

REGIONALIZACIÓN DE CURVAS IDF EN EL NOROCCIDENTE DEL META

REGIONALIZATION OF IDF CURVES IN THE NORTHWEST OF META

Universidad Santo Tomás, facultad de ingeniería civil, santiagoardila@usantotomas.edu.co

Universidad Santo Tomás, facultad de ingeniería civil, ivan.acosta@usantotomas.edu.co

Resumen: El presente proyecto aborda la regionalización de curvas de intensidad, duración y frecuencia mediante el método de isolíneas, a partir de la interpolación IDW de estaciones hidrometeorológicas, tomando como región de estudio el noroccidente del departamento del Meta-Colombia. La metodología consiste en realizar el cálculo correspondiente de curvas IDF para 17 estaciones en la zona de estudio, a partir de un análisis previo de las intensidades registradas por cada estación. Para ello se usa la distribución de Gumbel con la cual se calcularán las intensidades máximas para diferentes periodos de retorno, para luego determinar los parámetros que describen la ecuación de curvas IDF de Bernard (1932) mediante un análisis de correlación lineal múltiple. Dichos parámetros se interpolaron mediante el software ArcMap, generando mapas de isolíneas que presentaron porcentajes de error máximos de 17.45% en las zonas de menor concentración de estaciones.

Palabras clave: Regionalización, IDF, intensidad, isolíneas, pluviómetro, pluviógrafo, precipitación.

Abstract: This project addresses the regionalization of curves of intensity, duration and frequency using the isolines method, based on the IDW interpolation of hydrometeorological stations, taking as the study region the northwest of the department of Meta-Colombia. The methodology consists in carrying out the corresponding calculation of IDF curves for 17 stations in the study area, based on a previous analysis of the intensities recorded by each station. For this, the Gumbel distribution is used with which the maximum intensities for different return periods will be calculated, and then determine the parameters that describe the equation of Bernard's IDF curves (1932) by means of a multiple linear correlation analysis. These parameters were interpolated using the ArcMap software, generating isolines maps that showed maximum error rates of 17.45% in the areas with the lowest concentration of stations.

Keywords: Regionalization, IDF, intensity, isolines, pluviograph, pluviometer, precipitation.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene como objetivo principal determinar el comportamiento de las precipitaciones en los lugares donde no se cuenta con estaciones pluviográficas, o donde la información existente no tiene la longevidad suficiente para generar una proyección confiable, para así estimar los caudales de diseño necesarios para la construcción de estructuras hidráulicas dentro de la zona de estudio. Para ello se realiza la regionalización de curvas IDF usando métodos de interpolación como IDW, los cuales permiten a través de mapas de isolíneas obtener información confiable en zonas sin instrumentación.

En cuanto al estado del arte existen diferentes métodos como el desarrollado por (Ghanmi, H., Bargaoui, Z., Mallet, C.) [1], quienes proponen usar la hipótesis de invarianza de escala simple, donde se analiza la información de lluvia diaria para determinar curvas IDF en zonas no aforadas del norte de Túnez. Al tener información pluviométrica lo suficientemente extensa de las estaciones cercanas, se puede combinar la hipótesis de escala simple con el modelo de Gumbel para intensidades máximas de lluvia, lo cual les permitió desarrollar una metodología para calcular las curvas IDF tomando como base la lluvia total diaria.

En el trabajo de (López, P., Maza, J., Burgos, V., Vargas, A., Fornero, A., Bonilla, J.) [2] desarrollan una metodología para la regionalización, la cual hace uso de las características climáticas y morfológicas para calcular curvas de duración de caudales en lugares sin instrumentación. En su investigación describen que las curvas se pueden estimar con series de caudales medio mensuales, con grandes periodos de registro (más de 15 años de información). Además, mencionan que, para ajustar las curvas a un modelo matemático, esto se puede hacer mediante modelos de regresión donde se consideran la precipitación media anual, el área de la cuenca y su respectivo índice de compacidad.

Autores nacionales como (Mesa, O., Vélez, J., Giraldo, J. and Quevedo, D.) [3] mencionan que el objetivo de la regionalización hidrológica de una cuenca es deducir la respuesta hidrológica teniendo como base sus características geomorfológicas. Así mismo argumentan la posibilidad de relacionarlas con las

características climáticas de una zona sin información, para luego relacionar todas esas características con las características medias de los caudales máximos.

Por otra parte, el trabajo de (Becerra, J. and Sánchez, L.) [4] desarrolla la regionalización de curvas IDF en el departamento de Cundinamarca, para lo cual obtienen datos de 7 estaciones meteorológicas ubicadas en la sabana occidental, sobre las cuales construyen las respectivas curvas IDF, para luego tratar los resultados mediante distribuciones de Gumbel y las correspondientes pruebas de bondad de ajuste. En este estudio los autores aplican métodos estadísticos, los cuales obedecen criterios de correlación de las intensidades con respecto a variables topográficas de la zona de estudio. Para el análisis de las diferencias utilizan métodos de interpolación que involucran las intensidades y los parámetros Alfa y u, para posteriormente evaluarlas en el software ArcGIS, con lo cual se determina el modelo que mejor se ajusta para la región a estudiar.

En cuanto al desarrollo de ecuaciones para generar curvas IDF para Colombia, se encuentra el trabajo realizado por (Vargas, R. and Diaz, M.) [5] de la Universidad de los Andes. En su estudio titulado “Curvas sintéticas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia” los autores recopilan alrededor de 150 curvas IDF para distintas estaciones del país, para posteriormente aplicar un filtro, considerando solo confiables aquellas construidas con registros pluviométricos mayores a 10 años. Los autores toman como referencia la ecuación propuesta por Kothyari y Garde, pero siendo ésta modificada, ajustándose con la información de las estaciones de cada zona de Colombia, de tal manera que se construye una ecuación que toma en cuenta tres parámetros importantes: Número de días con lluvia al año, precipitación media anual en mm y el valor máximo de precipitación media diaria. No obstante, en el caso de la región Orinoquia, la ecuación construida solo tomó en cuenta datos de 4 estaciones, debido a la falta de información que existía en esa época. A raíz de esto los autores advierten que para la construcción de curvas IDF para dicha región en específico sería recomendable la utilización de ecuaciones no regionalizadas.

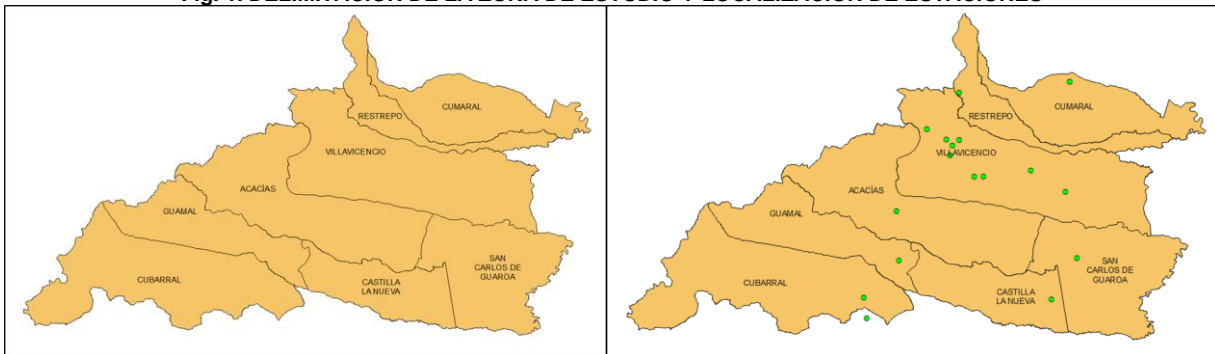
Para procesos de validación autores como (Muñoz, J. and Zamudio, E.), quienes presentan en su trabajo una regionalización de ecuaciones para el cálculo de curvas IDF en el departamento de Boyacá, exponen que para demostrar la validez de su investigación se deben tomar estaciones que no hayan sido contempladas en el estudio, para luego comparar el cálculo de intensidades por el método convencional frente al desarrollado en el trabajo. [6]

2. METODOLOGÍA

La investigación se realizó en el noroccidente del departamento del Meta. Dicha zona se compone de 8 municipios: Villavicencio, Restrepo, Cumaral, Acacias, San Carlos de Guaroa, Castilla la Nueva, Guamal y Cubarral. Éstos comparten algunas características, entre ellas la altitud y la temperatura.

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron datos de 17 estaciones meteorológicas con información completa y continua. Dichos datos fueron proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La localización de las estaciones sobre la zona de estudio se presenta en la Fig. 1.

Fig. 1. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y LOCALIZACION DE ESTACIONES



Fuente: autor

Cabe resaltar que, de las 17 estaciones, solo 7 poseen registros de pluviógrafo. Las demás no cuentan con este tipo de tecnología, por lo que para la construcción de las curvas IDF se aplica una metodología diferente en función del tipo de estación.

Las estaciones seleccionadas para el estudio se resumen en las tablas I y II.

**TABLA I
ESTACIONES CON PLUVIÓGRAFO**

CÓDIGO	ESTACIÓN	MUNICIPIO
35030040	Acueducto la esmeralda	Villavicencio
35030100	Alcaldía	Villavicencio
35030090	Buenavista	Restrepo
35045020	Cabaña la hacienda	Cumaral
35030030	Sena	Villavicencio
35030290	Servita	Villavicencio
35035070	Unillanos	Villavicencio

Fuente: autor

**TABLA II
ESTACIONES CON PLUVIÓMETRO**

CÓDIGO	ESTACIÓN	MUNICIPIO
35010020	Acacias	Acacias
35035020	Aeropuerto vanguardia	Villavicencio
35035010	Base aérea Apiay	Villavicencio
32060060	Calime	El Dorado
35010070	Guamal	Guamal
35030050	Ojo de agua	Villavicencio
35020060	Pompeya	Villavicencio
32060030	San Luis Cubarral	Cubarral
35010060	Toro el	Castilla La Nueva
35010150	Yaguarito	San Carlos De Guaroa

Fuente: autor

2.1. Procedimiento estaciones con Pluviógrafo

Para el desarrollo de la investigación, primero se analizó la información obtenida de las estaciones pluviográficas, la cual permitiría adaptar las estaciones pluviométricas, de manera que pudieran ser de utilidad para la construcción de curvas IDF regionalizadas.

A modo de ejemplo se presenta el desarrollo de esta metodología con los datos de la estación denominada Alcaldía.

2.1.1. Clasificación de la información

Para este tipo de estaciones se utiliza la metodología descrita por Pizarro [7], la cual consiste en analizar los pluviogramas de cada estación proporcionados por el IDEAM, con el objetivo de establecer las intensidades máximas anuales en periodos de 1,2,4,6,8,12 y 24 horas. Para la estación Alcaldía se obtuvieron más de 900 registros, los cuales abarcaban los años 1993 hasta 2010.

En la TABLA III se presentan los resultados del análisis de registros pluviográficos correspondientes con la estación Alcaldía, para intervalos de 1,2,4,6,8,12 y 24 horas.

**TABLA III
PRECIPITACIÓN MÁXIMA (MM) ASOCIADA A 1 HORA – ESTACIÓN ALCALDÍA**

Año	Duraciones (hr)						
	1	2	4	6	8	12	24
1995	30	52.4	69.4	92.4	102.4	114.5	119.9
1996	38.8	58.2	173.9	174.4	179.3	179.3	179.3
1997	33	56.5	88	110.8	123.3	160.6	181.1
1998	80	120	145	146.2	146.2	146.2	146.2
1999	40.8	56.5	87.1	89.1	96.5	101.1	112.7
2000	51	81.6	113.3	123.5	128.8	128.8	135.5
2001	33.2	70.2	82.7	83.2	101.2	120.2	122
2002	81.6	99	119.4	134.2	136.9	138.6	138.7
2003	71.5	109.9	119.5	154.8	156.3	158.7	184.2
2004	47.5	53.2	100.2	124	133.4	133.4	141.6
2005	76	99.4	128	128.9	128.9	128.9	130.5
2006	37.6	56.4	106.4	122.2	127.2	145.2	148.8
2007	50	57	60.2	94.2	94.2	94.2	96
2008	69.3	103.1	142.7	159.3	176.8	182.8	187
2009	36.4	42.9	76	78.4	99.2	145.2	160.1
2010	43	83.8	124.6	132.6	133.4	133.4	133.4

Fuente: autor

Luego de determinar las intensidades máximas, estas se dividieron por su duración en horas siguiendo la metodología de Témex [8], obteniéndose de esta forma las intensidades máximas anuales en mm/hr, las cuales deben ser organizadas de mayor a menor como se presenta en la TABLA IV.

**TABLA IV
INTENSIDAD MÁXIMA HORARIA ANUAL (mm/hr) - ESTACIÓN ALCALDÍA**

Año	Duraciones (hr)						
	1	2	4	6	8	12	24
1995	81.6	60.0	43.5	29.1	22.4	15.2	7.8
1996	80.0	55.0	36.3	26.6	22.1	14.9	7.7
1997	76.0	51.6	35.7	25.8	19.5	13.4	7.5
1998	71.5	49.7	32.0	24.4	18.3	13.2	7.5
1999	69.3	49.5	31.2	22.4	17.1	12.2	6.7
2000	51.0	41.9	29.9	22.1	16.7	12.1	6.2
2001	50.0	40.8	29.9	21.5	16.7	12.1	6.1
2002	47.5	35.1	28.3	20.7	16.1	11.6	5.9
2003	43.0	29.1	26.6	20.6	16.1	11.1	5.8
2004	40.8	28.5	25.1	20.4	15.9	11.1	5.6
2005	38.8	28.3	22.0	18.5	15.4	10.7	5.6
2006	37.6	28.3	21.8	15.7	12.8	10.7	5.4
2007	36.4	28.2	20.7	15.4	12.7	10.0	5.1
2008	33.2	26.6	19.0	14.9	12.4	9.5	5.0
2009	33.0	26.2	17.4	13.9	12.1	8.4	4.7
2010	30.0	21.5	15.1	13.1	11.8	7.9	4.0

Fuente: autor

Con la información de la tabla, se procede a aplicar las funciones de distribución de probabilidad típicas en la hidrología, tales como Gumbel, normal y log-normal; de las cuales se debe seleccionar una para

representar la información de todas las estaciones bajo estudio. Para ello se utilizan las pruebas de bondad de ajuste como lo son, el test de Kolmogórov-Smirnov y coeficiente de determinación R².

Una vez aplicadas las tres distribuciones de probabilidad, y las correspondientes pruebas de bondad de ajuste, se determina que Gumbel es la distribución que mejor se ajusta en la mayoría de estaciones, por lo cual, para realizar la regionalización, la información de todas las estaciones se ajustó a esa función, esto para tener homogeneidad y evitar conflictos debido a la diferencia existente entre distribuciones de probabilidad.

2.1.2. Precipitación máxima horaria asociada a un periodo de retorno

Una vez determinado que el mejor ajuste corresponde a Gumbel, se procede a calcular la precipitación máxima en diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 500 años). Para ello se utilizan los parámetros de escala y ubicación (α y μ) los cuales se obtuvieron empleando las ecuaciones (1) y (2) respectivamente.

Según Chow [9] estas ecuaciones se expresan de la siguiente forma:

$$u = \bar{x} - 0.5772\alpha \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}s}{\pi} \quad (2)$$

Donde:

\bar{x} : promedio de datos de la muestra.

s: desviación estándar.

Después siguiendo la metodología de Gumbel para valores extremos se aplica la ecuación (3) con la cual se obtuvieron los valores máximos de precipitación para las duraciones de análisis, evaluando diferentes periodos de retorno.

$$x_T = \mu + \alpha y_T \quad (3)$$

Donde y_T se calcula con la ecuación (4)

$$y_T = -Ln \left[Ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \quad (4)$$

Los resultados de este proceso se muestran en la TABLA V.

TABLA V
VALORES MÁXIMOS DE PRECIPITACIÓN ESPERADOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO – ESTACIÓN ALCALDÍA

Duraciones	1 h	2 h	4 h	6 h	8 h	12 h	24 h
2 años	48.24	35.49	25.87	19.51	15.58	11.18	5.85
5 años	64.32	46.32	32.67	23.74	18.52	13.00	6.85
10 años	74.96	53.48	37.17	26.54	20.47	14.21	7.51
25 años	88.40	62.54	42.86	30.08	22.93	15.73	8.35
50 años	98.38	69.25	47.08	32.70	24.75	16.86	8.97
100 años	108.28	75.92	51.27	35.31	26.56	17.98	9.59
200 años	118.14	82.57	55.45	37.91	28.37	19.10	10.21
500 años	131.16	91.33	60.95	41.33	30.75	20.58	11.02

Fuente: autor

2.1.3. Determinación de parámetros de la ecuación de Bernard

Con el paso del tiempo muchos autores han propuesto ecuaciones para el cálculo de intensidad de lluvia con objeto de generar curvas IDF, pero es hasta 1932 cuando Bernard propuso una ecuación general para dichas curvas. [5]

$$I = a \cdot \frac{T^b}{t^c} \quad (5)$$

Donde I es la intensidad media en mm/h, T es tiempo de retorno en años, t es duración en horas y a, b y c son constantes determinadas por el lugar, las cuales se determinan por correlación lineal múltiple. Para realizar dicho análisis, el primer paso es tomar los logaritmos de la ecuación, obteniendo:

$$\log I = \log a + b \log T - c \log t \quad (6)$$

O bien:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (7)$$

Donde:

$$\begin{array}{ll} y = \log I & a_0 = \log a \\ a_1 = b & x_1 = \log T \\ a_2 = -c & x_2 = \log t \end{array}$$

Al hacer un ajuste de correlación lineal múltiple de una serie de tres tipos de datos, se obtiene un sistema de ecuaciones como el siguiente:

$$\begin{aligned} \sum y &= N a_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \\ \sum (x_1 y) &= a_0 \sum x_1 + a_1 \sum (x_1)^2 + a_2 \sum (x_1 x_2) \\ \sum (x_2 y) &= a_0 \sum x_2 + a_1 \sum (x_1 x_2) + a_2 \sum (x_2)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Donde N es el número de datos y las incógnitas a_0 , a_1 y a_2 ; X_1 , X_2 y "y" son, respectivamente, los logaritmos del periodo de retorno, la duración y la intensidad, obtenidos de un registro de precipitación. [10]

Para determinar los parámetros de la ecuación de Bernard, es necesario organizar la información de la TABLA V de mayor a menor, tal como se presenta en la TABLA VI. Así mismo de deben expresar las duraciones en minutos para efectos de cálculo.

TABLA VI
INTENSIDAD ORDENADA PARA CORRELACIÓN – ESTACIÓN ALCALDÍA

ORDEN	T años	INTENSIDADES						
		60 min	120 min	240 min	360 min	480 min	720 min	1440 min
1	500.00	131.16	91.33	60.95	41.33	30.75	20.58	11.02
2	200.00	118.14	82.57	55.45	37.91	28.37	19.10	10.21
3	100.00	108.28	75.92	51.27	35.31	26.56	17.98	9.59
4	50.00	98.38	69.25	47.08	32.70	24.75	16.86	8.97
5	25.00	88.40	62.54	42.86	30.08	22.93	15.73	8.35
6	10.00	74.96	53.48	37.17	26.54	20.47	14.21	7.51
7	5.00	64.32	46.32	32.67	23.74	18.52	13.00	6.85
8	2.00	48.24	35.49	25.87	19.51	15.58	11.18	5.85

Fuente: autor

Con los datos de la tabla anterior, se procede a calcular las variables que componen el sistema de ecuaciones para cada duración. Este procedimiento se evidencia en la TABLA VII; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para una duración de 60 minutos.

**TABLA VII
REGRESIÓN DURACIÓN DE 60 MINUTOS – ESTACIÓN ALCALDÍA**

Nº	x ₂	x ₁	y	x ₁ y	x ₂ y	x ₁ ²	x ₂ ²	x ₁ x ₂
1	1.778	2.699	2.118	5.716	3.766	7.284	3.162	4.799
2	1.778	2.301	2.072	4.769	3.685	5.295	3.162	4.092
3	1.778	2.000	2.035	4.069	3.618	4.000	3.162	3.556
4	1.778	1.699	1.993	3.386	3.544	2.886	3.162	3.021
5	1.778	1.398	1.946	2.721	3.461	1.954	3.162	2.486
6	1.778	1.000	1.875	1.875	3.334	1.000	3.162	1.778
7	1.778	0.699	1.808	1.264	3.215	0.489	3.162	1.243
8	1.778	0.301	1.683	0.507	2.993	0.091	3.162	0.535
Σ	14.225	12.097	15.531	24.306	27.616	22.999	25.295	21.510

Fuente: autor

Una vez se realice la regresión para cada una de las duraciones, los resultados de cada una de estas deben sumarse, obteniéndose los resultados presentados en la TABLA VIII; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

**TABLA VIII
RESULTADOS DE LAS REGRESIONES**

	x ₂	x ₁	y	x ₁ y	x ₂ y	x ₁ ²	x ₂ ²	x ₁ x ₂
Σ Total	139.926	84.678	75.274	116.389	181.237	160.994	360.108	211.584

Fuente: autor

Con los valores de cada variable solo faltaría el valor de N, el cual es igual a 56 debido a que este es el número de datos de intensidad que se encuentran en la

TABLA VI.

El siguiente paso consiste en reemplazar los datos de la regresión en el sistema de ecuaciones (8) obteniéndose:

$$\begin{aligned}
 82.599 &= 56 a_0 + 84.678 a_1 + 139.926 a_2 \\
 129.433 &= 84.678 a_0 + 160.994 a_1 + 211.584 a_2 \\
 198.619 &= 139.926 a_0 + 211.584 a_1 + 360.108 a_2
 \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema se obtienen los valores de a₀, a₁ y a₂:

$$a_0 = 3.12; \quad a_1 = 0.138; \quad a_2 = -0.742$$

Los valores de la ecuación de Bernard serían:

$$\begin{aligned}
 a &= 10^{3.12} = 1318.061 \\
 b &= 0.138 \\
 c &= 0.742
 \end{aligned}$$

Los resultados para las demás estaciones pluviográficas se resumen en el título 3.1.

2.2. Procedimiento estaciones con Pluviómetro

2.2.1. Coeficientes de distribución de lluvia

Para poder realizar la regionalización es necesario contar con estaciones pluviográficas, sin embargo, para cubrir el área de estudio se debió acudir a información de estaciones pluviométricas, las cuales solo pueden registrar información correspondiente a 24 horas. Para solventar este problema se calcularon coeficientes a partir de las estaciones pluviográficas existentes, que permitieran distribuir las intensidades en diferentes duraciones.

El primer paso consistió en tomar los datos de intensidad máxima de cada estación pluviográfica, para luego asignar un porcentaje a cada intensidad, considerando que aquella registrada en la duración de 24 horas representa el 100%. Después se calcula el promedio de estos porcentajes.

A modo de ejemplo se utiliza la estación Alcaldía donde los datos de intensidad máxima corresponden con los presentados en la TABLA III. Los resultados de este procedimiento se muestran en la TABLA IX. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

**TABLA IX
COEFICIENTES ESTACIÓN ALCALDÍA**

AÑO	COEFICIENTES POR HORA						
	1	2	4	6	8	12	24
1995	0.25	0.44	0.58	0.77	0.85	0.95	1
1996	0.22	0.32	0.97	0.97	1	1	1
1997	0.18	0.31	0.49	0.61	0.68	0.89	1
1998	0.55	0.82	0.99	1	1	1	1
1999	0.36	0.5	0.77	0.79	0.86	0.9	1
2000	0.38	0.6	0.84	0.91	0.95	0.95	1
2001	0.27	0.58	0.68	0.68	0.83	0.99	1
2002	0.59	0.71	0.86	0.97	0.99	1	1
2003	0.39	0.6	0.65	0.84	0.85	0.86	1
2004	0.34	0.38	0.71	0.88	0.94	0.94	1
2005	0.58	0.76	0.98	0.99	0.99	0.99	1
2006	0.25	0.38	0.72	0.82	0.85	0.98	1
2007	0.52	0.59	0.63	0.98	0.98	0.98	1
2008	0.37	0.55	0.76	0.85	0.95	0.98	1
2009	0.23	0.27	0.47	0.49	0.62	0.91	1
2010	0.32	0.63	0.93	0.99	1	1	1
Promedio	0.36	0.53	0.75	0.85	0.9	0.96	1

Fuente: autor

Se realiza el mismo procedimiento con las demás estaciones pluviográficas, para finalmente promediar los coeficientes obtenidos, obteniéndose de esta manera los coeficientes definitivos para distribuir las intensidades de las estaciones pluviométricas. Dichos valores se resumen en la TABLA X.

**TABLA X
COEFICIENTES DE DISTRIBUCIÓN DE LLUVIA**

ESTACIÓN	Duración (hr)						
	1	2	4	6	8	12	24
ACD TO LA ESMERALDA	0.36	0.55	0.76	0.86	0.93	0.96	1

ALCALDÍA	0.36	0.53	0.75	0.85	0.90	0.96	1
BUENAVISTA	0.30	0.48	0.66	0.76	0.86	0.94	1
CABAÑA LA HDA	0.37	0.57	0.78	0.87	0.95	0.97	1
SENA	0.33	0.48	0.68	0.80	0.86	0.95	1
SERVITA	0.33	0.54	0.78	0.87	0.90	0.97	1
UNILLANOS	0.31	0.50	0.67	0.80	0.89	0.95	1
PROMEDIO	0.34	0.52	0.73	0.83	0.90	0.96	1.00

Fuente: autor

2.2.2. Clasificación de la información

Una vez definidos los coeficientes de distribución, se procede a clasificar la información proporcionada por el IDEAM, donde se seleccionan los valores máximos de precipitación en 24 horas por cada estación. Estos datos se multiplican por los coeficientes de distribución obteniendo así la precipitación máxima asociada a 1 hora.

A modo de ejemplo en la TABLA XI se presentan los resultados obtenidos para la estación Acacias.

TABLA XI
PRECIPITACIÓN MÁXIMA (MM) ASOCIADA A 1 HORA – ESTACIÓN ACACIAS

Año	lluvia máx. (mm)						
	1	2	4	6	8	12	24
1993	41.65	63.7	89.425	101.675	110.25	117.6	122.5
1994	45.9	70.2	98.55	112.05	121.5	129.6	135
1995	39.78	60.84	85.41	97.11	105.3	112.32	117
1996	44.2	67.6	94.9	107.9	117	124.8	130
1997	42.432	64.896	91.104	103.584	112.32	119.808	124.8
1998	44.54	68.12	95.63	108.73	117.9	125.76	131
1999	41.82	63.96	89.79	102.09	110.7	118.08	123
2000	38.08	58.24	81.76	92.96	100.8	107.52	112
2001	45.9	70.2	98.55	112.05	121.5	129.6	135
2002	45.9	70.2	98.55	112.05	121.5	129.6	135
2003	45.9	70.2	98.55	112.05	121.5	129.6	135
2004	55.76	85.28	119.72	136.12	147.6	157.44	164
2005	42.84	65.52	91.98	104.58	113.4	120.96	126
2006	42.5	65	91.25	103.75	112.5	120	125
2007	46.24	70.72	99.28	112.88	122.4	130.56	136
2008	39.1	59.8	83.95	95.45	103.5	110.4	115
2009	40.12	61.36	86.14	97.94	106.2	113.28	118
2010	46.24	70.72	99.28	112.88	122.4	130.56	136
2011	57.8	88.4	124.1	141.1	153	163.2	170
2012	44.2	67.6	94.9	107.9	117	124.8	130
2013	44.54	68.12	95.63	108.73	117.9	125.76	131
2014	35.02	53.56	75.19	85.49	92.7	98.88	103
2015	47.6	72.8	102.2	116.2	126	134.4	140
2016	52.7	80.6	113.15	128.65	139.5	148.8	155
2017	38.42	58.76	82.49	93.79	101.7	108.48	113

Fuente: autor

Una vez se distribuyen los valores de intensidad para todas las estaciones, se procedió a aplicar la misma metodología utilizada con las estaciones pluviográficas. Por lo cual solo se presentan los resultados finales para este tipo de estación.

3. RESULTADOS

3.1. Parámetros de la ecuación de Bernard

Los resultados después de aplicar la metodología correspondiente a cada tipo de estación se presentan en las tablas TABLA XII y TABLA XIII.

TABLA XII
PARÁMETROS ECUACIÓN DE BERNARD – ESTACIONES PLUVIOGRÁFICAS

ESTACIÓN	a	b	c
ACD TO LA ESMERALDA	1311.654	0.140	0.746
ALCALDIA	1318.061	0.138	0.742
BUENAVISTA	589.840	0.136	0.631
CABAÑA LA HACIENDA	967.282	0.155	0.717
SENA	556.383	0.144	0.625
SERVITA	1405.857	0.150	0.741
UNILLANOS	723.088	0.163	0.683

Fuente: autor

TABLA XIII
PARÁMETROS ECUACIÓN DE BERNARD – ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS

ESTACIÓN	a	b	c
ACACIAS	724.110	0.078	0.654
APTO VANGUARDIA	789.516	0.114	0.654
BASE AEREA APIAY	636.893	0.114	0.654
CALIME	767.501	0.090	0.654
GUAMAL	703.150	0.075	0.654
OJO DE AGUA	702.948	0.185	0.654
POMPEYA	635.407	0.136	0.654
SAN LUIS CUBARRAL	804.908	0.097	0.654
TORO EL	675.192	0.082	0.654
YAGUARITO	568.277	0.138	0.654

Fuente: autor

Con estos datos aplicando la ecuación (5) se pueden construir las curvas IDF de cada estación.

3.2. Curvas IDF

Una vez calculados los parámetros de todas las estaciones, se procede a reemplazarlos en la ecuación (5), con la cual se podrán construir las curvas IDF de cada estación.

A modo de ejemplo se utilizan los datos de la TABLA XIII, con los cuales se construye la ecuación (9) para la estación Acacias.

$$I = 724.110 * \frac{T^{0.078}}{t^{0.654}} \quad (9)$$

Con esta ecuación se construyen las curvas IDF para periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 500 años.

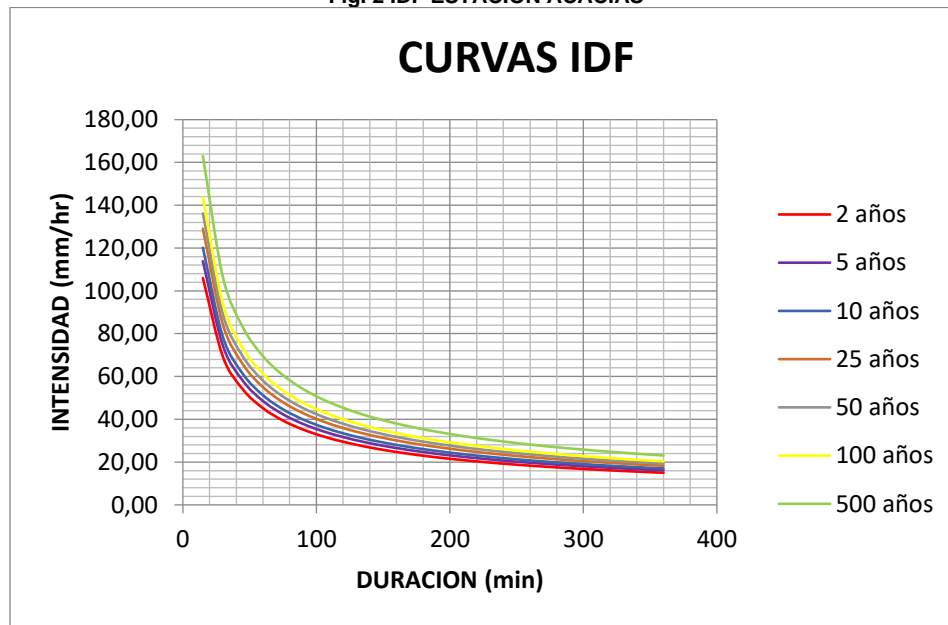
TABLA XIV
INTENSIDADES EN DIFERENTES T – ESTACIÓN ACACIAS

INTENSIDAD EN DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO							
t(min)	2	5	10	25	50	100	500
15	130.15	139.78	147.53	158.44	167.22	176.50	200.06
30	82.73	88.85	93.78	100.71	106.30	112.19	127.17
45	63.47	68.16	71.94	77.26	81.55	86.07	97.56
60	52.59	56.48	59.61	64.02	67.57	71.31	80.84
90	40.34	43.33	45.73	49.11	51.84	54.71	62.01
120	33.43	35.90	37.89	40.69	42.95	45.33	51.38
240	21.25	22.82	24.09	25.87	27.30	28.81	32.66
360	16.30	17.51	18.48	19.84	20.94	22.11	25.06

Fuente: autor

Las curvas IDF para la estación Acacias resultan de graficar los datos, tal como se presenta en la Fig. 2.

Fig. 2 IDF ESTACIÓN ACACIAS



Fuente: autor

3.2.1. Comparación con curvas IDF por método simplificado

Una vez calculadas las curvas IDF por el método propuesto en este trabajo, es necesario verificar que la información obtenida sea lógica, por ello se procede a compararlo con los resultados que se obtendrían de utilizar una metodología aceptada nacionalmente, como lo es el método simplificado, el cual es recomendado por el INVIAS en el manual de drenaje para carreteras (2009) [11], cuando no se tienen estaciones con datos de precipitación de corta duración (registros pluviográficos).

La ecuación recomendada corresponde a la formulada por Vargas [5], para la cual solo es necesario disponer de la precipitación máxima promedio anual en 24 horas de una estación. Dicha ecuación se presenta a continuación:

$$I = \frac{a \times T^b \times M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c} \quad (10)$$

Donde:

- I: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).
- T: Periodo de retorno, en años.
- M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual.
- t: Duración de la lluvia, en minutos (min).
- a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión.

Los parámetros se encuentran regionalizados para 4 regiones del país, en el caso de la región Orinoquia estos se muestran en la TABLA XV.

**TABLA XV
PARÁMETROS REGIÓN ORINOQUIA**

a	b	c	d
5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente: Manual de drenaje 2009

Para realizar la comparación se utilizó la estación Acacias, por lo tanto, una vez definidos los parámetros regionales se procedió a calcular M. Esta variable se obtuvo promediando los datos de la TABLA XI correspondientes con la duración de 24 horas.

La ecuación resultante es la siguiente:

$$I = \frac{5.53 \times T^{0.17} \times 130.492^{0.42}}{\left(\frac{t}{60}\right)^{0.63}} \quad (11)$$

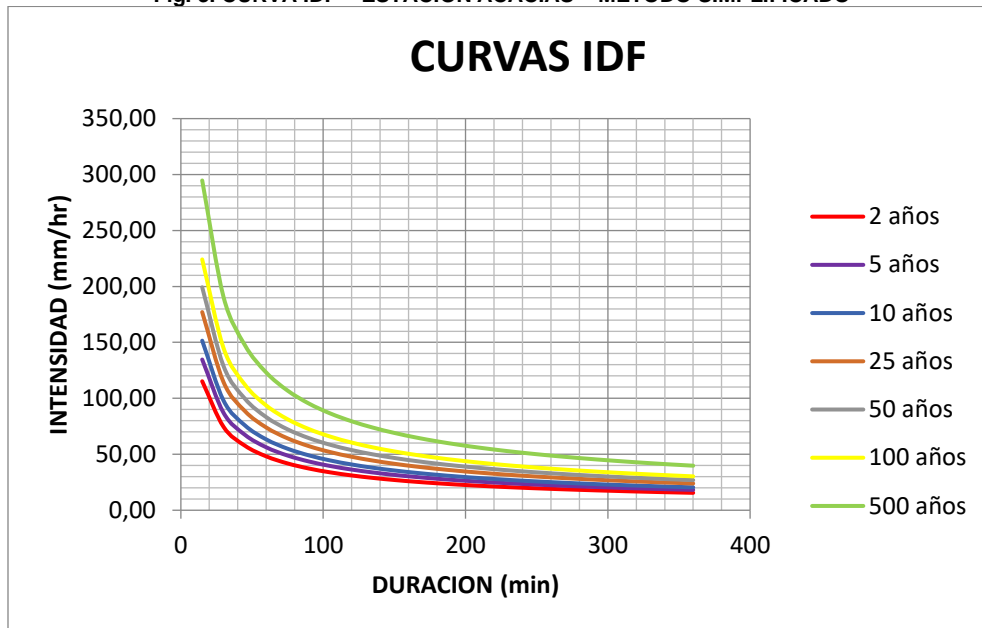
Con esta ecuación se construye la curva IDF por el método simplificado para la estación Acacias.

**TABLA XVI
INTENSIDADES EN DIFERENTES T – ESTACIÓN ACACIAS – MÉTODO SIMPLIFICADO**

INTENSIDAD EN DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO							
t(min)	2	5	10	25	50	100	500
15	115.28	134.71	151.55	177.10	199.25	224.17	294.71
30	74.49	87.05	97.93	114.44	128.75	144.85	190.43
45	57.70	67.42	75.85	88.64	99.73	112.20	147.50
60	48.13	56.25	63.28	73.95	83.19	93.60	123.05
90	37.28	43.57	49.02	57.28	64.44	72.50	95.31
120	31.10	36.35	40.89	47.78	53.76	60.48	79.51
240	20.10	23.49	26.42	30.88	34.74	39.08	51.38
360	15.57	18.19	20.47	23.92	26.91	30.27	39.80

Fuente: autor

Fig. 3. CURVA IDF – ESTACIÓN ACACIAS – MÉTODO SIMPLIFICADO



Fuente: autor

Una vez se calcularon las intensidades máximas por el método simplificado propuesto por INVIAS, se procedió a comparar los resultados con los obtenidos por la metodología propuesta en este trabajo. La diferencia promedio entre métodos se presenta en la TABLA XVII.

TABLA XVII
DIFERENCIA PORCENTUAL – MÉTODO PROPUESTO (EC. DE BERNARD) CON RESPECTO AL MÉTODO SIMPLIFICADO

t(min)	T (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
15	13%	4%	-3%	-11%	-16%	-21%	-32%
30	11%	2%	-4%	-12%	-17%	-23%	-33%
45	10%	1%	-5%	-13%	-18%	-23%	-34%
60	9%	0%	-6%	-13%	-19%	-24%	-34%
90	8%	-1%	-7%	-14%	-20%	-25%	-35%
120	7%	-1%	-7%	-15%	-20%	-25%	-35%
240	6%	-3%	-9%	-16%	-21%	-26%	-36%
360	5%	-4%	-10%	-17%	-22%	-27%	-37%
Promedio	9%	0%	-6%	-14%	-19%	-24%	-35%

Fuente: autor

Se observa que, para periodos de retorno bajos, los valores de intensidad calculados con la ecuación de Bernard son mayores que los del método simplificado, mientras que para periodos de retorno altos sucede lo contrario, el método simplificado arroja mayores valores de intensidad.

El comportamiento de la ecuación propuesta por INVIAS es comprensible, ya que esta metodología asume parámetros altos que le permitan generar un factor de seguridad, esto debido a que no dispone de información pluviográfica confiable con la cual pueda realizar una estimación aproximada del comportamiento de las precipitaciones máximas.

Estudios como el realizado por (Pinilla, J. and Corzo, F.) [12] señalan esta característica al comparar curvas IDF reales y sintéticas en el municipio de Anapoima. En su investigación encontraron que las curvas IDF calculadas por el método sintético de Vargas, generaban intensidades mayores a las obtenidas mediante datos pluviográficos.

Otros estudios como el de (Mejia, B) [13] obtuvieron resultados similares a los de esta investigación, dado que en su trabajo al comparar curvas IDF construidas por el método simplificado con respecto a las construidas con datos de pluviógrafo en el departamento del Atlántico, encontraron que las intensidades eran mayores para periodos de retorno de 25 años en adelante para el método simplificado, mientras que para periodos de retorno inferiores a 25 años los resultados eran menores.

Una vez se compararon los resultados de esta investigación con los obtenidos en otros trabajos realizados en el país, se pudo verificar que las curvas IDF construidas con la ecuación de Bernard generan información lógica, por lo cual se procedió a realizar el proceso de regionalización.

3.3. Regionalización

Una vez se confirmó que las curvas IDF construidas con los parámetros a, b y c mediante la ecuación de Bernard, arrojaban valores lógicos, se procedió a regionalizar dichos valores mediante mapas de isolíneas. El método consiste en utilizar procesos matemáticos sencillos, con los que se triangulan e interpolan los parámetros hasta conseguir un mapa de isolíneas, uno para cada parámetro.

Para interpolar los valores se usó el método IDW (distancia inversa ponderada) es un método de interpolación que se basa en la autocorrelación espacial de puntos para la predicción y generación de superficies continuas. Este método usa una función de distancia inversa, parte del supuesto que los objetos más cercanos son más parecidos, por lo tanto, tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar.

La interpolación con IDW se realiza con el software ArcGIS, donde se asignan valores X, Y y Z, siendo los primeros dos los correspondientes con la ubicación de cada estación, y Z siendo representado por uno de los parámetros de la ecuación de Bernard, a, b y c. De esta manera el programa genera un ráster por cada parámetro, del cual se crean los mapas de isolíneas presentados en las figuras 4-6.

Fig. 4. MAPA DE ISOLINEAS - PARAMETRO a

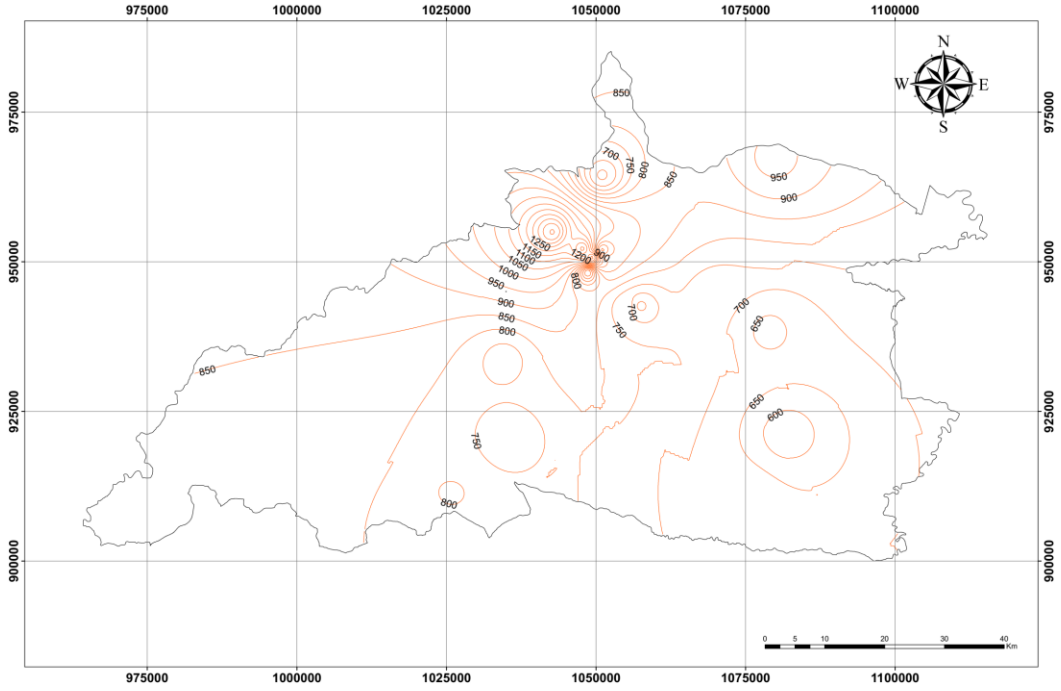
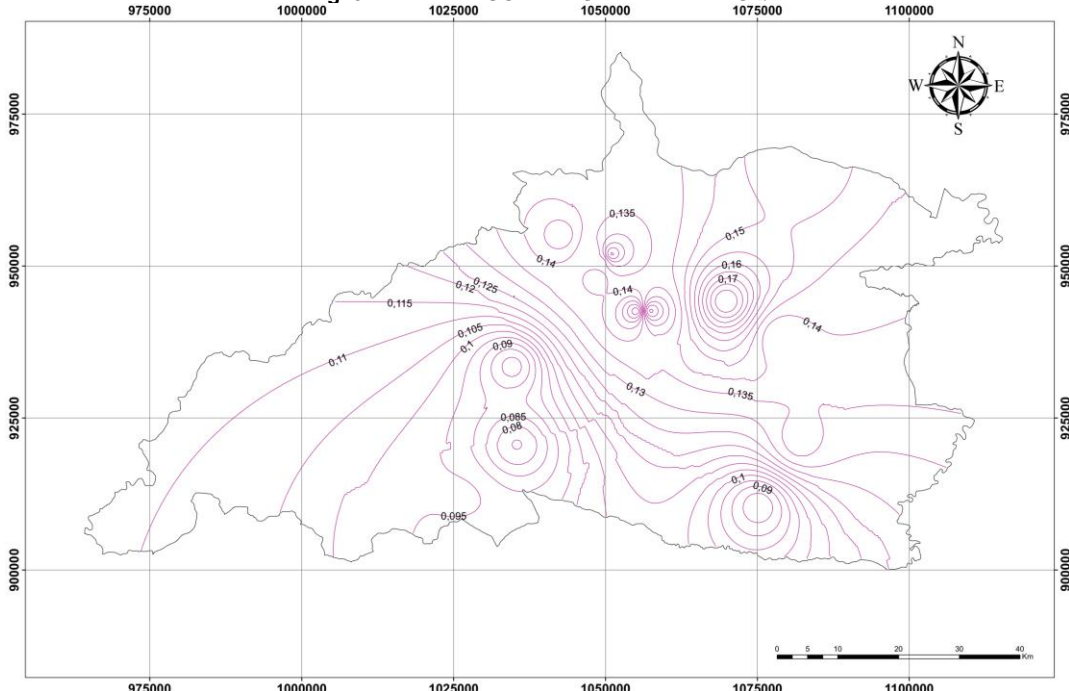
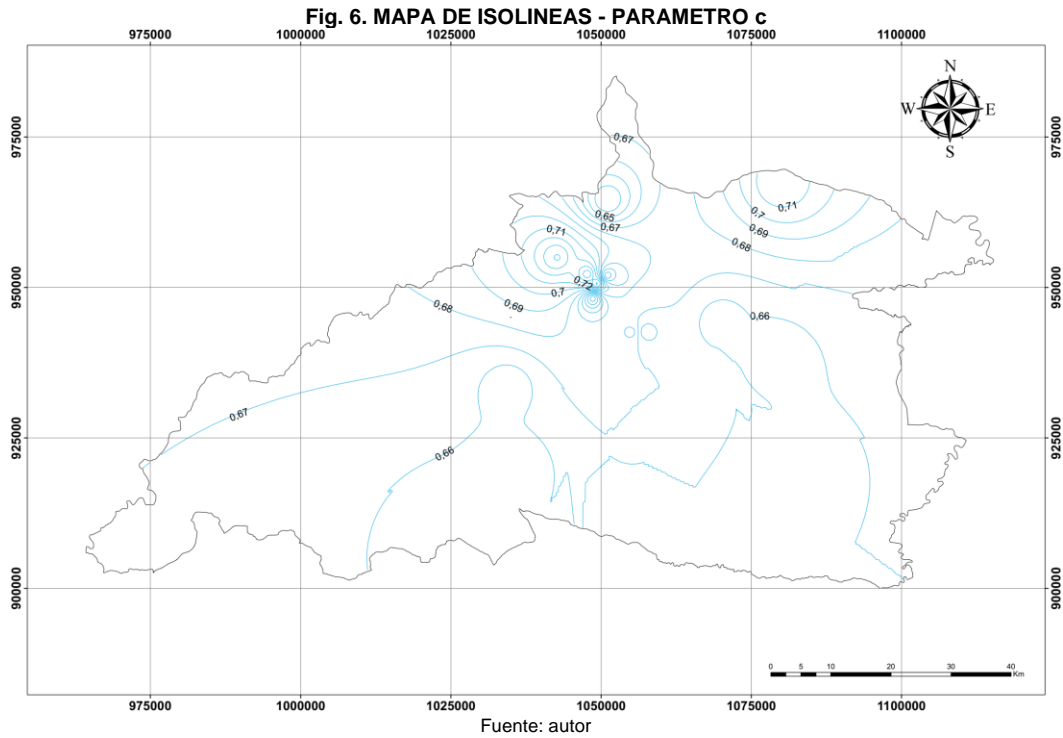


Fig. 5. MAPA DE ISOLINEAS - PARAMETRO b





3.2 Validación

Para demostrar la validez de los mapas de isolíneas generados con la información de este trabajo, se usan dos estaciones no consideradas en la investigación, de esta manera, se calcularán y comparan valores obtenidos por el método convencional, con los obtenidos mediante la interpolación. Los datos generales de las estaciones de prueba se presentan en la TABLA XVIII.

**TABLA XVIII
ESTACIONES DE PRUEBA**

CÓDIGO	ESTACION	MUNICIPIO
35010040	Caño hondo	Guamal
35035100	ICA Villavicencio	Villavicencio

Fuente: autor

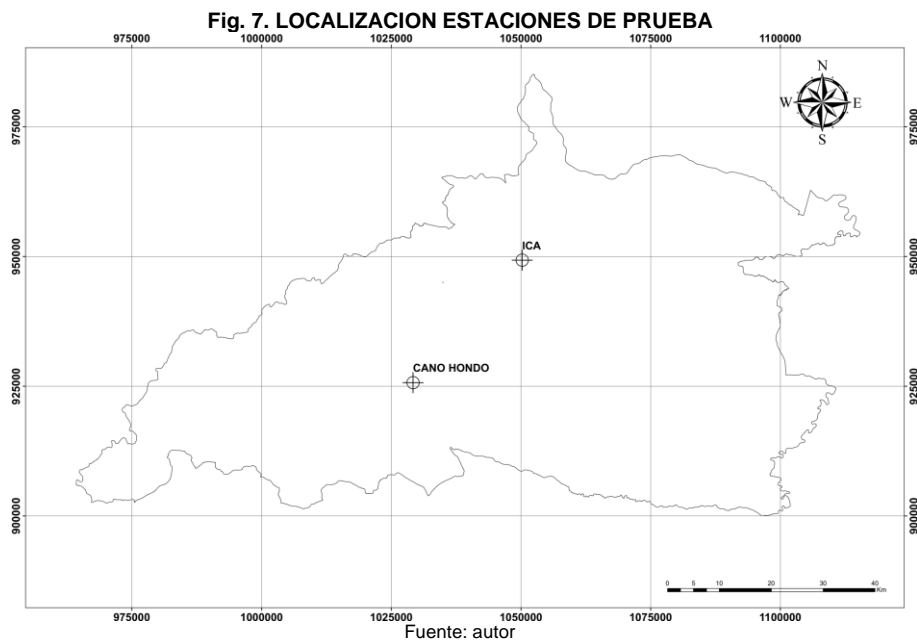
En la TABLA XIX se observan los parámetros de la ecuación IDF de cada estación, los cuales fueron obtenidos mediante la metodología descrita para estaciones con pluviómetro.

**TABLA XIX
PARAMETROS IDF - ESTACIONES DE PRUEBA**

ESTACIÓN	a	b	c
Caño hondo	792.62255	0.10984	0.65369
ICA Villavicencio	835.77788	0.14213	0.65369

Fuente: autor

La localización de las estaciones en la zona de estudio se evidencia en Fig. 7.



Después de ubicar las estaciones de prueba en cada mapa de isóneas, se determina el valor de los parámetros regionalizados (a, b y c) a través de procesos de interpolación entre las isóneas. Los valores obtenidos se resumen en la TABLA XX.

**TABLA XX
PARAMETROS IDF - ESTACIONES DE PRUEBA (IDW)**

ESTACIÓN	a	b	c
Caño hondo	764.865	0.09042	0.65971
ICA Villavicencio	966.995	0.136781	0.687831

Fuente: autor

Finalmente se construyen las curvas IDF con la ecuación (5) para cada estación, tanto con los parámetros calculados con el método convencional como los obtenidos por regionalización. Los porcentajes de error se presentan en las tablas TABLA XXI y TABLA XXII.

**TABLA XXI
VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE MÉTODOS – ESTACIÓN ICA**

t(min)	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
15	5.09%	4.58%	4.19%	3.68%	3.30%	2.92%	2.03%
30	2.63%	2.13%	1.75%	1.26%	0.88%	0.51%	0.35%
45	1.22%	0.73%	0.36%	0.14%	0.50%	0.87%	1.72%
60	0.23%	0.26%	0.63%	1.11%	1.48%	1.84%	2.68%
90	1.14%	1.63%	1.99%	2.47%	2.83%	3.19%	4.02%
120	2.11%	2.59%	2.95%	3.42%	3.78%	4.14%	4.96%
240	4.40%	4.87%	5.22%	5.68%	6.03%	6.38%	7.18%
360	5.71%	6.17%	6.52%	6.98%	7.32%	7.67%	8.46%

Fuente: autor

**TABLA XXII
VARIACIÓN PORCENTUAL ENTRE MÉTODOS – ESTACIÓN CAÑO HONDO**

t(min)	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
15	6.33%	7.98%	9.21%	10.81%	12.01%	13.18%	15.85%
30	6.72%	8.37%	9.59%	11.19%	12.37%	13.54%	16.20%
45	6.95%	8.59%	9.81%	11.40%	12.59%	13.75%	16.41%
60	7.11%	8.75%	9.97%	11.55%	12.74%	13.90%	16.55%
90	7.34%	8.97%	10.19%	11.77%	12.95%	14.11%	16.76%
120	7.50%	9.13%	10.34%	11.92%	13.10%	14.26%	16.90%
240	7.88%	9.51%	10.72%	12.29%	13.46%	14.62%	17.25%
360	8.11%	9.73%	10.93%	12.50%	13.67%	14.83%	17.45%

Fuente: autor

Al comparar la variación porcentual de ambas estaciones, se obtiene que la estación ICA es quien presenta menor porcentaje de error, teniendo como máximo una variación de 8.46%. Mientras que en el caso de la estación Caño hondo, la variación máxima llega hasta 17.45%, siendo incluso mayor al doble del resultado obtenido por la estación ICA.

Los resultados obtenidos del análisis comparativo de las estaciones, indican que los puntos cercanos a la zona con mayor concentración de estaciones, es decir el municipio de Villavicencio y sus alrededores, tienen un menor porcentaje de error, a diferencia de los demás municipios, como lo es el caso de Guamal, municipio donde se encuentra localizada la estación Caño hondo.

En los mapas de isolíneas se puede evidenciar este comportamiento, el cual se relaciona con la distancia que existe entre cada isolínea. En municipios como Villavicencio la cantidad de isolíneas es mayor a la de zonas como Guamal, así mismo la distancia entre estas es mucho más corta, lo cual representa mayor precisión.

Sin embargo, a pesar de no contar con las suficientes estaciones en municipios como Guamal que permitan obtener resultados más precisos, el porcentaje de error obtenido no es exagerado, por lo que pueden construirse curvas IDF de manera confiable.

4. CONCLUSIONES

- Se estimaron las curvas IDF para las estaciones pluviográficas a partir de los registros de pluviograma, correspondientes con las mayores tormentas presentadas para cada año de estudio. Con dicha información se determinaron coeficientes de distribución de lluvia, que permitieron utilizar la información de estaciones pluviométricas para construir curvas IDF mediante la ecuación de Bernard. Esto se hizo debido a la baja cantidad de estaciones con pluviógrafo, las cuales no cubrían totalmente el área de estudio.
- El método de isolíneas con interpolación IDW demuestra ser aplicable en la regionalización de variables que componen ecuaciones para la determinación de curvas IDF. Así mismo al analizar las curvas IDF generadas con la ecuación de Bernard con respecto a las generadas por el método simplificado, se encuentra que la información obtenida es lógica, ya que después de comparar los resultados con otros estudios efectuados en el país, se encuentra un comportamiento similar en la magnitud y diferencia de las intensidades de cada método, con respecto a un periodo de retorno determinado.
- Se implemento un sistema de información geográfica que permite utilizar los mapas de isolíneas, para determinar los parámetros que componen la ecuación de Bernard (a, b y c) para construir las curvas IDF, para ello solo se necesita conocer las coordenadas del punto de interés dentro de la

zona de estudio. De esta manera no se hace necesario evaluar la información pluviométrica o del pluviógrafo registrada por la estación más cercana al área de interés.

También se encontró que el nivel de confiabilidad de los mapas de regionalización, se relaciona directamente con la cantidad y distribución de las estaciones en la zona de estudio, por lo cual el error esperado en ciudades como Villavicencio (estación ICA 8.46%) y sus alrededores resulta menor al obtenido en municipios más alejados y con menos concentración de estaciones como Guamal (estación caño Hondo 17.45%). Motivo por el cual la información arrojada por los mapas es más precisa en el municipio de Villavicencio y sus alrededores, sin embargo, a pesar de ello los resultados obtenidos en las zonas con menor densidad de estaciones no muestran un error elevado, por lo que se pueden calcular curvas IDF sin ningún problema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) por suministrar la información necesaria para el desarrollo del proyecto de manera rápida y confiable; así mismo se agradece a la Universidad Santo Tomas por la promoción de la investigación.

REFERENCIAS

- [1] H. Ghanmi, Z. Bargaoui y C. Mallet, «Estimation of intensity-duration-frequency relationships according to the property of scale invariance and regionalization analysis in a Mediterranean coastal,» *Journal of Hydrology*, 2015.
- [2] P. Lopez, J. Maza, V. Burgos, A. Vargas, L. Fornero y J. Bonilla, «REGIONALIZACIÓN PARAMÉTRICA DE CURVAS DE DURACIÓN DE CAUDALES,» *Instituto Nacional del Agua*.
- [3] O. Mesa, J. Velez, J. Giraldo y D. Quevedo, «Regionalización de Características Medias de la Cuenca con Aplicación en la Estimación de Caudales Máximos,» *Universidad Nacional de Colombia*.
- [4] J. Becerra y L. Sanchez, «REGIONALIZACIÓN DE CURVAS IDF EN LA SABANA OCCIDENTAL DEL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA,» *UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS*, 2015.
- [5] R. Vargas y M. Díaz Granados, *Curvas sinteticas de Intensidad-Durasion-Frecuencia para Colombia*, Bogota D.C: Universidad de los Andes, 1998.
- [6] J. E. Muñoz Barragán y E. Zamudio Huertas, *Regionalización de ecuaciones para el cálculo de curvas de intensidad, duración y frecuencia mediante mapas de isolinéas en el departamento de Boyacá*, Tecnura, 2018.
- [7] R. Pizarro T., J. P. Flores V., C. Sangüesa P. y E. Martínez A., *Leyes de distribución de procesos hidrológicos*, SOCIEDAD ESTÁNDARES DE INGENIERÍA PARA AGUAS Y SUELOS LTDA. .
- [8] J. Témez, *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*, Madrid , 1978.
- [9] V. T. Chow, D. R. Maidment y L. W. Mays, *Hidrología aplicada*, McGraw-Hill International editions, 1988.
- [10] F. J. Aparicio Mijares, *Fundamentos de hidrología de superficie*, Limusa S.A, 1992.
- [11] INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, *Manual de drenaje para carreteras*, República de Colombia: INVIAS, 2009.
- [12] J. C. Pinilla Mora y F. A. Corzo Oviedo, «COMPARACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD – DURACIÓN – FRECUENCIA (IDF) REALES Y SINTÉTICAS,» *Universidad Católica de Colombia*, 2015.
- [13] B. S. Mejía Arrieta, «Estimación de curva IDF a partir de lluvias máximas en 24 horas en el Departamento del atlántico,» *Universidad de la Costa*, 2017.