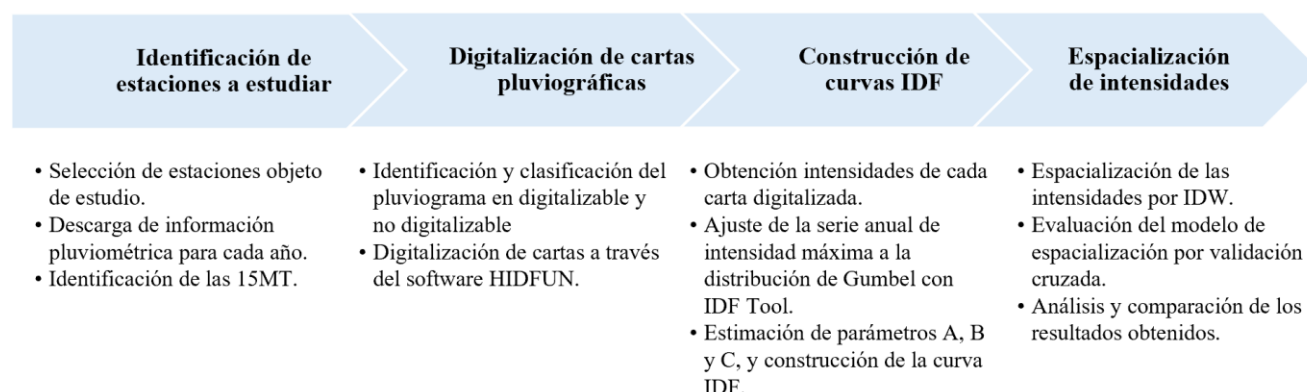


Figura 2.- Diagrama de flujo de la metodología de trabajo

ADQUISICIÓN Y ORGANIZACIÓN DE INFORMACIÓN PRELIMINAR

En una primera fase, se llevó a cabo la identificación de áreas en la región Caribe con evidente crecimiento poblacional, utilizando datos proporcionados por el DANE, INVIAS, IGAC y DNP. Este análisis permitió proyectar la necesidad de diseño y construcción de infraestructura, lo que implica la eventual demanda de curvas IDF para el dimensionamiento de obras hidráulicas, así como para la planeación y gestión de estrategias. Posteriormente, se procedió a identificar estaciones hidroclimatológicas ubicadas en estas zonas, enfocándose en aquellas que no hubieran sido actualizadas en el año 2016 (UNAL, 2016), ni hubieran sido incluidas dentro de la primera etapa de elaboración de curvas IDF de esta investigación (Torres et al., 2021), de igual manera que contaran con un alto número de años con información pluviográfica disponible.

IDENTIFICACIÓN DE ESTACIONES A ESTUDIAR

Durante la fase de identificación de estaciones se consideró cuidadosamente la cantidad de años con registros disponibles en cada una de ellas, priorizando aquellas con un extenso historial, de al menos 23 años. Así, se seleccionaron 16 estaciones resaltadas en color verde en la Figura 1 y Tabla 1. La información pluviométrica diaria para cada estación se obtuvo a través del Sistema de Información para la gestión de Datos Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME) del IDEAM. Así, se identificaron para cada estación las 15 mayores tormentas (MT) registradas en cada año, reconocidas como los eventos que encapsulan las mayores intensidades de precipitación.

La selección de las 15 mayores tormentas se llevó a cabo mediante un script en lenguaje Python, accesible junto con otros recursos desarrollados durante esta investigación, en el siguiente enlace <https://drive.google.com/drive/folders/1pIx4mGHqEboZnaN4hS5rvM6YChxXa2Nz> (Anexo A). Este script, diseñado específicamente para este propósito, identifica para cada año los 15 días con mayor precipitación (15 MT) para cada una de las estaciones, de acuerdo con el registro pluviométrico. El resultado se presenta en una tabla en formato .xlsx que incluye el código de la estación, la fecha y la precipitación en milímetros para cada evento.

DIGITALIZACIÓN DE CARTAS PLUVIOGRÁFICAS

Previo a la digitalización de las cartas pluviográficas correspondientes a las 15 MT previamente identificadas para cada estación, se realizó una selección visual de las cartas pluviográficas escaneadas por el IDEAM. Cada carta fue clasificada como digitalizable, si el trazo del pluviógrafo era claro y podía seguirse fácilmente y no digitalizable en caso contrario, como se muestra en la Figura 3. Se verificó la coherencia entre los valores del registro pluviométrico diario disponibles en el DHIME y la precipitación registrada en los pluviogramas.

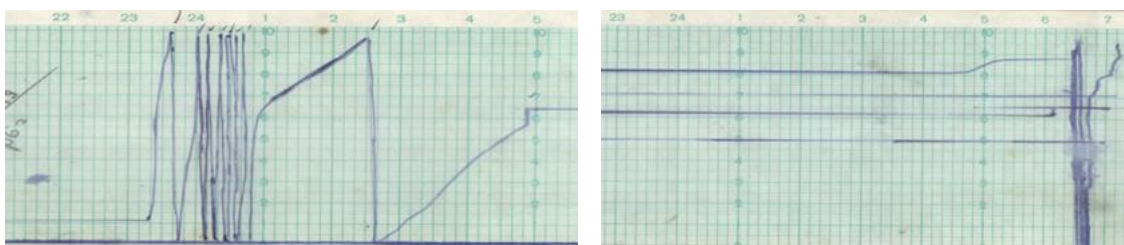


Figura 3.- Carta pluviográfica digitalizable (izquierda) y no digitalizable (derecha).

Adicionalmente, se emplearon criterios complementarios para clasificar las cartas como no digitalizables. Si la precipitación registrada difería significativamente (más del 15%) de la registrada por el pluviómetro, o si el registro del pluviógrafo resultaba ilegible o presentaba manchas, que dificultaban su interpretación, la carta también se clasificaba como no digitalizable. Para identificar otras tormentas relevantes, no contempladas dentro de las 15MT, se llevó a cabo una identificación visual de cartas que mostraran precipitación superior a 10 mm y que además permitieran ser digitalizadas.

Como resultado se generó una tabla detallada para cada estación, en donde para cada uno de los eventos seleccionados se incluye el valor de la precipitación pluviométrica, la fecha de ocurrencia del evento, el nombre de la carta, si era digitalizable o no y si el evento se encontraba dentro de las cartas disponibles. Un ejemplo de este formato se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2.- Ejemplo formato de Excel de registro de información de las cartas para cada evento seleccionado. Cartas digitalizables (SI), no digitalizables (NO), el evento seleccionado no se encuentra dentro de las cartas disponibles (NE) y si la carta existe, es digitalizable pero existe una diferencia importante entre el registro del pluviómetro y el del pluviógrafo para la fecha correspondiente (SI*)

Precipitación (mm)	Año 2002	Nombre archivo de la carta	Digitalizable
32.5	2002-02-07 00:00:00	1298.jpg	NO
31.7	2002-12-16 00:00:00	1376.jpg	SI
30.4	2002-09-23 00:00:00	1345.jpg	SI*
28.6	2002-05-15 00:00:00	NE	NE

En el siguiente paso se digitalizaron las tormentas identificadas utilizando la herramienta semiautomática HIDFUN (UNAL, 2016; Fuentes et al., 2018), desarrollada en la UNAL. HIDFUN es una interfaz gráfica en MATLAB que permite al usuario, trazar digitalmente sobre la carta el registro pluviométrico utilizando el mouse. La información digitalizada se almacena en archivos tipo .csv con las intensidades calculadas, la fecha de la carta y los datos de la curva de masa a intervalos de un minuto. Cada imagen usada durante la digitalización también se guarda automáticamente con el trazo realizado por el usuario en color magenta, como se observa en la Figura 4. En total, se digitalizaron aproximadamente 4000 pluviogramas para las 16 estaciones.

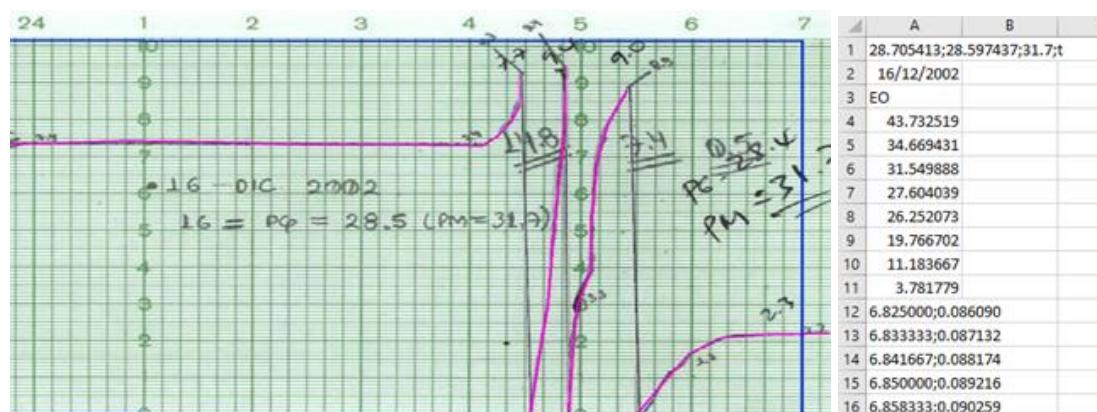


Figura 4.- Resultados del software HIDFUN. Archivo de imagen (izquierda) y archivo de datos de salida (derecha). La línea magenta muestra la digitalización realizada

Para la implementación de HIDFUN se siguieron los siguientes pasos. Se delimita el marco de la carta para un periodo de 24 horas en la escala horizontal, es decir, 7 am a 7 am del día siguiente, en caso de que la carta sea de registro diario. En caso de contar con cartas semanales se define una ventana de 168 horas, correspondientes al periodo de tiempo comprendido entre las 7 am del lunes y las 7 am del lunes de la siguiente semana. Por su parte, la escala vertical se encuentra definida por las líneas de la carta correspondientes a 0 y 10 mm. Luego se hace clic en el punto en donde inicia el registro de precipitación, de allí en adelante, la herramienta, mediante un algoritmo basado en segmentación de la imagen genera sugerencias en el trazado, que pueden ser aceptadas mediante el clic del mouse izquierdo, o rechazadas, haciendo clic derecho en el punto en donde se considera que continúa el registro de precipitación, y se sigue este procedimiento hasta finalizar el trazado realizado por el pluviógrafo. Este proceso culmina con la generación de una imagen con el trazado realizado y un archivo .csv con la curva de masa del evento, así como las intensidades para diferentes duraciones (Ver Figura 4).

Posteriormente, se recopilan en un solo archivo los valores de intensidad calculados por la herramienta HIDFUN para cada evento y para las duraciones de 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120 y 360 minutos. Este proceso se automatizó por medio de un código desarrollado en VBA Excel (consultar el Anexo B en el material suplementario del documento). El archivo resultante contiene el código de la estación, fecha del evento, la intensidad (mm/h) asociada a cada una de las duraciones y el número del evento de precipitación analizado para cada año (ver Tabla 3).

Tabla 3.- Recopilación de valores de intensidad para un evento de la estación 2502527.

Estación	Fecha	Duración	Intensidad	Año	Mes	Día	Eventos
2502527	16/12/2002	5	43.73	2002	12	16	6
2502527	16/12/2002	10	34.67	2002	12	16	6
2502527	16/12/2002	15	31.55	2002	12	16	6
2502527	16/12/2002	20	27.6	2002	12	16	6
2502527	16/12/2002	30	26.25	2002	12	16	6
2502527	16/12/2002	60	19.77	2002	12	16	6
2502527	16/12/2002	120	11.18	2002	12	16	6
2502527	16/12/2002	360	3.78	2002	12	16	6

Finalmente, se identificó la intensidad máxima registrada para cada año y duración, por estación. Estos datos constituyen los insumos fundamentales para la construcción de las curvas IDF, cuyo procedimiento se describe a continuación de manera concisa.



CONSTRUCCIÓN DE CURVAS IDF

La construcción de las curvas IDF se llevó a cabo mediante el uso del paquete estadístico “IDFtool” (Zamora et al., 2016 & UNAL, 2016), desarrollado en el lenguaje de programación R. Este proceso implicó el uso de la tabla de información de series anuales de intensidades máximas de diferentes años y duraciones, como entrada del paquete. Es relevante señalar que se optó por la distribución de probabilidad de Gumbel y el método de ajuste de L-Momentos, de acuerdo con las recomendaciones del estudio realizado por (UNAL, 2016).

La aplicación de IDFtool proporciona las tablas y los gráficos de las curvas IDF, efectuando una evaluación de la bondad de ajuste entre la serie de datos y la función de probabilidad seleccionada. Además, se obtienen los valores de los coeficientes de la ecuación 1, la cual permite calcular la intensidad de la curva IDF en función de la duración (D) y el periodo de retorno (Tr).

$$I(D, Tr) = \frac{A}{(B+D)^C} \quad [1]$$

Donde I son las intensidades (mm/h) para cada período de retorno (Tr en años), D es la duración (min) y A , B y C son los coeficientes, calibrados a través del algoritmo de Levenberg-Marquardt (Moré, 1978).

Utilizando las intensidades obtenidas de cada curva IDF por estación, se llevó a cabo la interpolación de estos valores mediante el método del inverso de la distancia (IDW). Además, se realizó una exhaustiva evaluación de la calidad de la interpolación mediante el método de validación cruzada. Ambos procedimientos se detallan a continuación, los cuales se ejecutaron para duraciones de 15, 30, 60, 120 y 360 minutos y para los periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, teniendo así un total de 35 combinaciones analizadas.

ESPACIALIZACIÓN DE LAS INTENSIDADES Y CARACTERIZACIÓN DE TORMENTAS EXTREMAS

Con base en los resultados obtenidos en la sección anterior, se procedió a la interpolación de las intensidades para cada duración y periodo de retorno seleccionados. Este proceso se llevó a cabo mediante la aplicación del método de la Distancia Inversa Ponderada - IDW expresado en la ecuación 2, utilizando el software ArcGIS. El propósito fundamental de la interpolación fue determinar los valores de la intensidad en aquellas zonas donde no se dispone de información, a partir de los datos conocidos de las estaciones. La metodología de interpolación se fundamenta en la premisa de que las estaciones más cercanas tienen una mayor influencia en la estimación de la variable de la intensidad máxima de la precipitación, especialmente si el punto a estimar es más cercano a dicha estación.

$$I_j = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{1}{r_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i^2}} * I_i \quad [2]$$

Donde I_j es el valor estimado de intensidad para el punto j ; n es el número de puntos usados en la interpolación; I_i el valor de intensidad conocido en el punto i -ésimo y r_i es la distancia cartesiana entre el punto i y el punto j .

Para llevar a cabo la interpolación se empleó un conjunto de datos en shape con el nombre, código, coordenadas y diferentes intensidades para los periodos de retorno y duraciones seleccionadas



para cada una de las 40 estaciones continentales existentes en la región Caribe (sin considerar las estaciones en territorio insular).

COMPARACIÓN ENTRE INTENSIDADES NUEVAS Y EXISTENTES EN LA REGIÓN

La comparación entre las intensidades obtenidas y las ya existentes en la región se llevó a cabo mediante el cotejo de las recién desarrolladas curvas IDF y las existentes. En este análisis se comparó, cada curva para una duración y periodo de retorno dado, para cada estación nueva, contrastando los datos con la curva de la estación existente más cercana, para esa misma duración y periodo de retorno.

ANÁLISIS DEL ERROR DE LA ESPACIALIZACIÓN MEDIANTE VALIDACIÓN CRUZADA

El análisis del error de la espacialización se llevó a cabo mediante el empleo de la validación cruzada (Cross Validation). Esta técnica permite estimar el error de predicción de la interpolación realizada por IDW, evaluando así la capacidad predictiva del modelo aplicado. Este enfoque proporciona información valiosa sobre la calidad de los valores interpolados con IDW y nos permite evaluar posibles cambios en la estimación de la intensidad al incluir una mayor cantidad de estaciones para las diferentes duraciones y periodos de retorno (Melo, 2012).

Para implementar la validación cruzada, se empleó el software ArcGIS y su herramienta *Cross Validation (leave-one-out)*. Se consideraron tres escenarios: i) únicamente las 15 estaciones con curva IDF construida por el IDEAM (UNAL, 2016), ii) teniendo en cuenta las 9 estaciones adicionales construidas en la primera etapa del proyecto (Torres et al., 2021) y iii) añadiendo las nuevas 16 curvas, para un total de 40 estaciones. La métrica utilizada para la comparación de la estimación del error de la predicción fue la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las curvas IDF obtenidas para cada una de las 16 estaciones seleccionadas, detallando las intensidades correspondientes para cada duración y periodo de retorno, así como los valores de los coeficientes A, B y C se encuentran disponibles en el Anexo C, en el material suplementario del presente documento.

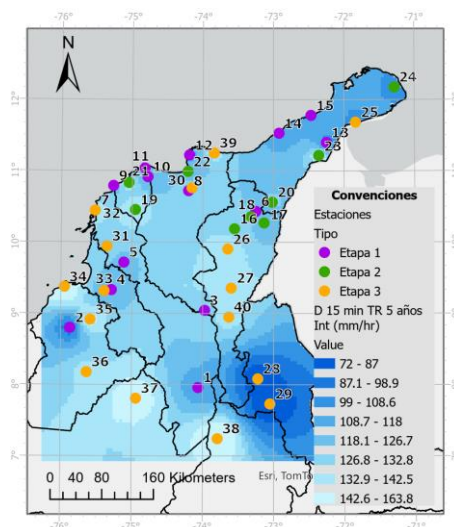
Comparando las 40 curvas IDF contempladas en el presente estudio, se observa un comportamiento similar en cuanto a las intensidades para los diferentes periodos de retorno y duraciones analizadas. Sin embargo, se destaca que las estaciones Abrego Centro Admo [16055040] y Escuela Agrícola Cachira [23195180] presentan intensidades menores al resto de las estaciones, un patrón evidente durante la espacialización (Ver Figura 5, estaciones número 28 y 29). Estas estaciones, ubicadas en el Departamento de Norte de Santander, se encuentran a altitudes muy por encima de las demás estaciones de la región Caribe, a 1430 m.s.n.m. y 1882 m.s.n.m., respectivamente. Al examinar las cuatro estaciones con curvas IDF disponibles en el repositorio del IDEAM para Norte de Santander (con códigos 16015010, 16015020, 16025030 y 16035010), se observa que todas presentan comportamientos similares de intensidad a los calculados en el presente estudio para ese departamento. Esto valida las magnitudes obtenidas para las dos nuevas estaciones.

Además, la variabilidad espacial de las intensidades obtenidas puede entenderse a través del análisis de la precipitación total anual a lo largo de la zona de estudio y del número de días con lluvia al año. Por ejemplo, el promedio anual multianual en el Departamento de Norte de Santander oscila

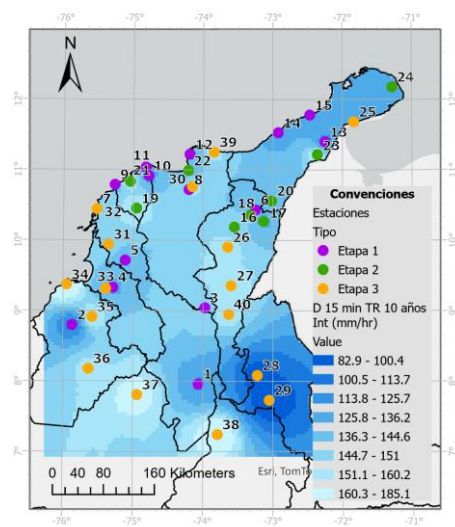
entre 1000 mm y 1500 mm al sur, hasta 4000 mm en cercanías al Parque Nacional Natural del Catatumbo al norte del departamento. En contraste para el resto de la región Caribe, las precipitaciones anuales son en general inferiores a los 1500 mm, y menores a 500 mm en la Alta Guajira (IDEAM, 2014). Asimismo, al analizar el número de días con lluvia anual, se observa que, para Norte de Santander, estos oscilan entre 100 y 150 días, mientras que en los departamentos de la Costa Caribe se sitúan entre 50 y 100 días, y hacia la Alta Guajira entre 0 y 50 días (IDEAM, 2014). Estas variaciones son una de las razones por las cuales a pesar de tener precipitaciones anuales similares con la Costa Caribe Colombiana, las intensidades de Norte de Santander son menores, además de la variabilidad en la temporalidad de cada evento.

VARIABILIDAD ESPACIAL DEL CAMPO DE INTENSIDADES PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

Con el objetivo de entender el comportamiento de las intensidades en ubicaciones en donde no se tiene la información de curvas IDF, y apreciar las bondades de contar con nueva información actualizada, se llevó a cabo la espacialización con el método IDW, tal como se explicó en párrafos anteriores. Este análisis se efectuó para las 40 estaciones con curvas IDF en la región Caribe (excluyendo las 2 en la región insular). Se consideraron duraciones de 15, 30, 60, 120 y 360 minutos, así como periodos de retorno de 2, 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, generando un total de 35 mapas de espacialización de intensidades en la región Caribe. Estos mapas se encuentran detallados en su totalidad en el Anexo D de este documento. A continuación, se presentan específicamente los mapas de espacialización correspondientes a los periodos de retorno de 5, 10, 50 y 100 años y para una duración de 15 minutos.



(a)



(b)

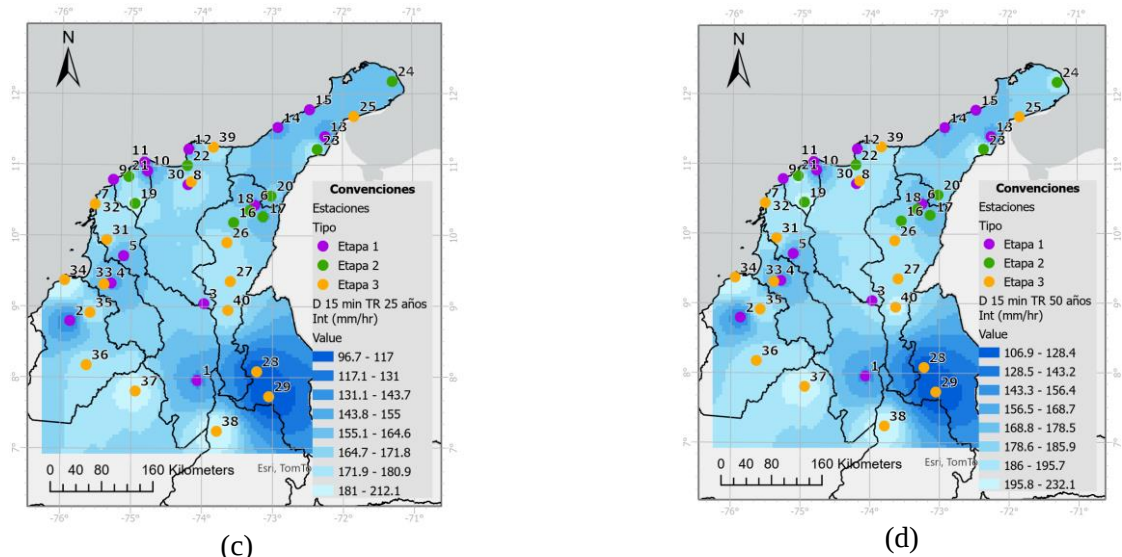


Figura 5.- Interpolación por IDW de las intensidades (mm/h) de las curvas IDF de 40 estaciones en la región Caribe para los periodos de retorno de a) 5 años, b) 10 años, c) 25 años y d) 50 años

El área aproximada de la región Caribe es de 132.297 km² (Banco de la República, 2006) por lo que el presente ejercicio de espacialización a partir de 40 estaciones con una distancia promedio con sus cercanas de 60 kilómetros, es una primera aproximación para conocer la variabilidad espacial de las precipitaciones extremas en el área analizada, sin dejar de lado la incertidumbre y limitaciones debido al limitado número de puntos.

En general, se puede observar que las menores intensidades se encuentran en la zona de Norte de Santander, en la Alta Guajira, así como en Montería y en cercanías a Sincelejo, mientras que las mayores intensidades están al norte de Antioquia, en el sur de Córdoba, alrededor de Barrancabermeja, y en la zona central de Cesar, Magdalena, Bolívar y Atlántico.

Para el periodo de retorno de 5 años, se puede observar que las mayores intensidades se encuentran en Barrancabermeja, al norte de Antioquia y de igual manera al norte de Córdoba. Sin embargo, la estación Mocari [13070150] perteneciente a las estaciones con curva IDF en el repositorio del IDEAM (2017), difiere en intensidades de las 2 adicionales construidas en el presente estudio, también localizadas en el Departamento de Córdoba, San Bernardo del Viento [13085030] y El Salado [13075020], puesto que su intensidad es considerablemente inferior a las calculadas para las últimas dos estaciones. Al analizar con detenimiento estas estaciones, se encuentra que la curva existente tiene una intensidad de 90.9 mm/h, mientras que las dos nuevas de 164.3 mm/h y 146.5 mm/h, lo cual podría deberse a la diferencia en el número de años empleados en la construcción de las curvas, puesto que para la antigua se emplearon solo 13 años, mientras que para las nuevas 20 y 22 años, respectivamente y las intensidades de estas últimas son muy similares entre ellas. También la diferencia puede atribuirse a la cercanía de la estación Mocari a la ciudad de Montería, pudiendo verse afectadas sus mediciones.

El comportamiento descrito anteriormente se puede observar para los diferentes periodos de retorno. A medida que el periodo de retorno aumenta, el campo de intensidades en la zona central de la región Caribe en Departamentos como Cesar, Magdalena, Atlántico y Bolívar, es más homogéneo. De igual manera, para el resto de la región se hace más visible que algunas estaciones no siguen totalmente el patrón de interpolación obtenido, como es el caso de la Alta Guajira.



Por último, en el Departamento de Magdalena, se puede observar que las intensidades son más altas en cercanías del parque Tayrona, mientras que en cercanías de la ciudad de Santa Marta estas disminuyen, presentando una variabilidad espacial considerable, posiblemente asociadas con la Sierra Nevada de Santa Marta.

VALIDACIÓN CRUZADA

Para evaluar la calidad de la espacialización mediante IDW, se usó validación cruzada, evaluando las 35 combinaciones de duraciones y periodos de retorno interpoladas tal como se describió en la sección previa. Los mapas que ilustran el valor del error por cada punto se presentan en el material complementario del presente documento, en el Anexo E. La métrica empleada fue la raíz del error cuadrático medio (RMSE), cuyo análisis se realizó espacial y temporalmente para las diferentes duraciones y periodos de retorno. Adicionalmente, para explorar los posibles beneficios de contar con un mayor número de estaciones con curva IDF, se evaluaron 3 escenarios en la validación cruzada. El primero (ver Tabla 4.a) incorpora solo las 15 estaciones con curva IDF construida por el IDEAM (UNAL, 2016). El segundo escenario, representado por el anterior más las 9 estaciones adicionales construidas en la primera etapa del proyecto (ver Tabla 4.b) (Torres et. al, 2021). Finalmente, el tercer escenario, agrega las nuevas 16 curvas, para un total de 40 estaciones (ver Tabla 4.c).

Los resultados obtenidos para cada uno de estos escenarios, analizados por duración y periodo de retorno, se presentan a continuación. En las Tablas 4.a, 4.b y 4.c los tonos rojizos indican errores más altos, mientras que los verdes, representan errores más pequeños.

Tabla 4.- Error cuadrático medio (RMSE) obtenido para cada uno de los escenarios.

Duración / Tr	2	3	5	10	25	50	100	Promedio
15	10,9	10,5	10,6	11,5	13,6	15,7	17,9	13,0
30	9,1	9,5	10,4	12,0	14,6	16,8	19,0	13,0
60	6,2	7,2	8,5	10,4	13,0	15,1	17,1	11,1
120	4,0	4,6	5,4	6,6	8,1	9,3	10,6	7,0
360	1,5	1,9	2,2	2,7	3,4	3,8	4,3	2,8
Promedio	6,4	6,7	7,4	8,7	10,5	12,1	13,8	9,4

(a) RMSE Escenario 1

Duración / Tr	2	3	5	10	25	50	100	Promedio
15	12,6	13,0	13,9	15,4	17,9	20,1	22,4	16,5
30	9,1	9,1	9,4	10,4	12,2	13,9	15,6	11,4
60	6,4	6,7	7,5	8,8	10,8	12,5	14,3	9,6
120	4,2	4,6	5,4	6,5	8,1	9,4	10,7	7,0
360	2,0	2,4	2,9	3,6	4,5	5,2	5,9	3,8
Promedio	6,8	7,2	7,8	8,9	10,7	12,2	13,8	9,6

(b) RMSE Escenario 2

Duración / Tr	2	3	5	10	25	50	100	Promedio
15	17,5	18,0	18,9	20,4	22,7	24,6	26,7	21,3
30	13,3	13,6	14,1	15,1	16,8	18,3	20,0	15,9
60	9,4	9,6	10,2	11,4	13,2	14,9	16,6	12,2
120	5,9	6,3	7,0	8,1	9,7	10,9	12,3	8,6
360	2,5	2,9	3,3	4,0	4,9	5,6	6,3	4,2
Promedio	9,7	10,1	10,7	11,8	13,5	14,9	16,4	12,4

(c) RMSE Escenario 3

En los tres escenarios, los mayores errores en la espacialización se presentan para las menores duraciones y los periodos de retorno más altos, mientras que los menores errores se observan para los casos opuestos. Este patrón de errores se relaciona con la magnitud de las intensidades obtenidas para cada curva, ya que para menores duraciones y grandes periodos de retorno las intensidades son mayores, lo que conlleva a una mayor variabilidad de estas, por lo tanto, a un mayor error al intentar predecirlas.

Al comparar los errores promedio obtenidos para los escenarios 1, 2 y 3 de 9.4 mm, 9.6 mm y 12.4 mm, respectivamente, se observa que el RMSE aumenta. Aunque se anticipaba que la inclusión de un mayor número de estaciones en la interpolación reduciría el RMSE debido a la nueva información en localizaciones previamente desconocidas, este aumento del error se puede explicar debido a que se

está representando mayor variabilidad de las intensidades en el área de estudio con las nuevas estaciones. En el escenario 1, con el menor número de estaciones el campo de intensidades era más homogéneo, por lo tanto, más fácil de predecir su valor en puntos desconocidos.

Además, la expansión del área analizada hacia el sur, con la inclusión de puntos adicionales, permite capturar las variaciones de las intensidades por accidentes topográficos y regímenes climáticos de los diferentes departamentos. Para lograr un modelo de interpolación que logre representar adecuadamente la variabilidad de las intensidades, es necesario contar con más estaciones como datos de entrada. El aumento del error también se atribuye a la inclusión de los nuevos departamentos, Norte de Santander y la zona norte de Antioquia que cuentan pocas estaciones.

La distribución espacial del RMSE se presenta en la figura 6. Los puntos con mayor error para el tercer escenario se encuentran en los departamentos de Córdoba y Santander, en las estaciones 38, 34, 2 y 29, con errores desde 26.63 mm/h hasta 37.49 mm/h. Estas estaciones, al estar al borde del área interpolada, carecen de suficiente información circundante para realizar una predicción precisa de las intensidades. Por otro lado, los menores errores en la predicción se obtuvieron para las estaciones 33, 16, 4 y 10, que cuentan con una mayor densidad de puntos alrededor, con valores de 3.70 hasta 5.36 mm/h, ubicados en los departamentos de Sucre, Cesar y Atlántico, en zonas en donde hay una buena densidad de estaciones cercanas al punto analizado, mejorando así la predicción.

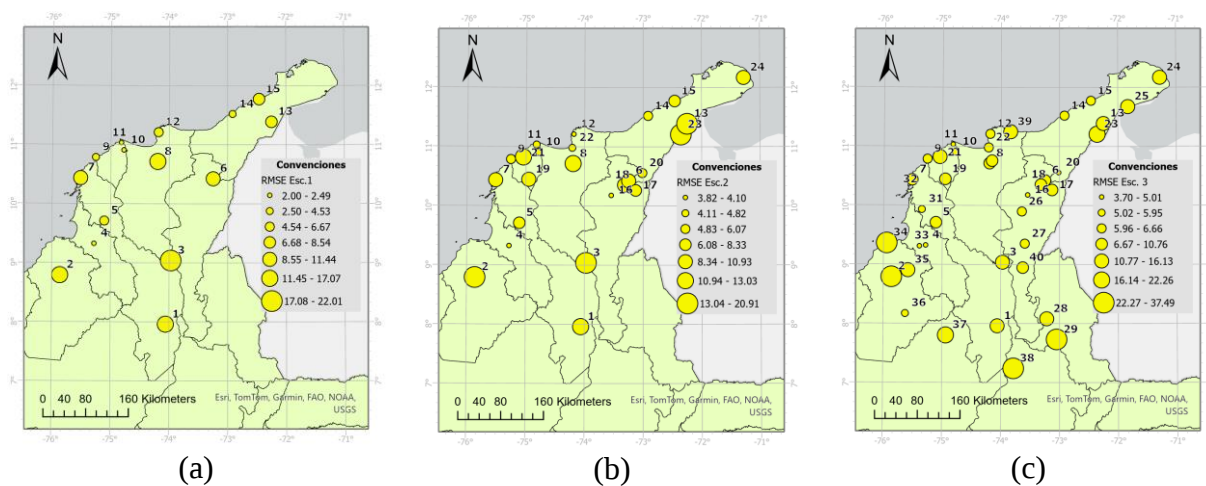


Figura 6.- RMSE por punto para los 3 escenarios, (a) escenario 1, (b) escenario 2, (c) escenario 3.

Con la información previamente descrita, se llevó a cabo una comparación entre los valores del error obtenidos para cada estación en los diferentes escenarios, con el objetivo de evaluar si se observaba un aumento o disminución en dichos valores. Al analizar las zonas con mayor densidad de puntos, como el norte del Atlántico, del Magdalena y del Cesar, no se evidencia una tendencia clara en cuanto al aumento o disminución del RMSE. Esto se debe a que, al revisar puntos con información nueva circundante, se observa tanto una disminución, como un aumento en el error, lo que resalta la complejidad del campo de intensidades en estas regiones. Como se ha señalado en secciones anteriores, la cantidad de puntos utilizados en la espacialización resulta insuficiente, considerando la magnitud del área que se está interpolando. Además, al incluir más puntos desde el escenario 1 hasta el escenario 3 analizado, se logra una representación más precisa de la variabilidad en la zona, sin embargo, aún no se alcanza un modelo de predicción con mínimo error.



CONCLUSIONES

Con base en el presente estudio se lograron obtener 16 curvas IDF adicionales para la región Caribe colombiana, construidas a partir de la digitalización de alrededor de 4000 cartas pluviográficas escaneadas y el uso de diferentes herramientas computacionales, sumando un total de 42 curvas. Este trabajo incluyó un análisis de la variación temporal y espacial de las intensidades, así como la validación del modelo de predicción por IDW, para puntos sin información de intensidades.

Las intensidades calculadas para las nuevas curvas IDF, en su mayoría, mantienen un mismo orden de magnitud a aquellas estaciones que ya contaban con curvas, salvo excepciones, como las estaciones en Norte de Santander, donde se evidencia una clara diferencia debida al cambio de régimen de precipitación y de altitud. Un caso similar se presenta en una estación cercana a la ciudad de Montería.

Es crucial tener en cuenta que las intensidades obtenidas no son una variable aislada y están correlacionadas con otras, como la precipitación anual, el número de días con lluvia, y la variabilidad climática asociada con fenómenos como El Niño, La Niña y el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical, entre otros.

Las mayores intensidades se registran en Barrancabermeja, al norte de Antioquia y al norte de Córdoba, mientras que las menores intensidades se observan en Norte de Santander, al sur de Bolívar y en menor medida en la Alta Guajira. Por otro lado, en los Departamentos de Cesar, Magdalena, Atlántico, Bolívar y Sucre, que conforman la zona central de la Región Caribe se presentan intensidades medias, caracterizando una región con valores homogéneos en general. Este patrón se mantiene consistente para los diferentes periodos de retorno y duraciones analizadas.

El error de la predicción de la interpolación, calculado por validación cruzada, va aumentando conforme se adicionan más estaciones al ejercicio, debido a la expansión del área de análisis, y la representación de una mayor variabilidad. Esta complejidad hace más difícil predecir un punto con valores desconocidos, en comparación con una interpolación con menores estaciones, donde la superficie de las intensidades es más homogénea.

Al analizar el cambio del RMSE para las estaciones entre los diferentes escenarios, no se identifica una tendencia general de aumento o disminución. Esto destaca la insuficiencia de estaciones para representar detalladamente la variabilidad del campo de intensidades en la región, incluso en áreas con una concentración mayor de estaciones, como en cercanías a Barranquilla y Santa Marta.

Gracias a la construcción de las 26 curvas IDF en la región Caribe durante las dos etapas del presente proyecto, se contribuye significativamente al diseño hidrológico y de estructuras hidráulicas para el drenaje vial. Sin embargo, es importante destacar que aún queda trabajo pendiente en cuanto a la construcción de curvas nuevas y la actualización de las ya existentes.

Las curvas IDF desarrolladas durante esta investigación (Anexo C), el mapa de estaciones y los mapas de espacialización de intensidades para cada una de las duraciones y periodos de retorno considerados (Anexo D) y los mapas de error de validación cruzada (Anexo E), se encuentran disponibles en <https://drive.google.com/drive/folders/1pIx4mGHqEboZnaN4hS5rvM6YChxXa2Nz>. De igual forma, como material complementario, allí se presenta el código en Python generado para la identificación de las 15 MT (Anexo B) y las macros en VBA Excel (Anexo A) implementados durante el procesamiento de información de las cartas pluviográficas.



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería de la UNAL por su apoyo a este proyecto a través de la Convocatoria a Semilleros de Investigación 2022.

REFERENCIAS

- Banco de la República** (2006). Geografía física y poblamiento en la Costa Caribe colombiana. Cartagena de Indias. Recuperado de <https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-73.pdf>
- Bernal et al.** (2015). Manifestaciones oceanográficas del “Veranillo de San Juan” en la cuenca Colombia, mar Caribe. XVI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar - COLACMAR y XVI Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar
- Chen, C-I.** (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12): 1603-1621
- Fuentes, C., Rodríguez, E., & Villareal, E.** (2018). HIDFUN una herramienta para la extracción y análisis de pluviogramas.: XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales** (2014). Atlas Climatológico de Colombia 1981-2010. Consultado en <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales** (2021). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos. Recuperado de <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales** (2017). Curvas IDF. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales** (2019). Catálogo Nacional de Estaciones (CNE) [Archivo Excel]. Bogotá, Colombia.
- IDEAM-UNAL.** (2016). Estudio de Actualización y Análisis Comparativo de las Curvas Intensidad, Duración y Frecuencia Disponibles en el IDEAM. Convenio Interadministrativo No. 113 de 2016. Bogotá D.C.
- Maldonado, J., Martínez, A., & Matajira, F.** (2007). ELABORACIÓN CURVAS IDF ESTACIONES: CINERA VILLA OLGA T SANTA ISABEL- MUNICIPIO DE CÚCUTA, Colombia. *Revista Ambiental*, 80-94.
- Melo, C. E.** (2012). Análisis Geoestadístico Espacio Tiempo Basado en Distancia y Splines con Aplicaciones. Universidad de Barcelona, 37-40.
- Moré J.J.** (1978). The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. In: Watson G.A. (eds) Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics, vol 630. Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0067700>
- Poveda Jaramillo, G.** (2004). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria.
- Pulgarín Dávila, E. G., & Poveda Jaramillo, G.** (2009). Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad-frecuencia-duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (Región Andina Colombiana). Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Rangel, J.O., & Carvajal, J.E.** (2012). Clima de la Región Caribe Colombiana. En Rangel, J.O. (Editores). Colombia Diversidad Biológica XII: La región Caribe de Colombia, pp. 67–129. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Rodríguez, E., & Ávila, K.** (2022). Caracterización sub-diaria de tormentas extremas en Colombia.



XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica

Torres, L., Agudelo, L., Rincón, F., Mercado, I., Guzmán, D., Bayona, Julián, Cuavas, J., Bonilla, A., Ochoa, N., Villamizar, A., Rodríguez, E., Velandia, K. & Reyes G. (2021). Un aporte a la caracterización de lluvias extremas en el Caribe Colombiano a través de la construcción de curvas intensidad- duración- frecuencia. Aceptado para presentación oral en el XXIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología a realizarse de forma virtual en septiembre de 2021.

Universidad Nacional de Colombia (UNAL) (2016). Estudio de actualización y análisis comparativo de las curvas IDF disponibles en el IDEAM. Informe Final

Vargas M, R. Díaz-Granados O., M. (1998). Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. In: *XIII Seminario de Hidráulica e Hidrología*, Sociedad Colombiana de Ingenieros. Cali, agosto 1998.

Zamora A., D. A., Figueroa O., C. Albeiro., Rodríguez s., E. A. & Piña F., A. P. (2016). dazamora/IDFtool. GitHub. Plataforma R. <https://github.com/dazamora/IDFtool>