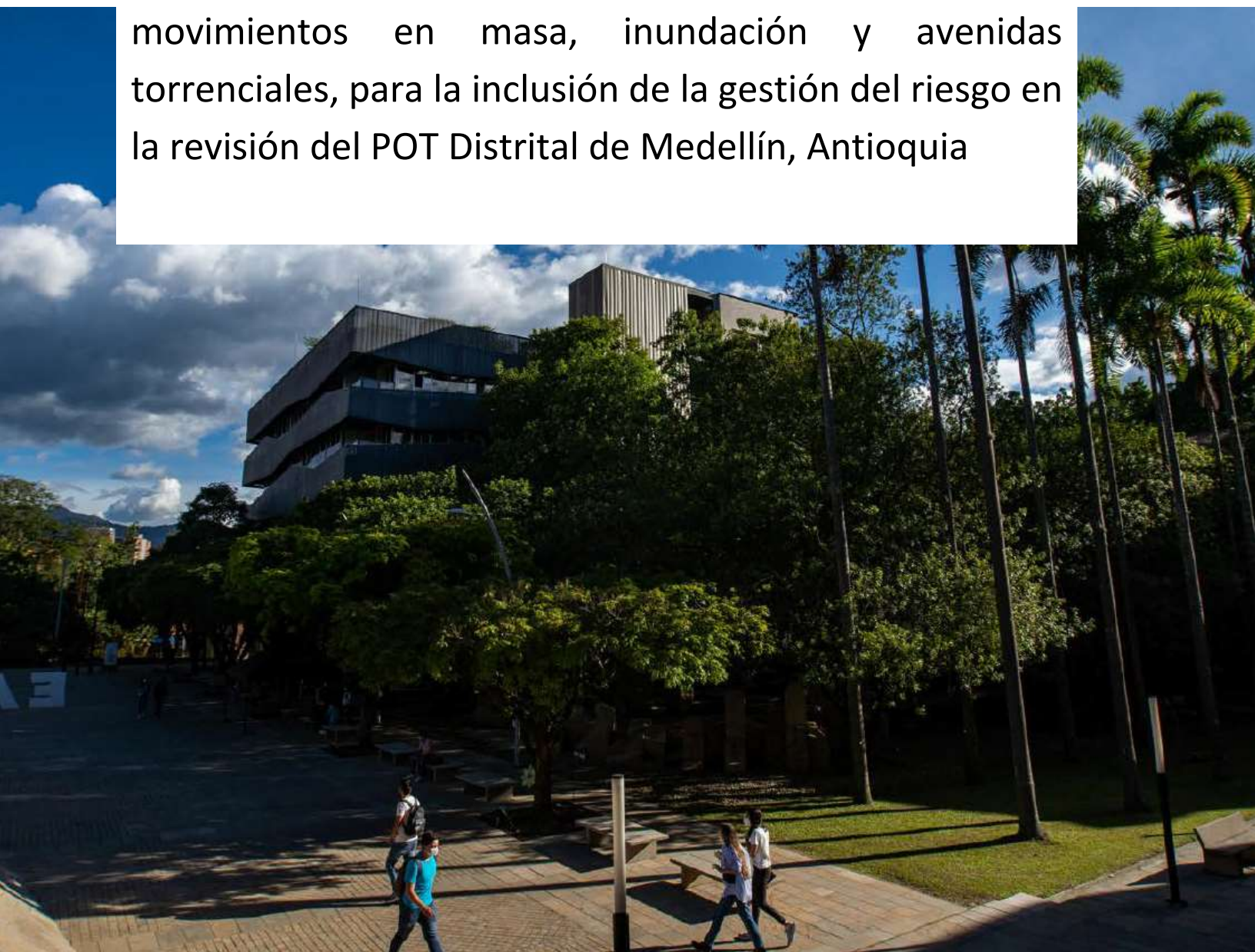


Elaboración de estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales, para la inclusión de la gestión del riesgo en la revisión del POT Distrital de Medellín, Antioquia



INFORME
DETONANTE LLUVIA

Información general del proyecto

Nombre:	Estudios Básicos Medellín
Objeto:	CONTRATO INTERADMINISTRATIVO DE MANDATO SIN REPRESENTACIÓN LEGAL PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES, PARA LA INCLUSIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA REVISIÓN DEL POT DEL DISTRITO ESPECIAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN DE MEDELLÍN
Vigencia:	28 de febrero de 2025 al 12 de septiembre de 2025.
Alcance geográfico:	Municipio de Medellín

Tabla de contenido

1	Amenaza por Movimientos en Masa	6
1.1	Factores Detonantes	6
1.1.1	Detonante Lluvia	6
2	Bibliografía	40

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Localización general de las estaciones disponibles en la zona.	8
Ilustración 2. Series de precipitación máxima en 24 horas y la tendencia.	11
Ilustración 3. Series de precipitación máxima en 24 horas y valores atípicos.	14
Ilustración 4. Cambios esperados en precipitación y temperatura para jurisdicción Corantioquia, periodo 2071 – 2100.	20
Ilustración 5. Prueba gráfica de ajuste en las series evaluadas en detalle.	28
Ilustración 6. Semivariograma teórico utilizado en la generación de campos de precipitación.	33
Ilustración 7. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR233.	34
Ilustración 8. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR5.	35
Ilustración 9. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR10.	36
Ilustración 10. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR25.	37
Ilustración 11. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR50.	38
Ilustración 12. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR100.	39

Lista de Tablas

Tabla 1. Estaciones disponibles en la zona de estudio.	7
Tabla 2. Resultados, análisis de tendencias en series de precipitación máxima en 24 horas.	9
Tabla 3. Límites superiores – valores atípicos (mm).	14
Tabla 4. Valores atípicos (mm) – 1.	14
Tabla 5. Valores atípicos (mm) – 2.	15
Tabla 6. Valores atípicos (mm) – 3.	15
Tabla 7. Registro histórico ONI.	16
Tabla 8. Valores retirados de las muestras.	17
Tabla 9. Precipitación máxima en 24 horas – Astilleros (27011110).	24
Tabla 10. Precipitación máxima en 24 horas – El Chuscal (27010770).	24
Tabla 11. Precipitación máxima en 24 horas – La Aldea (26205080).	24
Tabla 12. Precipitación máxima en 24 horas – La Iguañá (27011120).	25
Tabla 13. Precipitación máxima en 24 horas – Santa Elena (27010810).	25
Tabla 14. Precipitación máxima en 24 horas – Tulio Ospina (27015090).	25
Tabla 15. Media y desviación estándar de las variables analizadas.	26
Tabla 16. Pruebas de ajuste para las variables analizados – 1.	27
Tabla 17. Pruebas de ajuste para las variables analizados – 2.	27
Tabla 18. Precipitación máxima en 24 horas a diferentes periodos de retorno (mm).	29
Tabla 19. Precipitación máxima en 24 horas a diferentes periodos de retorno (mm), ajustado por cambio climático.	30
Tabla 20. Parámetros semivariograma de datos de precipitación – experimental.	30
Tabla 21. Parámetros para la construcción de semivariograma, Precipitación máxima 24 horas y diferentes periodos de retorno.	31

1 Amenaza por Movimientos en Masa

1.1 Factores Detonantes

1.1.1 Detonante Lluvia

En este capítulo, se presenta el procedimiento metodológico para determinar la detonante lluvia dentro del análisis de la amenaza por movimientos en masa. A continuación, se muestra la información disponible y los resultados obtenidos en dicho proceso.

Los movimientos en masa causados por lluvias están relacionados con el volumen, intensidad y distribución de dichas precipitaciones. En consecuencia, es importante tener en cuenta la respuesta del terreno a precipitaciones durante horas, días, meses, años o incluso durante ciclos de lluvia y sequía de varios años. Cuando la precipitación cae sobre una ladera, un porcentaje de ella es interceptada por la vegetación, otro se infiltra en el suelo o se almacena en las depresiones para luego infiltrarse. El proceso de infiltración continúa, aún después del cese de las lluvias y en algún momento pueden crearse condiciones críticas, ya que la humedad del suelo y la posición del nivel freático han aumentado, incrementando la presión de poros, disminuyendo los esfuerzos efectivos y, por tanto, la resistencia al esfuerzo cortante. Es entonces cuando se pueden alcanzar los umbrales de inestabilidad que disparan el movimiento de una parte o toda la ladera (Álzate M., 2015). Los movimientos en masa detonados por lluvias, que se desarrollan sobre las laderas, desestabilizándolas, generan desastres que causan daños y muertes incluyendo pérdidas en vidas humanas, ambientales y económicas que impactan el desarrollo de algunas regiones (Álzate M., 2015).

En parte, los deslizamientos representan el efecto de la lluvia sobre las laderas, y, por lo tanto, esta variable deberá ser considerada en la modelación de movimientos en masa en cada una de las zonas que conforman el área estudiada. Partiendo de la hipótesis que, a mayor lluvia diaria máxima, mayor es la probabilidad que se detone un movimiento en masa, se genera un campo de lluvia máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno (2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años), para lo cual se seleccionaron las estaciones meteorológicas que se encuentren dentro de la zona de análisis y vecinas a ésta, con el fin de disminuir la incertidumbre en el límite de esta.

1.1.1.1 Información Disponible

Se realizó la recopilación de la información hidrológica disponible (precipitación), la cual fue clasificada de acuerdo con su resolución – mensual, diaria, anual – y fuente de suministro – IDEAM –, y así iniciar el proceso de validación de la información obtenida toda vez que los resultados de los procedimientos realizados dependen de la calidad de la información. Se realizó la identificación de las estaciones disponibles en el área del distrito de Medellín y en las zonas aledañas, recopilando los registros disponibles de precipitación, que en general son estaciones operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. En este aspecto es importante considerar que para el

análisis del detonante de lluvia se requiere información de precipitación máxima diaria por lo cual, se utiliza los registros disponibles para las estaciones operadas por el IDEAM. Si bien el área de interés cuenta con estaciones operadas por Empresas Públicas de Medellín, la información de libre acceso corresponde a los parámetros de construcción para curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia – IDF, información que es utilizada dentro del componente de hidrología, sin embargo, para dichas estaciones no se dispone de información de precipitación máxima diaria y por lo tanto, los análisis del detonante de lluvia son realizados a partir de las estaciones del IDEAM. En la Tabla 1, se presentan las estaciones disponibles en la zona y que fueron implementadas en el análisis.

Tabla 1. Estaciones disponibles en la zona de estudio.

ID	Entidad	Código	Nombre	Tipo	Instalación	Este	Norte	Resolución
1	IDEAM	23085270	Aeropuerto JM Cordova	SP	27/11/2006	4731186,07	2240386,37	Diaria
2	IDEAM	26200140	Armenia	PM	15/04/1975	4693371,11	2239240,37	Diaria
3	IDEAM	27011110	Astilleros	PM	15/10/1990	4704018,46	2250174,31	Diaria
4	IDEAM	23080650	Campoalegre	PM	15/06/1973	4741587,18	2229698,54	Diaria
5	IDEAM	27010770	El Chuscal	PM	15/08/1970	4700739,09	2241454,97	Diaria
6	IDEAM	26205080	La Aldea	ME	15/09/1990	4701289,89	2259452,94	Diaria
7	IDEAM	27010820	La Cuchilla	PM	15/08/1970	4728675,22	2262333,75	Diaria
8	IDEAM	27011120	La Iguana	PG	15/10/1990	4706080,94	2256687,28	Diaria
9	IDEAM	27010800	La Meseta San Pedro	PM	15/08/1970	4711695,02	2265889,06	Diaria
10	IDEAM	27015260	La Salada	AM	15/07/1984	4709571,54	2227033,81	Diaria
11	IDEAM	26230180	Llanos de San Juan	PM	15/11/1990	4699480,11	2268969,98	Diaria
12	IDEAM	26200120	Otramina	PM	15/10/1970	4690769,45	2229847,24	Diaria
13	IDEAM	27015150	Progreso El Hacienda	CO	14/04/1973	4734961,46	2271056,75	Diaria
14	IDEAM	27010810	Santa Elena	CO	15/08/1970	4721597,64	2243404,96	Diaria
15	IDEAM	27015090	Tulio Ospina	CO	15/09/1950	4717623,43	2257007,41	Diaria

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

La información es consultada en la plataforma <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>, sitio donde se dispone de cada una de las estaciones y con la información registrada, así como también el tipo de resolución requerida, información que de igual forma se suministra desde el portal web <http://sirh.ideam.gov.co:8230/Sirh/faces/observatorioSuperficiales.jspx>. En la Ilustración 1, se presenta la ubicación de las estaciones utilizadas dentro del análisis de precipitación máxima en 24 horas y el cálculo del detonante de lluvia. La información de precipitación recopilada es operada por Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

En total, se tienen 15 estaciones de precipitación con el valor de la precipitación diario en el periodo disponible. Las estaciones utilizadas corresponden a aquellas que se encuentran aún en operación. Las estaciones que fueron suspendidas no fueron tomadas en cuenta toda vez que en los años 2010 a 2012, así como entre 2018 y 2020 se presentó incrementos importantes en las lluvias promedio de la región, así como las estaciones con fecha de instalación reciente y donde se cuenta con un registro de datos en periodos inferiores a 15 años. Dentro de las convenciones presentadas se identifica el tipo de

estación así: CO: Climatológica Ordinaria, PM: Pluviométrica, PG: Pluviográfica, ME: Meteorológica, AM: Agrometeorológica y SP: Sinóptica Principal.

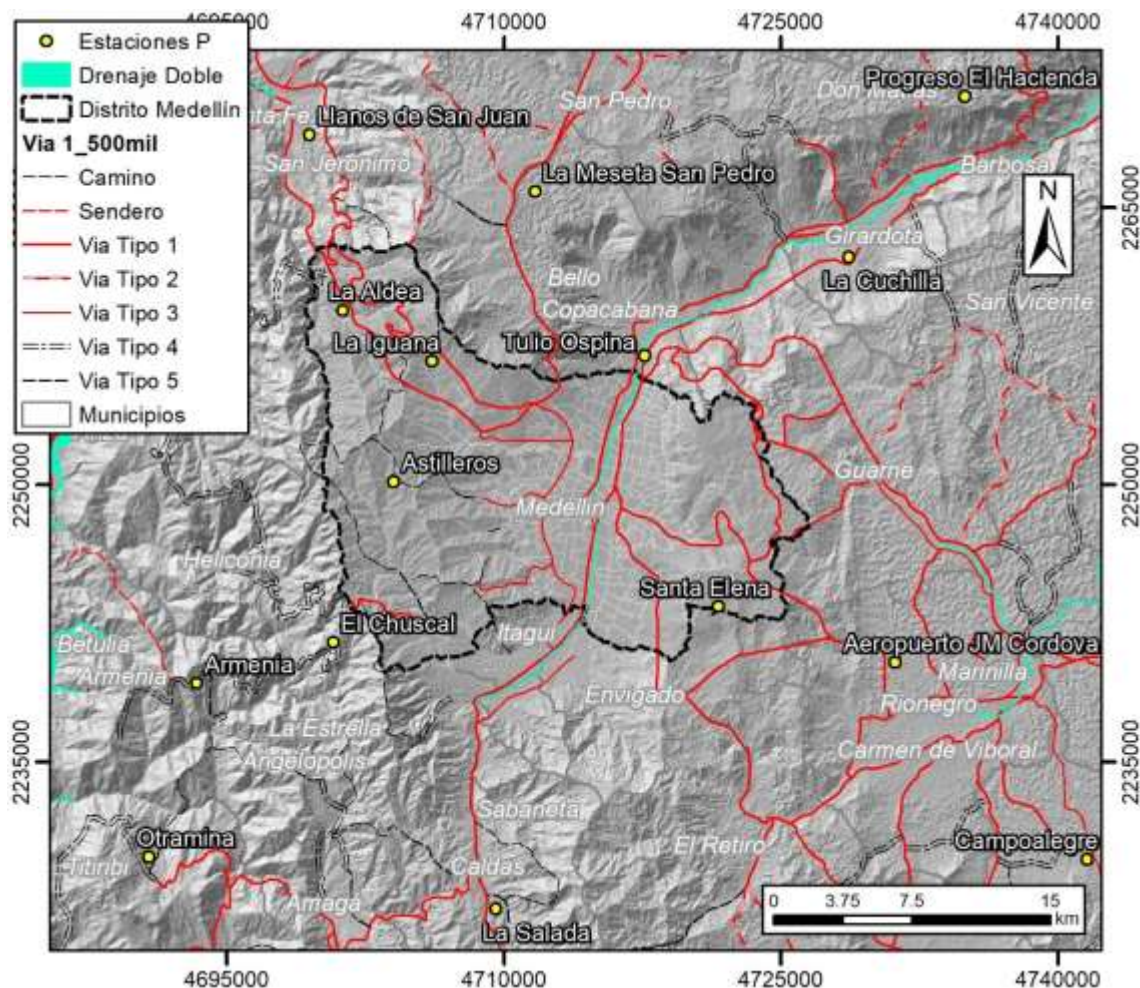


Ilustración 1. Localización general de las estaciones disponibles en la zona.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

A partir de los registros diarios de precipitación en cada una de las estaciones, se determinó el valor máximo de precipitación en 24 horas, agregando la serie de forma mensual. Es decir, se determina el máximo valor diario en cada uno de los meses, y así agregarlos de forma mensual.

1.1.1.2 *Análisis de Tendencia de Series de Precipitación Máxima de 24 Horas*

Para estimar la presencia de tendencia en la serie se ha empleado la siguiente metodología:

La prueba T

Esta es una prueba estadística para detectar si hay o no tendencia en la media de una serie, se realiza mediante los siguientes pasos:

- Se ajusta una línea recta a la serie de tiempo.

- Se obtienen los parámetros R^2 y R del ajuste.
- Se calcula el parámetro T mediante la siguiente ecuación, en la que n es la cantidad de datos de la muestra.

$$T = abs\left(\frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}}\right)$$

- Calcular el parámetro T_c (T crítico) a partir de la siguiente ecuación, donde t_{inv} es la distribución acumulada t -student inversa, y $n-2$ son los grados de libertad.

$$T_c = t_{inv}(0.975, n - 2)$$

- Finalmente se determina que la serie presenta tendencia en la media si $T > T_c$.

Una vez aplicado el procedimiento descrito, se determinaron las diferentes tendencias en las series de precipitación máxima en 24 horas en la zona de estudio, resultados que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados, análisis de tendencias en series de precipitación máxima en 24 horas.

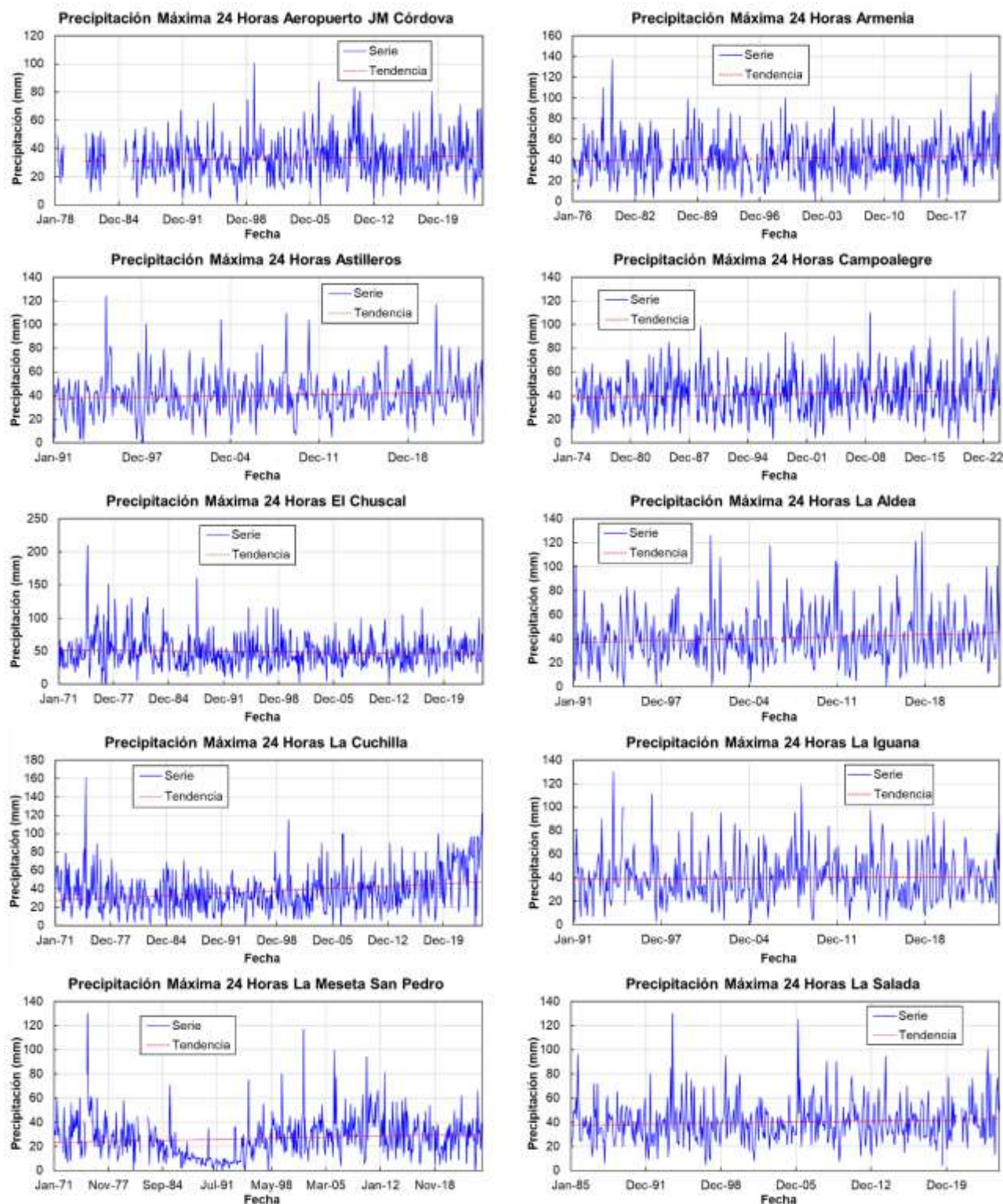
ID	Código	Nombre	R^2	R	n	T	T_c	S	Prueba
1	23085270	Aeropuerto JM Cordova	0,0056	0,0749	564	1,6806	1,9647	2,427E-04	No Hay
2	26200140	Armenia	0,0066	0,0811	576	1,9173	1,9642	3,161E-04	No Hay
3	27011110	Astilleros	0,0083	0,0912	408	1,8449	1,9658	4,542E-04	No Hay
4	23080650	Campoalegre	0,0130	0,1139	612	2,8164	1,9639	3,832E-04	Hay
5	27010770	El Chuscal	0,0073	0,0853	648	2,1697	1,9637	-3,579E-04	Hay
6	26205080	La Aldea	0,0113	0,1064	408	2,1432	1,9659	6,322E-04	Hay
7	27010820	La Cuchilla	0,0703	0,2651	648	6,9709	1,9637	1,011E-03	Hay
8	27011120	La Iguana	0,0012	0,0353	408	0,7097	1,9659	2,006E-04	No Hay
9	27010800	La Meseta San Pedro	0,0159	0,1259	648	3,1763	1,9638	3,644E-04	Hay
10	27015260	La Salada	0,0074	0,0861	480	1,8746	1,9650	3,485E-04	No Hay
11	26230180	Llanos de San Juan	0,0429	0,2071	408	4,1316	1,9662	1,374E-03	Hay
12	26200120	Otramina	0,0004	0,0190	636	0,4724	1,9638	-9,237E-05	No Hay
13	27015150	Progreso El Hacienda	0,0001	0,0111	528	0,2436	1,9649	4,332E-05	No Hay
14	27010810	Santa Elena	0,0110	0,1050	648	2,6023	1,9639	3,293E-04	Hay
15	27015090	Tulio Ospina	0,0057	0,0757	888	2,1216	1,9630	1,719E-04	Hay

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Los resultados obtenidos indican comportamiento variable para las diferentes estaciones de precipitación, con presencia de tendencias en algunos de los datos. De acuerdo a estos resultados, se cuenta con un incremento ascendente de las series de precipitación máxima en 24 horas que son estudiadas, con un promedio en la pendiente de 0,00036.

El análisis se ha realizado de forma regional con el fin de evaluar el comportamiento de la precipitación máxima en 24 horas en el área del territorio de interés, así como en las zonas colindantes y posteriormente, determinar de forma precisa el comportamiento espacial de la variable. Posteriormente, se presentará el procedimiento realizado para analizar de manera distribuida, los

cambios de la precipitación máxima para toda la zona evaluada. Este análisis se complementa con la estimación de valores atípicos al interior de las series analizadas. En la Ilustración 2, se presentan las series gráficas para cada una de las estaciones estudiadas y la línea de tendencia en cada una de estas.



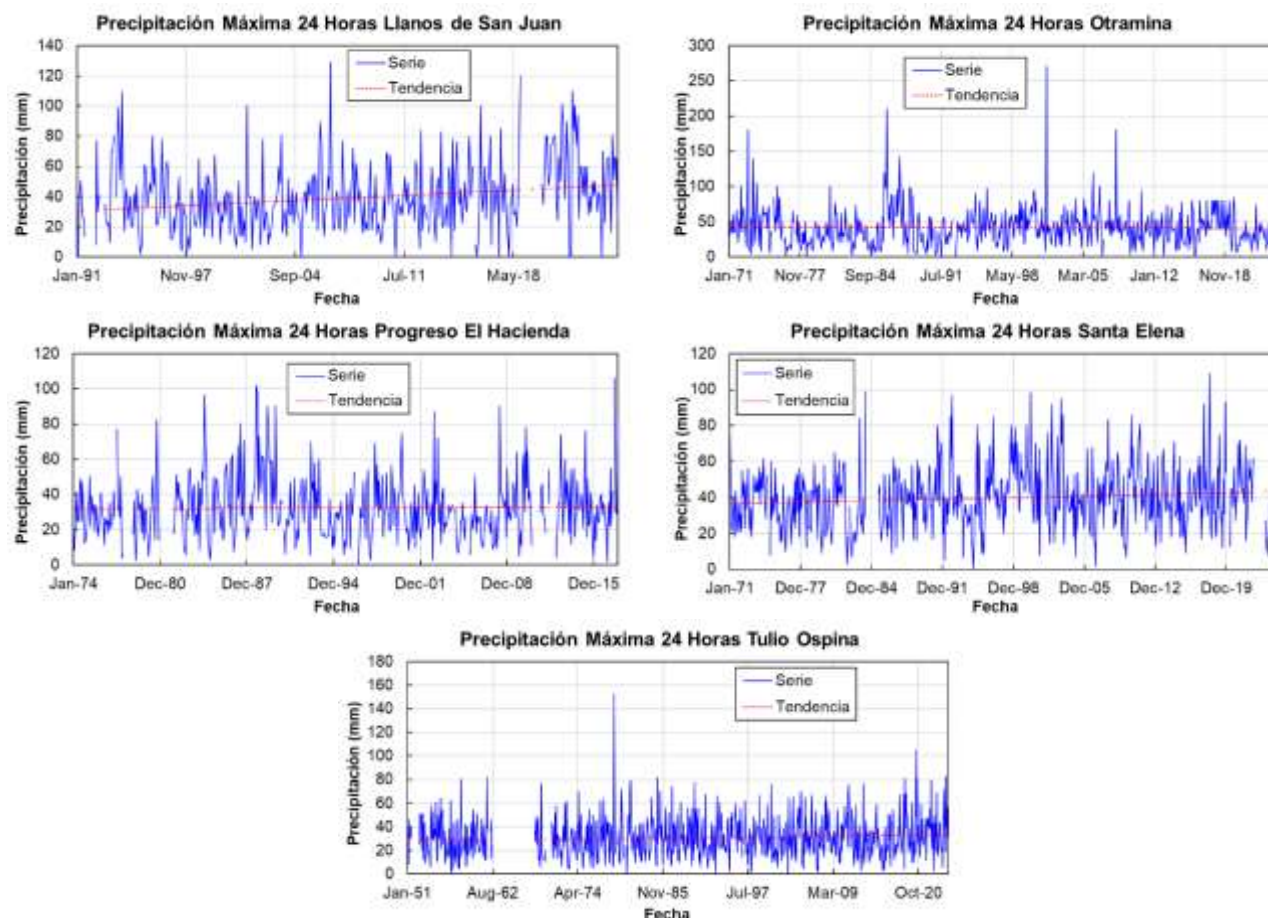


Ilustración 2. Series de precipitación máxima en 24 horas y la tendencia.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

1.1.1.3 Valores Atípicos Serie Precipitación Máxima en 24 Horas

En estadística, un valor atípico o “outlier” es un dato que es considerablemente diferente a los otros datos de la muestra. Con frecuencia, los valores atípicos en un conjunto de datos pueden alertar sobre anomalías experimentales, errores en las mediciones tomadas o de las operaciones aritméticas de quienes operan con ellos y debido a esto, en ocasiones podrían ser descartados del conjunto de datos. En series de datos hidrológicos se pueden encontrar valores atípicos moderados y extremos, que pueden ser detectados usando herramientas estadísticas. Incluso, los paquetes estadísticos especializados proporcionan rutinas para detectar estos valores.

El procedimiento consiste en determinar los límites o extremos de la muestra, con el fin de evaluar los valores que se encuentren por fuera de dicho intervalo, los cuales corresponden a “outliers” para posteriormente analizar si deberán ser retirados o conservados en la muestra. El análisis presentado para la serie de precipitación máxima en 24 horas para las diferentes estaciones evaluó los outliers extremos con el fin de retirar aquellos valores que se alejan bastante del comportamiento promedio de los datos.

Existente diferentes procedimientos para determinar el intervalo antes mencionado, tales como el método de la desviación estándar típica, donde el intervalo se estima de la siguiente manera:

$$LimInf = \mu - k \cdot \sigma$$

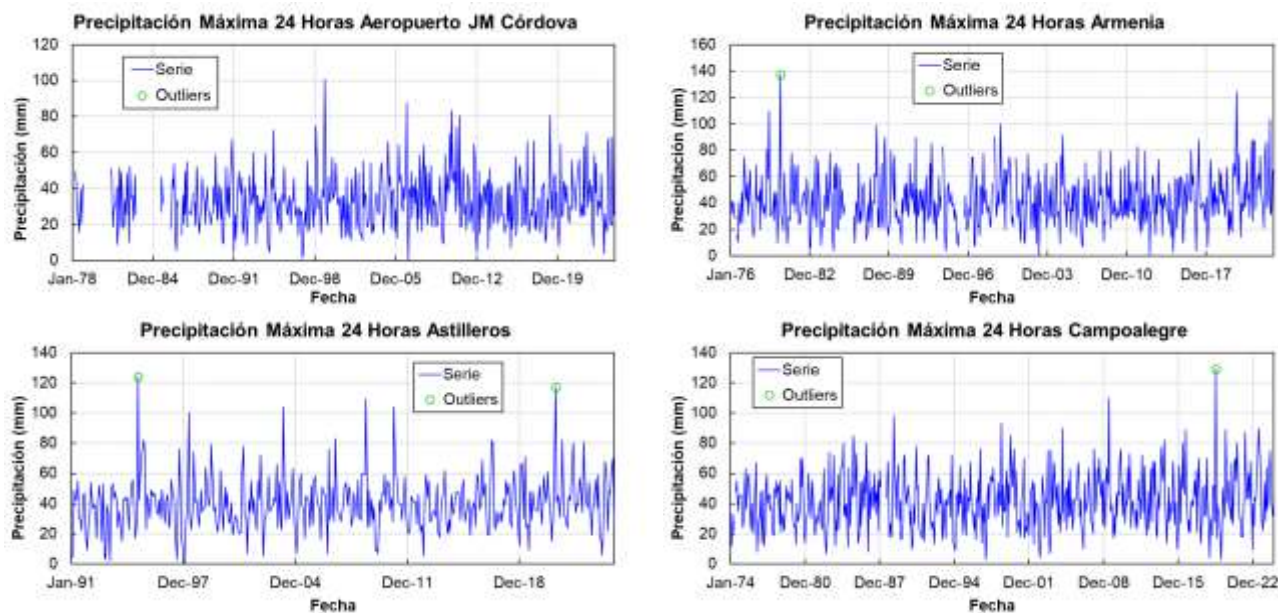
$$LimSup = \mu + k \cdot \sigma$$

Donde μ es la media de la muestra, k es una constante que varía entre 3 y 4 (dependiendo del rango a utilizar dentro del análisis de detección de outliers) y σ , es la desviación estándar típica de los datos. Otra forma de estimar un valor anómalo dentro de la muestra consiste en el método del Test de Tukey, que toma como referencia la diferencia entre el primer cuartil Q_1 y el tercer cuartil Q_3 de la muestra, también denominado como rango intercuartil. La expresión para determinar los límites del intervalo es la siguiente:

$$LimInf = Q_1 - k \cdot (Q_3 - Q_1)$$

$$LimSup = Q_3 + k \cdot (Q_3 - Q_1)$$

Para el método en función de los cuartiles, se tiene que k corresponde a 1,5 para determinación de datos atípicos leves o moderados y a 3,0 para datos atípicos extremos. En la Ilustración 3, se muestran las series de precipitación máxima en 24 horas para cada una de las estaciones, así como con los valores atípicos que fueron detectados en estas.



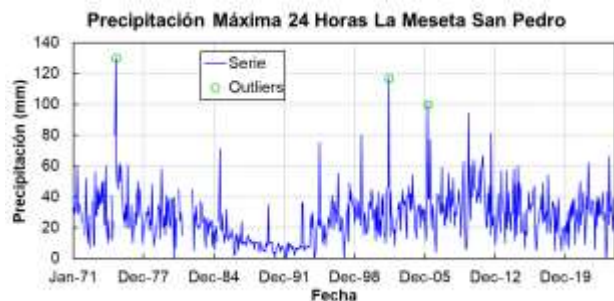
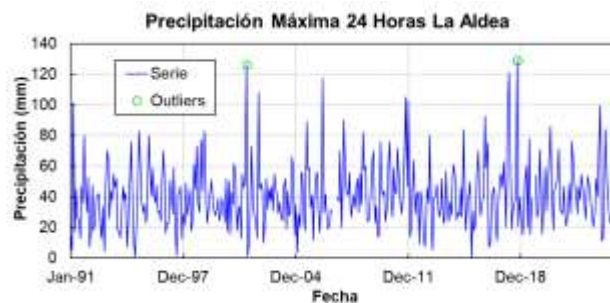




Ilustración 3. Series de precipitación máxima en 24 horas y valores atípicos.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Al aplicar el procedimiento previamente mencionado, se determina los límites máximos que permiten identificar los valores atípicos en cada una de las series de precipitación máxima en 24 horas, límites que son mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Límites superiores – valores atípicos (mm).

ID	Código	Nombre	Límite Superior
1	23085270	Aeropuerto JM Cordova	97,85
2	26200140	Armenia	126,00
3	27011110	Astilleros	109,00
4	23080650	Campoalegre	124,00
5	27010770	El Chuscal	141,00
6	26205080	La Aldea	125,10
7	27010820	La Cuchilla	126,00
8	27011120	La Iguana	124,25
9	27010800	La Meseta San Pedro	99,00
10	27015260	La Salada	105,00
11	26230180	Llanos de San Juan	132,60
12	26200120	Otramina	143,00
13	27015150	Progreso El Hacienda	103,33
14	27010810	Santa Elena	116,00
15	27015090	Tulio Ospina	108,13

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En la Tabla 4 a Tabla 6, se muestran los valores atípicos encontrados en el análisis realizado, para las diferentes series de precipitación máxima de 24 horas a partir de la prueba intercuartil.

Tabla 4. Valores atípicos (mm) – 1.

Aeropuerto JM Cordova		Armenia		Astilleros		Campoalegre		El Chuscal	
Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor
-	-	Jun-80	137,00	Mar-95	124,00	Jul-19	129,00	Sep-74	210,00
-	-	-	-	Apr-21	117,00	-	-	May-77	151,00
-	-	-	-	-	-	-	-	Aug-88	160,00

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 5. Valores atípicos (mm) – 2.

La Aldea		La Cuchilla		La Iguana		La Meseta San Pedro		La Salada	
Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor
Dec-01	126,00	Nov-74	161,00	Mar-94	130,00	Apr-75	130,00	Jul-94	130,00
Oct-18	129,00	-	-	-	-	Jun-02	117,00	Mar-06	125,00
-	-	-	-	-	-	Apr-06	100,00	-	-

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 6. Valores atípicos (mm) – 3.

Llanos de San Juan		Otramina		Progreso El Hacienda		Santa Elena		Tulio Ospina	
Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor
-	-	Nov-72	180,00	Sep-17	106,00	-	-	Apr-79	152,60
-	-	Apr-86	210,00	-	-	-	-	-	-
-	-	Sep-01	270,00	-	-	-	-	-	-
-	-	Jun-08	180,00	-	-	-	-	-	-

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Usando la metodología descrita es posible determinar si ciertos datos son valores atípicos extremos o ningún tipo de valor atípico. Sin embargo, identificar a un dato como valor atípico solamente lo categoriza como un candidato que puede ignorarse del conjunto de datos, pero no como un dato que debe ignorarse. El motivo por el cual un valor atípico se diferencia del resto de los valores del conjunto de datos permite determinar si se debe o no ignorar el valor atípico. Por lo general, los valores atípicos cuyo origen se le puede atribuir a un error de algún tipo, por ejemplo, en la medición, en el registro, o en el diseño experimental, se ignoran. Por otro lado, los valores atípicos que no pueden atribuírseles a un error y que revelan nueva información o tendencias que no habían sido predichas por lo general no pueden ser ignorados.

Con base en este análisis y con el fin de evaluar si el registro detectado como anormal es ocasionado por algún comportamiento climatológico como el ENSO (El Niño Southern Oscillation), se realizó la evaluación usando el Índice de El Niño Oceánico (ONI, por sus siglas en inglés). El fenómeno macro climático mencionado se refiere a las perturbaciones intensas que pueden ocurrir cada 4 a 6 años y que se observan particularmente bien en la temperatura superficial del océano Pacífico ecuatorial. Estas variaciones en la temperatura del océano están asociadas a cambios en la circulación atmosférica, afectando los patrones de precipitación y temperatura a nivel global. El ENSO tiene dos fases principales: El Niño, caracterizado por un calentamiento anómalo de las aguas del Pacífico ecuatorial central y oriental, y La Niña, asociada a un enfriamiento anómalo en la misma región. Estos eventos pueden generar impactos significativos en el clima de diversas regiones, alterando la intensidad y frecuencia de sequías, lluvias extremas e incluso la actividad ciclónica. La Tabla 7, muestra el registro del ONI, donde se indica con color azul los periodos en los cuales se ha presentado los episodios fríos (La Niña) y en rojo los episodios cálidos (El Niño).

Tabla 7. Registro histórico ONI.

Año	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1951	-0,8	-0,5	-0,2	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,0	0,8
1952	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,0	-0,1	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1
1953	0,4	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
1954	0,8	0,5	0,0	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,8	-0,9	-0,8	-0,7	-0,7
1955	-0,7	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-1,1	-1,4	-1,7	-1,5
1956	-1,1	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4
1957	-0,2	0,1	0,4	0,7	0,9	1,1	1,3	1,3	1,3	1,4	1,5	1,7
1958	1,8	1,7	1,3	0,9	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6
1959	0,6	0,6	0,5	0,3	0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	0,0	0,0	0,0
1960	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1
1961	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,1	-0,1	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2
1962	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	0,0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4
1963	-0,4	-0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
1964	1,1	0,6	0,1	-0,3	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
1965	-0,6	-0,3	-0,1	0,2	0,5	0,8	1,2	1,5	1,9	2,0	2,0	1,7
1966	1,4	1,2	1,0	0,7	0,4	0,2	0,2	0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3
1967	-0,4	-0,5	-0,5	-0,4	-0,2	0,0	0,0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4
1968	-0,6	-0,7	-0,6	-0,4	0,0	0,3	0,6	0,5	0,4	0,5	0,7	1,0
1969	1,1	1,1	0,9	0,8	0,6	0,4	0,4	0,5	0,8	0,9	0,8	0,6
1970	0,5	0,3	0,3	0,2	0,0	-0,3	-0,6	-0,8	-0,8	-0,7	-0,9	-1,1
1971	-1,4	-1,4	-1,1	-0,8	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-1,0	-0,9
1972	-0,7	-0,4	0,1	0,4	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,1	2,1
1973	1,8	1,2	0,5	-0,1	-0,5	-0,9	-1,1	-1,3	-1,5	-1,7	-1,9	-2,0
1974	-1,8	-1,6	-1,2	-1,0	-0,9	-0,8	-0,5	-0,4	-0,4	-0,6	-0,8	-0,6
1975	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-1,0	-1,1	-1,2	-1,4	-1,4	-1,6	-1,7
1976	-1,6	-1,2	-0,7	-0,5	-0,3	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,8
1977	0,7	0,6	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	0,8
1978	0,7	0,4	0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,1	0,0
1979	0,0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,5	0,6
1980	0,6	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,0	-0,1	0,0	0,1	0,0
1981	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1
1982	0,0	0,1	0,2	0,5	0,7	0,7	0,8	1,1	1,6	2,0	2,2	2,2
1983	2,2	1,9	1,5	1,3	1,1	0,7	0,3	-0,1	-0,5	-0,8	-1,0	-0,9
1984	-0,6	-0,4	-0,3	-0,4	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,6	-0,9	-1,1
1985	-1,0	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4
1986	-0,5	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,2	0,4	0,7	0,9	1,1	1,2
1987	1,2	1,2	1,1	0,9	1,0	1,2	1,5	1,7	1,6	1,5	1,3	1,1
1988	0,8	0,5	0,1	-0,3	-0,9	-1,3	-1,3	-1,1	-1,2	-1,5	-1,8	-1,8
1989	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1
1990	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4
1991	0,4	0,3	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,8	1,2	1,5
1992	1,7	1,6	1,5	1,3	1,1	0,7	0,4	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1
1993	0,1	0,3	0,5	0,7	0,7	0,6	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0	0,1
1994	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	1,0	1,1

Año	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1995	1,0	0,7	0,5	0,3	0,1	0,0	-0,2	-0,5	-0,8	-1,0	-1,0	-1,0
1996	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5
1997	-0,5	-0,4	-0,1	0,3	0,8	1,2	1,6	1,9	2,1	2,3	2,4	2,4
1998	2,2	1,9	1,4	1,0	0,5	-0,1	-0,8	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6
1999	-1,5	-1,3	-1,1	-1,0	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,7
2000	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-0,7	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7
2001	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3
2002	-0,1	0,0	0,1	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,1
2003	0,9	0,6	0,4	0,0	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4
2004	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
2005	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8
2006	-0,8	-0,7	-0,5	-0,3	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,9
2007	0,7	0,3	0,0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,8	-1,1	-1,4	-1,5	-1,6
2008	-1,6	-1,4	-1,2	-0,9	-0,8	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,6	-0,7
2009	-0,8	-0,7	-0,5	-0,2	0,1	0,4	0,5	0,5	0,7	1,0	1,3	1,6
2010	1,5	1,3	0,9	0,4	-0,1	-0,6	-1,0	-1,4	-1,6	-1,7	-1,7	-1,6
2011	-1,4	-1,1	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,5	-0,7	-0,9	-1,1	-1,1	-1,0
2012	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,0	-0,2
2013	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3
2014	-0,4	-0,4	-0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,0	0,2	0,4	0,6	0,7
2015	0,6	0,6	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,5	2,6
2016	2,5	2,2	1,7	1,0	0,5	0,0	-0,3	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6
2017	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	-0,1	-0,4	-0,7	-0,8	-1,0
2018	-0,9	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0,0	0,1	0,2	0,5	0,8	0,9	0,8
2019	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5
2020	0,5	0,5	0,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6	-0,9	-1,2	-1,3	-1,2
2021	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-1,0	-1,0
2022	-1,0	-0,9	-1,0	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,9	-1,0	-1,0	-0,9	-0,8
2023	-0,7	-0,4	-0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,3	1,6	1,8	1,9	2,0
2024	1,8	1,5	1,1	0,7	0,4	0,2	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5

Fuente: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.

Se realizó un análisis conjunto en cuanto a los valores atípicos identificados y si estos pueden ser explicados por periodos macroclimáticos, así como la variabilidad gráfica de cada una de las series. De acuerdo con lo anterior, se retiraron los valores que se indican en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores retirados de las muestras.

El Chuscal		La Meseta San Pedro		La Salada		Otramina		Tulio Ospina	
Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor
Sep-74	210,00	Jun-02	117,00	Jul-94	130,00	Nov-72	180,00	Apr-79	152,60
-	-	-	-	-	-	Apr-86	210,00	-	-
-	-	-	-	-	-	Sep-01	270,00	-	-

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

1.1.1.4 Análisis del Cambio Climático

El cambio climático, es definido por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) como una “variación del estado del clima identificable (p. ej., mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos (Corantioquia, 2018). Según el IPCC, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debidas a las actividades económicas desarrolladas por el ser humano están generando cambios en los patrones climáticos alrededor del planeta tierra. Estos cambios generan a su vez amenazas y riesgos en los sistemas humanos y naturales, poniendo en peligro los servicios ecosistémicos que soportan la vida humana (Corantioquia, 2018).

En el ámbito nacional, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, como entidad técnica y científica del Sistema Nacional Ambiental SINA, ha liderado todo lo concerniente al cambio climático en el país; en el año 2001 presenta la Primera Comunicación Nacional de Cambio Climático ante la CMNUCC (IDEAM, 2001, mencionado en Corantioquia, 2018), donde se identificaron los principales cambios que se esperarían en el país ante el fenómeno, los principales ecosistemas que se verían afectados y las primeras medidas de adaptación; en el año 2010 presentó la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático (IDEAM, 2010a, mencionado en Corantioquia, 2018), donde se ratifica la alta vulnerabilidad del país ante el cambio climático y la variabilidad climática; y entre los años 2015 y 2017 elaboró la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (IDEAM et al., 2017, mencionado en Corantioquia, 2018), en la cual se reconoció que las diferentes regiones del país presentan diferencias muy grandes en cuanto a desarrollo económico, patrones de ocupación poblacional y vulnerabilidad ante el cambio y la variabilidad climática, por lo que regionalizó gran parte de la información para que cada departamento y en lo posible cada municipio conocieran su situación, tanto en emisiones GEI como en cambios esperados en el clima y la vulnerabilidad ante los mismos.

Desde el punto de vista climático, de acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el territorio bajo jurisdicción de Corantioquia se encuentra influenciado por cuatro (4) regiones hidroclimáticas: la del Medio Cauca – Alto Nechí, la del Magdalena Medio, la del Sinú – San Jorge – Bajo Nechí – Urabá, y en una franja muy pequeña por la del Bajo Magdalena. Las dos primeras se caracterizan por presentar regímenes bimodales de precipitación, con las mayores lluvias en los periodos abril-mayo y septiembre-octubre, y las menores en los periodos enero-febrero y julio; las otras dos regiones hidroclimáticas presentan regímenes monomodales, con las menores lluvias en el periodo enero-marzo; las zonas más húmedas se ubican en el Bajo Cauca y pueden superar los 5.000 mm anuales de precipitación, mientras las zonas más secas se ubican en el cañón del río Cauca y pueden llegar a presentar hasta 1.500 mm anuales de precipitación. Debido a la topografía propia de las dos cordilleras que atraviesan el territorio, la temperatura promedio anual puede ir desde los 28°C o más en algunas zonas del Bajo Cauca y el Magdalena Medio, hasta los 2°C o menos en los páramos de las cumbres de las montañas (Corantioquia, 2018).

Los Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura en Colombia desarrollados por el IDEAM et al. (2015) en el marco de la construcción de la Tercera Comunicación Nacional de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), calculan los cambios esperados en estas dos variables climáticas en los periodos 2011-2040 (corto plazo), 2041-2070 (mediano plazo) y 2071-2100 (largo plazo).

Sobre los efectos directos en el territorio, en el caso de la lluvia acumulada anual, se espera que no se presenten variaciones significativas en más del 50% de este; sin embargo, también es posible que para ambos periodos de tiempo se presenten, tanto, reducciones de hasta un 30% en la región del bajo Nechí y del Bajo Cauca de la territorial de Panzenú, como incrementos de hasta un 40% o más en las territoriales de Hevéxicos y Aburrá norte, e incrementos de hasta un 20-30% en diferentes sectores de las territoriales de Taja Mies, Aburrá sur, Cartama y Citará; para la temperatura promedio anual se esperan incrementos generalizados en todo el territorio, para el corto plazo los incrementos pueden ir desde los 0,0-0,5 °C en las zonas de páramo, hasta los 1,0-1,2 °C en las zonas que están por debajo de 1.000 m.s.n.m. (como las del Bajo Cauca y el Magdalena Medio), en el largo plazo estos incrementos pueden ser mayores, yendo desde los 1,0 °C en las zonas de páramo, hasta los 2,5- 3,0 °C en las zonas que están por debajo de los 1.000 m.s.n.m. (Corantioquia, 2018). En la Ilustración 4, se presentan los cambios esperados en las variables precipitación y temperatura.

Estos cambios exigen que las instituciones, la población y demás actores del territorio se preparen para diferentes tipos de impactos, que pueden incrementar la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, deslaves, erosión, acidificación del suelo y otros efectos asociados a la mayor disponibilidad de agua en zonas de alta pendiente en los sitios donde se espera que aumente la precipitación anual, así como cambios en los tipos de ecosistemas y de coberturas vegetales (forestales y cultivos) debido a las reducciones en precipitación en las zonas donde se presentará (Corantioquia, 2018). Estos escenarios muestran que desde el corto plazo se esperan incrementos de hasta un 40% en gran parte de ambas cuencas (río Cauca y río Magdalena), lo que puede generar aumentos en los impactos derivados de la mayor disponibilidad de agua en la cuenca, como son cambios en los niveles en los ríos, cambios en los niveles de sedimentos arrastrados e incluso cambios en las formas de desarrollar las actividades económicas ribereñas (Corantioquia, 2018).

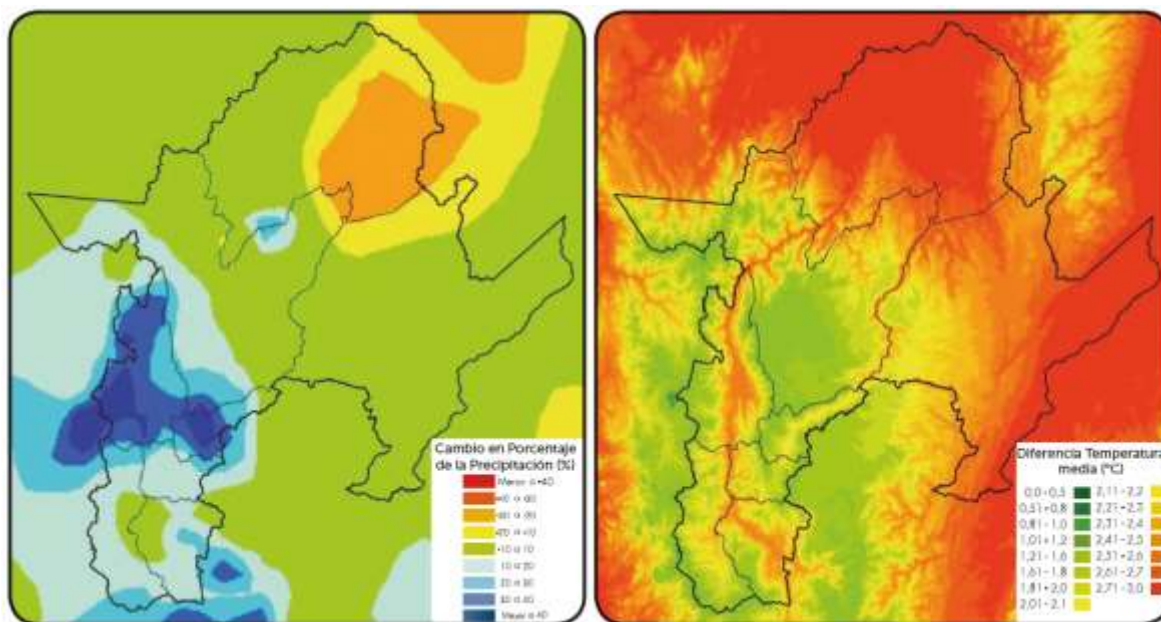


Ilustración 4. Cambios esperados en precipitación y temperatura para jurisdicción Corantioquia, periodo 2071 – 2100.

Fuente: Corantioquia, 2018.

Por otra parte, los efectos del cambio climático en términos de variabilidad y eventos climáticos extremos aumentan la incertidumbre y la complejidad de la Gestión del Riesgo de Desastres y la atención de emergencias. En los municipios donde haga falta capacidad para la Gestión del Riesgo asociada a la variabilidad del clima se magnificarán los impactos del clima sobre la población, la biodiversidad, los sectores productivos y la infraestructura.

El calentamiento Global es un hecho, y muchas de las actividades antropogénicas lo aumentan, por lo cual se deben implementar medidas de adaptación y mitigación al cambio climático y a la variabilidad climática manifiesta en fenómenos como el niño y la niña, con periodos de sequía y de lluvia cada vez más intensos y con aumento de extremos climáticos, como la temporada lluvias 2010-2011 y la intensa sequía en 2015, con un importante número de incendios de cobertura vegetal, amenaza de desabastecimiento de agua, reducción de la producción de alimentos.

Según el análisis mostrado en Corantioquia, 2018, se retoman los resultados del estudio adelantado por IDEAM, donde se define para la variable precipitación y para la zona de interés, un incremento que varía entre 10% y el 40% para el escenario a largo plazo del cambio climático (al año 2100), por lo cual, se asume un máximo incremento en la precipitación del 40%. Estos resultados, serán contemplados con el fin de mayorar la precipitación máxima en 24 horas para la zona aferente al municipio de estudio, y considerar dicho incremento como factor de seguridad al momento de estimar el detonante de lluvia. Se tiene en cuenta que el incremento en la variable de precipitación es consecuente con el

análisis de tendencia para las diferentes series utilizadas, donde se puede determinar en general, un incremento en la variable para la zona de interés.

1.1.1.5 *Análisis de Frecuencia (precipitación máxima en 24 horas)*

El análisis de frecuencia es una herramienta utilizada para predecir el comportamiento futuro de una variable hidrológica o climatológica en un sitio de interés, a partir de la información histórica. Es un método basado en procedimientos estadísticos que permite calcular la magnitud extrema de la variable de una zona asociados a diferentes probabilidades de ocurrencia. Su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie histórica, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidades seleccionada. Cuando se pretende realizar extrapolaciones a período de retorno mayor que la longitud de la serie disponible, el error relativo asociado a la distribución de probabilidades utilizada es más importante, mientras que en interpolaciones la incertidumbre está asociada principalmente a la calidad de los datos a modelar, en ambos casos la incertidumbre es alta dependiendo de la cantidad de datos disponibles (Ashkar, et al. 1994). Para determinar la magnitud de eventos extremos, se requiere conocer la variación de la variable respecto a la media. Chow en 1994, presentó la forma de determinar esta variación a partir de un factor de frecuencia K_{Tr} que puede ser expresado como:

$$P_{\max_{Tr}} = \mu_{P_{\max}} + K_{Tr} \sigma_{P_{\max}}$$

Para una distribución de probabilidad dada, puede determinarse una relación entre K y el período de retorno Tr . Esta relación puede expresarse en términos matemáticos o por medio del uso de una tabla. El análisis de frecuencia consiste en determinar los parámetros de las distribuciones de probabilidad y determinar con el factor de frecuencia la magnitud del evento para un período de retorno dado. Para el presente capítulo, se realizó la estimación de la precipitación máxima en 24 horas de forma extrema para los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años a través de las distribuciones de probabilidad Normal, Log Normal y Gumbel. En particular, para las distribuciones Lognormal y Gumbel se presentan las siguientes expresiones para el factor de frecuencia K_{Tr} :

$$K_{Tr} = \frac{\exp\left\{Z_{Tr} \sqrt{\ln(1 + Cv^2)} - 0,5 \ln(1 + Cv^2)\right\} - 1}{Cv}$$

$$K_{Tr} = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{Tr}{Tr - 1} \right) \right] \right\}$$

Donde Z_{Tr} es el cuantil calculado para la distribución normal estándar y Cv es el coeficiente de variación de la serie.

Distribución de probabilidad

A continuación, se describen las principales distribuciones de probabilidad utilizadas en el presente trabajo, la forma de estimar sus parámetros y el factor de frecuencia.

Distribución Normal

La función Normal es el modelo más utilizado y con mayor importancia en el campo de la estadística (Varas y Bois, 1998). Sin embargo, su uso es muy limitado en hidrología, dado que las variables raramente se comportan de esta forma. Linsley et al., (1988) señalan que el uso de esta función, en términos hidrológicos, debe reducirse a zonas húmedas donde el valor medio es alto, no siendo recomendable para valores extremos. Función de distribución de probabilidad normal:

$$F(X) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Dónde: x: Variable aleatoria, μ : Media de la población Y σ : Desviación estándar de la población. Para resolver esta función se recurren a métodos numéricos para evaluarla, y para hacer esto más sencillo se le ha asignado una variable estandarizada, cuya expresión es la siguiente:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

La cual está normalmente distribuida con media cero y desviación estándar unitaria. Así, la función principal queda como:

$$F(X) = F(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Distribución Log-Normal

Las variables físicas de interés en Hidrología (precipitación, caudal, evaporación y otras) son generalmente positivas, por lo cual es usual que presenten distribuciones asimétricas. Así, se ha propuesto aplicar una transformación logarítmica (Varas y Bois, 1998), donde $Y = \ln X$, está normalmente distribuida; luego X está distribuida en forma Normal, y su función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2}$$

Donde los parámetros de la función son α y β , que son la media y la desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria, y están definidos como sigue:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n}$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right]^{1/2}$$

Al igual que en la distribución normal, se le asigna a "z" los siguientes valores:

$$z = \frac{\ln x - \alpha}{\beta}$$

Distribución Gumbel

Según Aparicio, 1997, si se tienen N muestras, cada una de las cuales contienen n eventos y si se selecciona el máximo de x de los n eventos de cada muestra, es posible demostrar que, a medida que n aumenta, la función de distribución de probabilidad de x tiende a:

$$F(x) = e^{-e^{-(x-\mu)}}, \text{ para } -\infty \leq x \leq \infty$$

Dónde: x: Representa el valor a asumir por la variable aleatoria y e: Constante de Neper. Los parámetros de la distribución de una muestra de tamaño infinito tienden a los siguientes valores, en base a la media aritmética y la desviación estándar de la muestra:

$$d = \frac{1}{0.779696 \cdot S} \text{ y } \mu = \bar{x} - 0.450047 \cdot S$$

Se tienen en cuenta estos procedimientos, en cuanto al análisis estadístico de las series de precipitación máxima en el área de estudio, información que se muestra en los capítulos posteriores.

Serie de Precipitación Máxima en 24 Horas

De acuerdo con la información disponible en la zona de estudio, se cuenta con un total de 15 estaciones de precipitación, tal y como fue presentado en la Tabla 1. A continuación, se muestra un análisis detallado en cuanto a la serie de precipitación máxima en 24 horas para los valores máximos anuales, así como las pruebas de bondad y ajuste, con el fin de determinar la mejor distribución que represente el comportamiento de la variable en la zona. Este análisis, solo se presenta para las estaciones Astilleros (27011110), El Chuscal (27010770), La Aldea (26205080), La Iguaá (27011120), Santa Elena (27010810) y Tulio Ospina (27015090), las cuales se encuentran ubicadas sobre diferentes sectores de influencia para el municipio de interés en el presente estudio. Es de indicar que, si bien se muestra el análisis y resultados detallado para las estaciones previamente indicadas, estos procedimientos fueron aplicados para la totalidad de las estaciones evaluadas.

Para la zona de estudio, se partió de la serie de precipitación máxima en 24 horas inicialmente disponible y con resolución mensual, que luego de realizar el análisis de valores atípicos, se contó con

la serie de máximos anuales, en una longitud mínima de registro de 33 años para la estación Llanos de San Juan (26230180) y con un registro hasta 69 años en la estación Tulio Ospina (27015090). Según (Chow, 1994), para aplicar ajustes a funciones de probabilidad para datos hidrológicos o meteorológicos, es necesario contar con un mínimo de 15 valores, por lo que las longitudes de las series presentan una cantidad de datos para la implementación de estos métodos. En la Tabla 9 a Tabla 14, se presentan los valores máximos anuales de la precipitación máxima en 24 horas con sus respectivos años para las estaciones que son presentadas en detalle.

Tabla 9. Precipitación máxima en 24 horas – Astilleros (27011110).

Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)
1991	55,00	1998	100,00	2005	60,00	2012	46,00	2019	71,00
1992	54,00	1999	79,00	2006	58,00	2013	59,00	2020	61,00
1993	53,00	2000	62,00	2007	83,00	2014	62,00	2021	117,00
1994	56,00	2001	78,00	2008	56,00	2015	56,00	2022	80,00
1995	124,00	2002	72,00	2009	109,00	2016	69,00	2023	81,00
1996	49,00	2003	66,00	2010	59,00	2017	82,00	2024	70,00
1997	76,00	2004	104,00	2011	104,00	2018	62,00	-	-

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 10. Precipitación máxima en 24 horas – El Chuscal (27010770).

Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)
1971	67,00	1982	131,00	1993	80,00	2004	73,00	2015	65,00
1972	65,00	1983	61,00	1994	80,00	2005	74,00	2016	80,00
1973	70,00	1984	114,00	1995	115,00	2006	93,00	2017	115,00
1974	210,00	1985	70,00	1996	89,00	2007	63,00	2018	75,00
1975	105,00	1986	65,00	1997	116,00	2008	84,00	2019	66,00
1976	120,00	1987	90,00	1998	115,00	2009	100,00	2020	87,00
1977	151,00	1988	160,00	1999	90,00	2010	90,00	2021	69,00
1978	129,00	1989	80,00	2000	82,00	2011	69,00	2022	79,00
1979	119,00	1990	88,00	2001	72,00	2012	98,00	2023	69,00
1980	130,00	1991	56,00	2002	80,00	2013	70,00	2024	100,00
1981	109,00	1992	55,00	2003	65,00	2014	105,00	-	-

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 11. Precipitación máxima en 24 horas – La Aldea (26205080).

Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)
1991	101,00	1998	73,00	2005	89,00	2012	103,00	2019	78,00
1992	52,80	1999	83,00	2006	117,00	2013	80,00	2020	86,00
1993	70,00	2000	52,00	2007	70,00	2014	61,00	2021	71,60
1994	76,00	2001	126,00	2008	90,00	2015	84,00	2022	76,50

1995	83,00	2002	108,00	2009	82,00	2016	93,00	2023	99,50
1996	70,00	2003	55,00	2010	76,00	2017	63,00	2024	100,60
1997	59,00	2004	66,00	2011	105,00	2018	129,00	-	-

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 12. Precipitación máxima en 24 horas – La Iguaná (27011120).

Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)
1991	81,30	1998	44,00	2005	74,00	2012	67,00	2019	96,00
1992	52,00	1999	79,00	2006	76,00	2013	67,00	2020	89,00
1993	90,00	2000	96,00	2007	61,20	2014	97,00	2021	64,00
1994	130,00	2001	76,00	2008	95,00	2015	86,00	2022	74,00
1995	69,00	2002	95,00	2009	118,00	2016	70,00	2023	55,00
1996	45,00	2003	86,00	2010	76,00	2017	72,00	2024	98,00
1997	111,00	2004	81,00	2011	84,00	2018	73,00	-	-

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 13. Precipitación máxima en 24 horas – Santa Elena (27010810).

Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)
1971	80,00	1982	60,00	1993	52,00	2004	52,00	2015	63,00
1972	56,00	1983	84,00	1994	36,00	2005	54,00	2016	56,00
1973	57,00	1984	99,00	1995	80,00	2006	68,00	2017	92,00
1974	62,00	1985	47,00	1996	69,00	2007	52,00	2018	109,00
1975	60,00	1986	53,00	1997	85,00	2008	83,00	2019	93,00
1976	47,00	1987	62,00	1998	80,00	2009	65,00	2020	57,00
1977	56,00	1988	50,00	1999	79,00	2010	86,00	2021	72,00
1978	53,00	1989	61,00	2000	98,00	2011	81,00	2022	62,00
1979	59,00	1990	58,00	2001	70,00	2012	65,00	2023	27,00
1980	58,00	1991	80,00	2002	92,00	2013	67,00	2024	38,00
1981	65,00	1992	97,00	2003	95,00	2014	71,00	-	-

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 14. Precipitación máxima en 24 horas – Tulio Ospina (27015090).

Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)	Año	P Max 24 H (mm)
1951	46,50	1966	-	1981	79,50	1996	56,00	2011	76,20
1952	51,00	1967	-	1982	42,90	1997	62,00	2012	58,20
1953	51,00	1968	48,70	1983	47,80	1998	49,00	2013	76,40
1954	61,00	1969	76,50	1984	64,70	1999	67,00	2014	37,50
1955	64,00	1970	43,50	1985	81,80	2000	76,00	2015	59,20
1956	62,00	1971	57,40	1986	56,60	2001	50,00	2016	50,80
1957	46,00	1972	61,70	1987	73,80	2002	44,00	2017	54,50
1958	80,50	1973	39,10	1988	60,40	2003	66,00	2018	67,50

1959	43,60	1974	69,90	1989	55,80	2004	70,00	2019	80,70
1960	54,50	1975	54,50	1990	77,50	2005	65,00	2020	105,20
1961	82,10	1976	50,00	1991	67,20	2006	67,00	2021	59,50
1962	46,00	1977	63,90	1992	43,40	2007	50,30	2022	79,50
1963	-	1978	49,50	1993	66,30	2008	66,80	2023	69,20
1964	-	1979	44,40	1994	47,00	2009	54,50	2024	82,70
1965	-	1980	72,10	1995	60,00	2010	57,40	-	-

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Comportamiento de la Serie

En esta etapa se calcularon para la serie de datos los estadísticos principales a saber, promedio y desviación estándar. Los estadísticos extraen información de una muestra, señalando las características de la población. Los principales estadísticos son los momentos de primer y segundo orden correspondiente a la media y la varianza, respectivamente.

Media: Muestra la tendencia central de la distribución. Es considerado el primer momento respecto al origen.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Desviación Estándar: La desviación estándar es una medida de la variabilidad ya que es la raíz cuadrada y su valor estimado se denota por:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}$$

El valor estimado de la varianza es denotado por S^2 . En la Tabla 15, se presentan los estadísticos de la serie de precipitación máxima en 24 horas para el sitio de análisis requerida para la aplicación de la metodología propuesta por Chow, 1994, específicamente para las estaciones presentadas en detalle.

Tabla 15. Media y desviación estándar de las variables analizadas.

Parámetro	Astilleros	El Chuscal	La Aldea	La Iguana	Santa Elena	Tulio Ospina
N (Cantidad de Datos)	34	54	34	34	54	74
Media (m3/s)	72,74	91,72	83,21	80,22	67,65	60,90
Desviación Estándar (m3/s)	20,21	29,31	19,88	19,13	17,59	13,29

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Pruebas de Bondad de Ajuste

Se aplicaron las pruebas de Smirnov-Kolmogorov con una confianza del 5%, y de Snedecor y Cochran, con el fin de probar el ajuste de la serie usada a las distribuciones empleadas, Normal, Log-Normal y

Gumbel, analizando el ajuste en las series de precipitación máxima en 24 horas. En la Tabla 16 y Tabla 17, se presentan los resultados obtenidos para la serie de estudio.

Tabla 16. Pruebas de ajuste para las variables analizadas – 1.

Distribución	Astilleros		El Chuscal		La Aldea	
	Kolmogorov	Snedecor	Kolmogorov	Snedecor	Kolmogorov	Snedecor
Normal	No Ajusta	No Ajusta	No Ajusta	No Ajusta	No Ajusta	Ajusta
Log-Normal	No Ajusta	Ajusta	No Ajusta	No Ajusta	No Ajusta	Ajusta
Gumbel	Ajusta	No Aplica	Ajusta	No Aplica	Ajusta	No Aplica

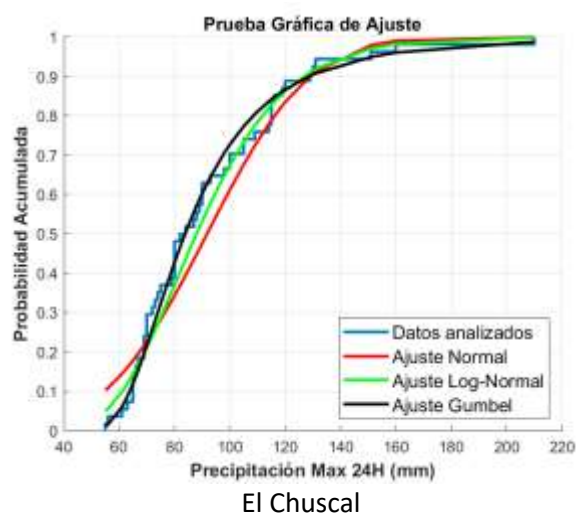
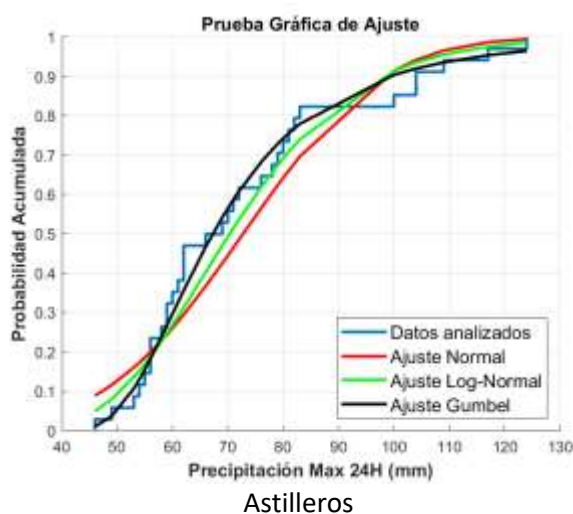
Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 17. Pruebas de ajuste para las variables analizadas – 2.

Distribución	La Iguana		Santa Elena		Tulio Ospina	
	Kolmogorov	Snedecor	Kolmogorov	Snedecor	Kolmogorov	Snedecor
Normal	No Ajusta	Ajusta	No Ajusta	Ajusta	No Ajusta	Ajusta
Log-Normal	No Ajusta	Ajusta	No Ajusta	Ajusta	No Ajusta	Ajusta
Gumbel	Ajusta	No Aplica	Ajusta	No Aplica	Ajusta	No Aplica

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Complementario a las pruebas de ajuste presentadas anteriormente, se analiza gráficamente las series de precipitación máxima en 24 horas mediante la presentación de la probabilidad acumulada de ocurrencia de estas, en conjunto con las probabilidades de ocurrencia de las distribuciones que se aplican en esta metodología. Estos resultados son presentados en la Ilustración 5 para las series analizadas en detalles.



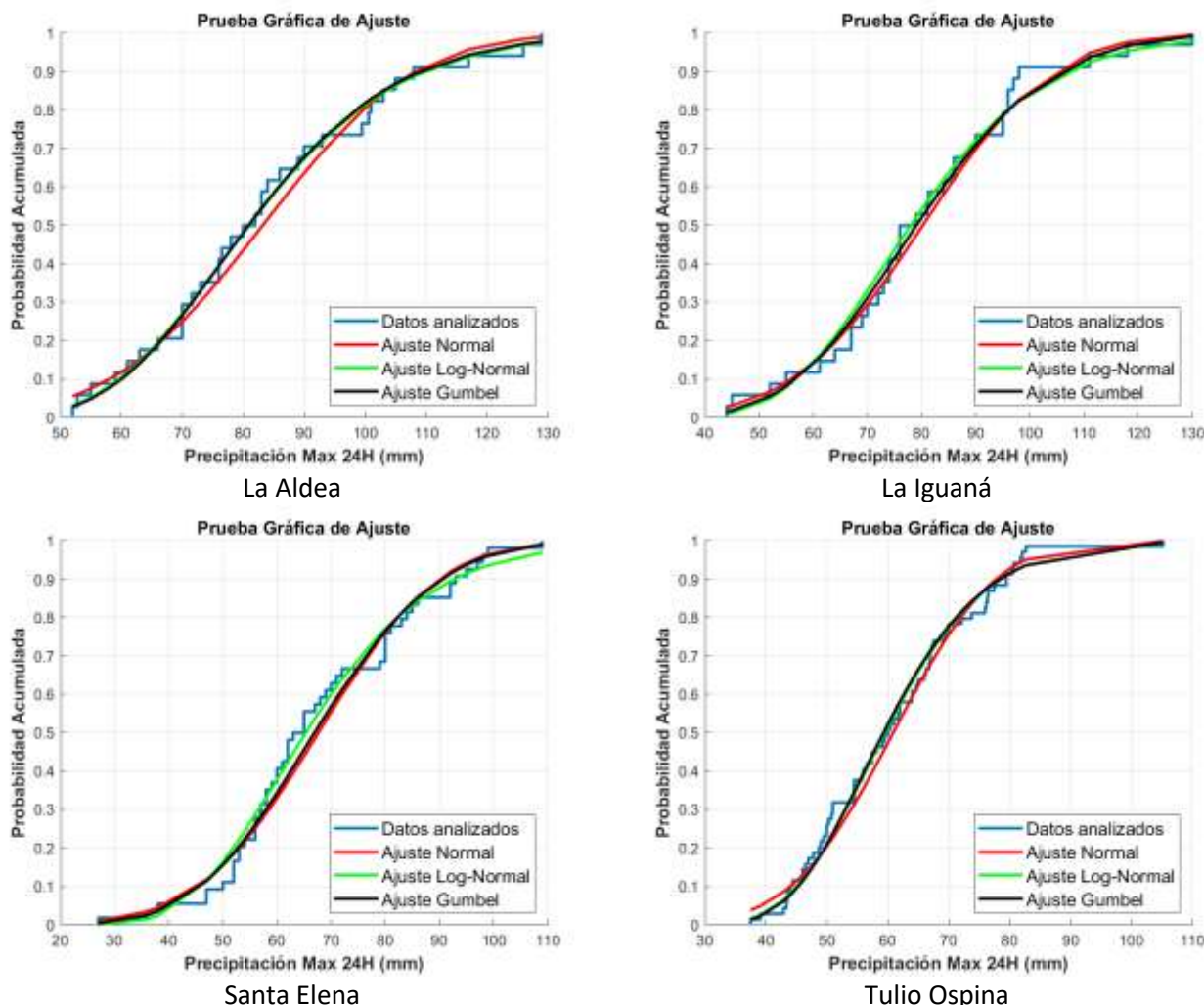


Ilustración 5. Prueba gráfica de ajuste en las series evaluadas en detalle.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Según los resultados obtenidos para la serie de precipitación máxima en 24 horas, se presenta ajuste para la distribución Log Normal en todas las series analizadas, exceptuando la serie de la estación El Chuscal, según prueba Snedecor y Normal solo para la serie de la estación La Aldea, La Iguaná, Santa Elena y Tulio Ospina. Para la prueba Kolmogorov, se presenta ajuste para todas las series y para la distribución Gumbel. La prueba gráfica, también permite analizar un adecuado ajuste de los datos a las distintas distribuciones de probabilidad, permitiendo evidenciar un mejor ajuste para la distribución Gumbel, resultados evidenciados para cada una de las series analizadas.

Teniendo en cuenta estos resultados, se asume como mejor ajuste de los datos a la distribución Gumbel, la cual representa adecuadamente los valores extremos (máximos) de variables hidrológicas y meteorológicas. Por otra parte, se asume que toda la zona contará con un comportamiento similar, ya que las estaciones presentadas con análisis detallado se encuentran ubicadas sobre diferentes áreas colindantes al municipio de evaluado.

Resultados

Según el procedimiento indicado previamente, se determina un mejor ajuste para los datos de precipitación máxima en 24 horas a través de la distribución de probabilidad Gumbel para aplicar el método de Análisis de Frecuencia. Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza el cálculo del parámetro KTr para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años, y luego, a partir de los valores de la media y desviación estándar, se determinan los valores de la precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno. Los resultados son mostrados en la Tabla 18.

Tabla 18. Precipitación máxima en 24 horas a diferentes periodos de retorno (mm).

ID	Código	Nombre	μ (mm)	σ (mm)	2,33	5	10	25	50	100
1	23085270	Aeropuerto JM Cordova	59,10	12,57	59,11	68,14	75,50	84,79	91,69	98,53
2	26200140	Armenia	77,35	18,30	77,37	90,52	101,22	114,75	124,79	134,75
3	27011110	Astilleros	72,74	20,21	72,76	87,27	99,10	114,04	125,12	136,12
4	23080650	Campoalegre	74,43	14,11	74,45	84,58	92,84	103,27	111,00	118,69
5	27010770	El Chuscal	91,72	29,31	91,75	112,81	129,96	151,62	167,70	183,65
6	26205080	La Aldea	83,21	19,88	83,23	97,51	109,15	123,85	134,75	145,58
7	27010820	La Cuchilla	70,56	22,74	70,58	86,91	100,22	117,03	129,50	141,88
8	27011120	La Iguana	80,22	19,13	80,24	93,99	105,18	119,33	129,82	140,24
9	27010800	La Meseta San Pedro	50,98	21,57	51,00	66,50	79,12	95,07	106,89	118,64
10	27015260	La Salada	71,40	17,12	71,42	83,72	93,73	106,39	115,78	125,10
11	26230180	Llanos de San Juan	77,72	21,09	77,74	92,89	105,23	120,82	132,38	143,86
12	26200120	Otramina	77,88	26,34	77,90	96,83	112,24	131,71	146,16	160,50
13	27015150	Progreso El Hacienda	61,16	20,12	61,18	75,63	87,41	102,29	113,32	124,28
14	27010810	Santa Elena	67,65	17,59	67,67	80,30	90,59	103,59	113,23	122,81
15	27015090	Tulio Ospina	60,90	13,29	60,92	70,46	78,24	88,06	95,35	102,58

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

A estas estaciones se les realizó un análisis de homogeneidad, para detectar cambios en la media o en la varianza de la serie. Dada la disponibilidad de la información y los resultados en el análisis de homogeneidad, no se hizo el reemplazo de ninguna serie o modificación de esta por lo cual se trabajaron con los datos tal y como fueron registrados por las estaciones y suministrados por parte del IDEAM. Una vez estimados los valores de precipitación máximo en 24 horas para los diferentes periodos de retorno y en las estaciones utilizadas, se utilizó los resultados obtenidos para el cambio climático en el municipio de estudio, que, según la información mostrada en el presente capítulo, corresponde a un incremento de la precipitación hasta el 40% para el escenario a 2100 – Largo Plazo, y como máximo porcentaje de incremento, y así optar por la postura más desfavorable. Teniendo en cuenta lo anterior, se incrementaron los valores estimados para los diferentes periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años en el porcentaje de incremento de la variable precipitación por cambio climático. Los resultados son indicados en la Tabla 19.

Tabla 19. Precipitación máxima en 24 horas a diferentes periodos de retorno (mm), ajustado por cambio climático.

ID	Código	Nombre	2,33	5	10	25	50	100
1	23085270	Aeropuerto JM Cordova	82,75	95,40	105,70	118,71	128,36	137,94
2	26200140	Armenia	108,32	126,73	141,71	160,65	174,70	188,65
3	27011110	Astilleros	101,86	122,18	138,74	159,65	175,16	190,57
4	23080650	Campoalegre	104,23	118,41	129,97	144,57	155,41	166,16
5	27010770	El Chuscal	128,46	157,93	181,94	212,27	234,77	257,11
6	26205080	La Aldea	116,52	136,52	152,80	173,39	188,65	203,81
7	27010820	La Cuchilla	98,81	121,68	140,31	163,84	181,30	198,63
8	27011120	La Iguana	112,34	131,58	147,26	167,06	181,75	196,34
9	27010800	La Meseta San Pedro	71,41	93,10	110,77	133,09	149,65	166,09
10	27015260	La Salada	99,99	117,20	131,23	148,94	162,09	175,14
11	26230180	Llanos de San Juan	108,84	130,05	147,32	169,14	185,33	201,40
12	26200120	Otramina	109,07	135,56	157,13	184,40	204,62	224,70
13	27015150	Progreso El Hacienda	85,65	105,89	122,37	143,20	158,65	173,99
14	27010810	Santa Elena	94,73	112,42	126,83	145,03	158,53	171,93
15	27015090	Tulio Ospina	85,28	98,65	109,53	123,28	133,49	143,61

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

1.1.1.6 Estimación de la Precipitación

Para la elaboración del mapa de precipitación máxima en 24 horas y para diferentes periodos de retorno, se utilizó el método de Kriging Ordinario. El método consiste en implementar un procedimiento de interpolación, el cual a partir de un agente externo denominado “Semivariograma”, permite ajustar la tendencia de interpolación en cuanto a magnitud y dirección de los datos. Antes de realizar la interpolación se debe construir un semivariograma que se ajuste a los datos de las estaciones utilizadas.

Una vez calculado el variograma experimental, se le ajusta un modelo el cual es una función matemática expresada en función de la separación (lag distance), la dirección de anisotropía y parámetros asociados al tipo de función (lineal, esférica, exponencial, etc). En la Tabla 20, se presentan los parámetros utilizados para la representación del semivariograma con los datos reales (modelo experimental) disponibles en la zona de estudio.

Tabla 20. Parámetros semivariograma de datos de precipitación – experimental.

Experimental	
Parámetro	Valor
Number of Lags	20
Lag Width	13,000
Max Lag Distance	22,000

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Luego y en función de la construcción del semivariograma experimental, se pueden determinar los parámetros para la construcción del semivariograma teórico – modelo, que permite el ajuste a los datos reales de las estaciones de precipitación máxima en 24 horas para cada uno de los periodos de retorno (ver Tabla 21).

Tabla 21. Parámetros para la construcción de semivariograma, Precipitación máxima 24 horas y diferentes periodos de retorno.

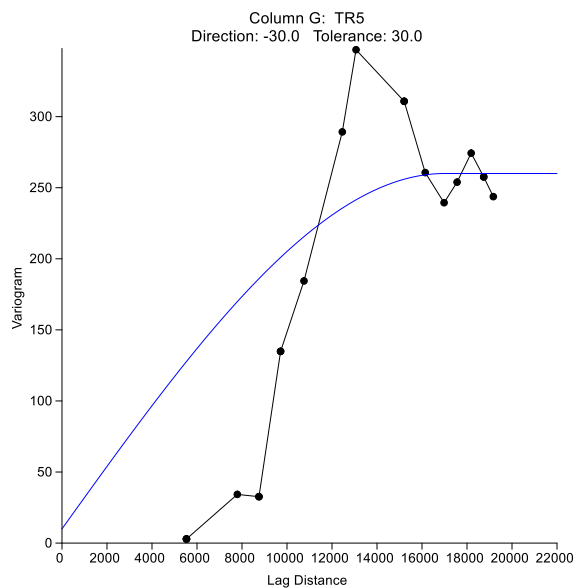
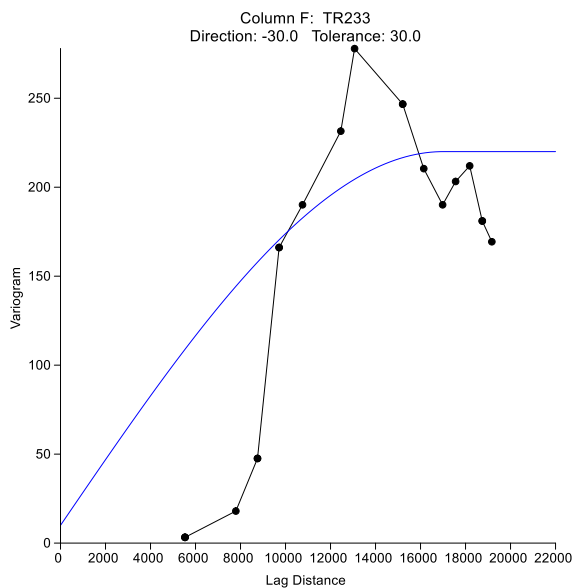
TR	Modelo					
	Nugget Effect		Spherical			
	Error Variance	Micro Variance	Scale	Length	Anisotropy Ratio	Anisotropy Angle
2.3	10	0	210	17,000	0.8	-30
5	10	0	250	17,000	0.8	-30
10	10	0	315	19,000	0.8	-30
25	10	0	420	19,000	0.8	-30
50	10	0	520	20,000	0.8	-30
100	10	0	640	20,000	0.8	-30

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

** La nomenclatura de las variables se ha referenciado en inglés, ya que es en este idioma en el que se encuentran la plataforma del software para elaborar interpolación.*

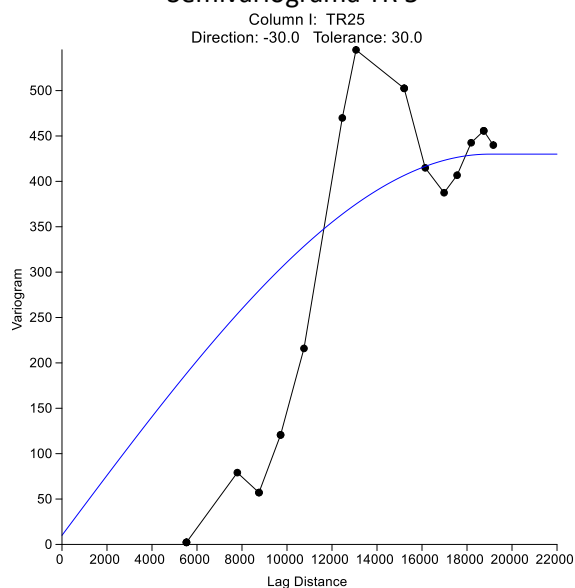
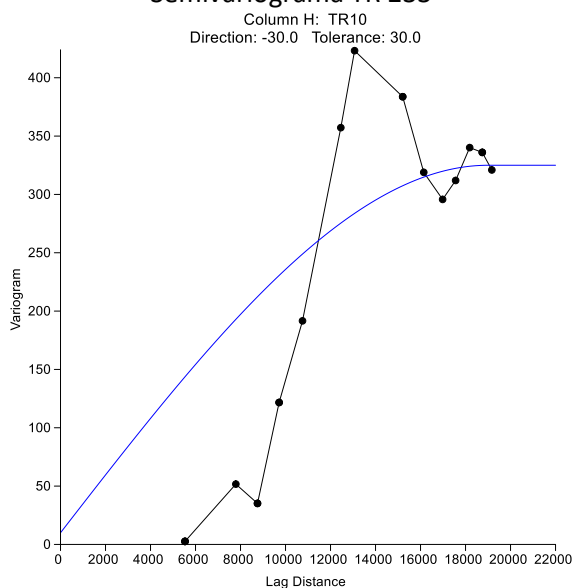
En la Ilustración 6, se presenta el semivariograma teórico que mejor se ajusta a los datos de precipitación máxima en 24 horas y para cada periodo de retorno. Es de mencionar que los datos utilizados corresponden a los valores determinados para los diferentes periodos de retorno, mediante el ajuste por cambio climático, incrementando la precipitación en 40%. Se realizaron varios análisis de semivariogramas para el ajuste y representación de los datos de precipitación en el método de interpolación, donde una de las variables que permiten definir el mejor ajuste corresponde a la media (mean) obtenida de la correlación entre los datos reales para cada una de las estaciones y el dato obtenido a partir de la interpolación y que consiste en el mapa de predicción.

Después de realizar el análisis estructural de los datos y aplicar el método de interpolación descrito, se obtiene el campo de precipitación máxima en 24 horas para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años para la zona de influencia. A partir de esta información, se realizó la interpolación de los datos de precipitación media en la zona de interés, aplicando como procedimiento de interpolación el método de Kriging Ordinario – KO, donde el mapa resultante cuenta con un tamaño de celda de 10 m x 10 m.



Semivariograma TR 233

Semivariograma TR 5



Semivariograma TR 10

Semivariograma TR 25

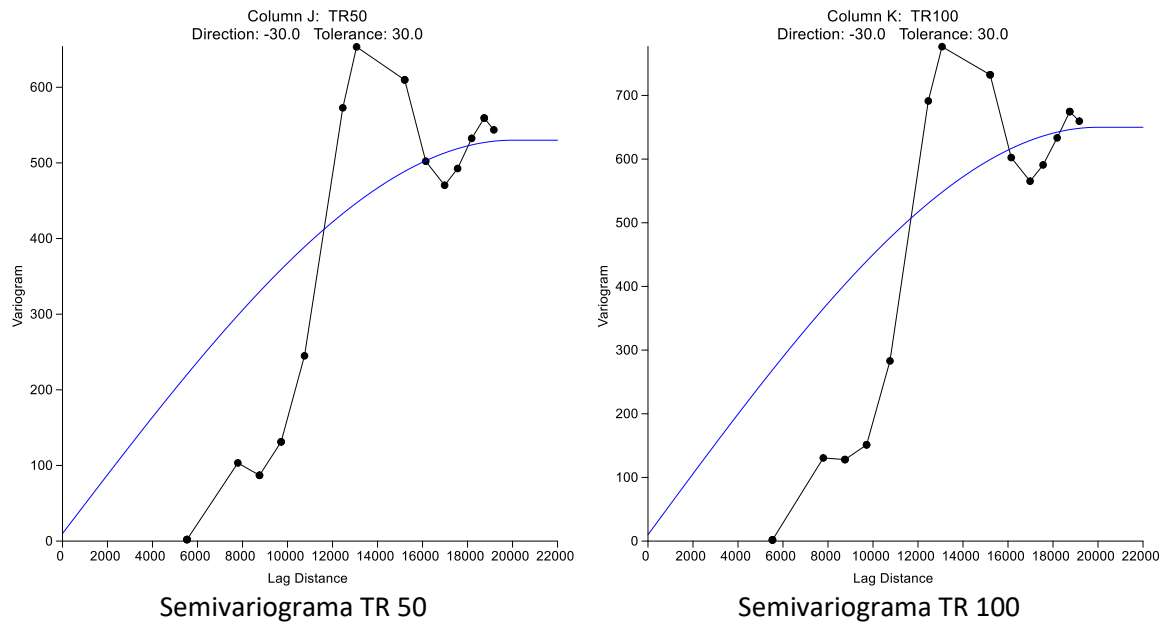


Ilustración 6. Semivariograma teórico utilizado en la generación de campos de precipitación.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

En la Ilustración 7 a Ilustración 12, se presenta el campo de precipitación máxima en 24 horas para los diferentes periodos de retorno. Esta información será utilizada dentro del análisis y determinación de la amenaza por movimientos en masa para todo el territorio estudiado.

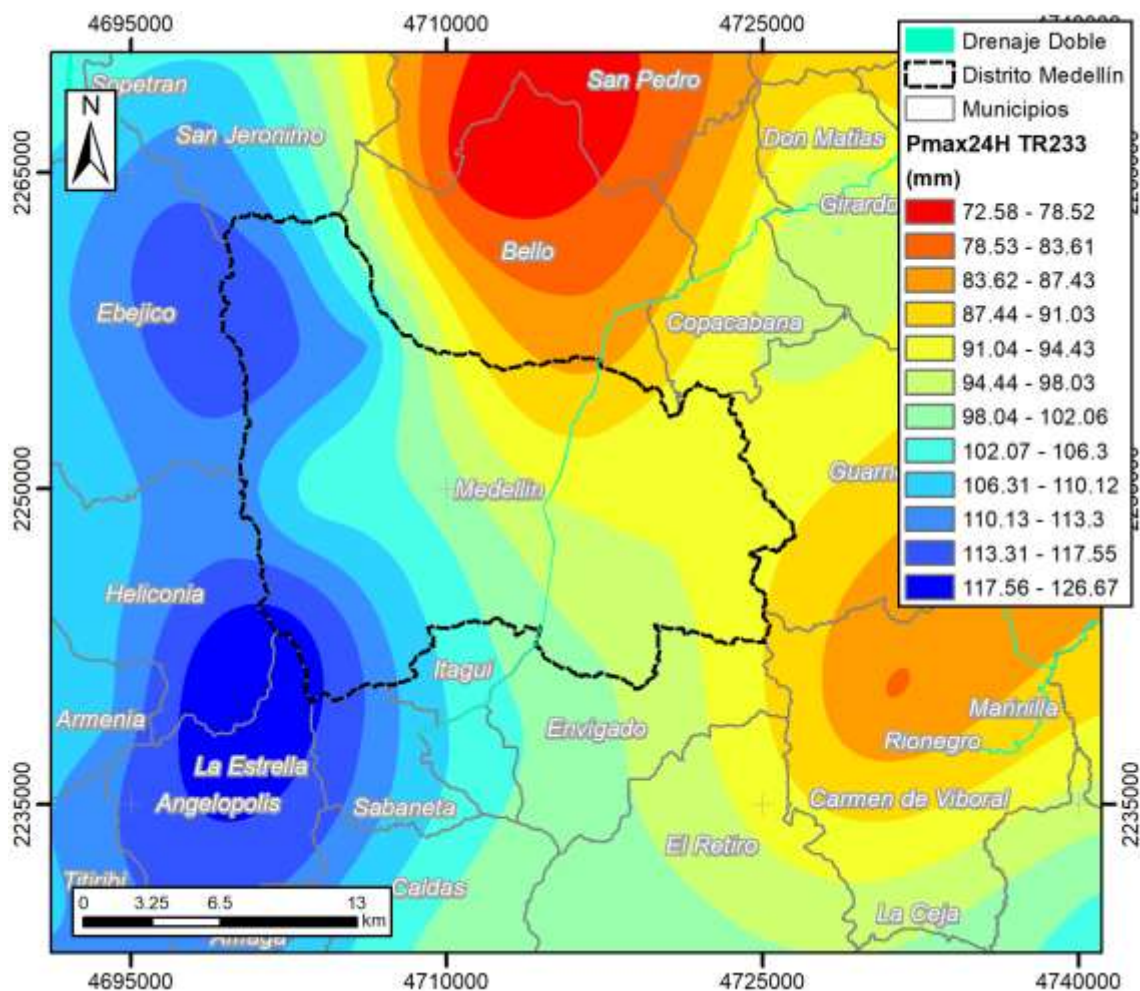


Ilustración 7. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR233.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

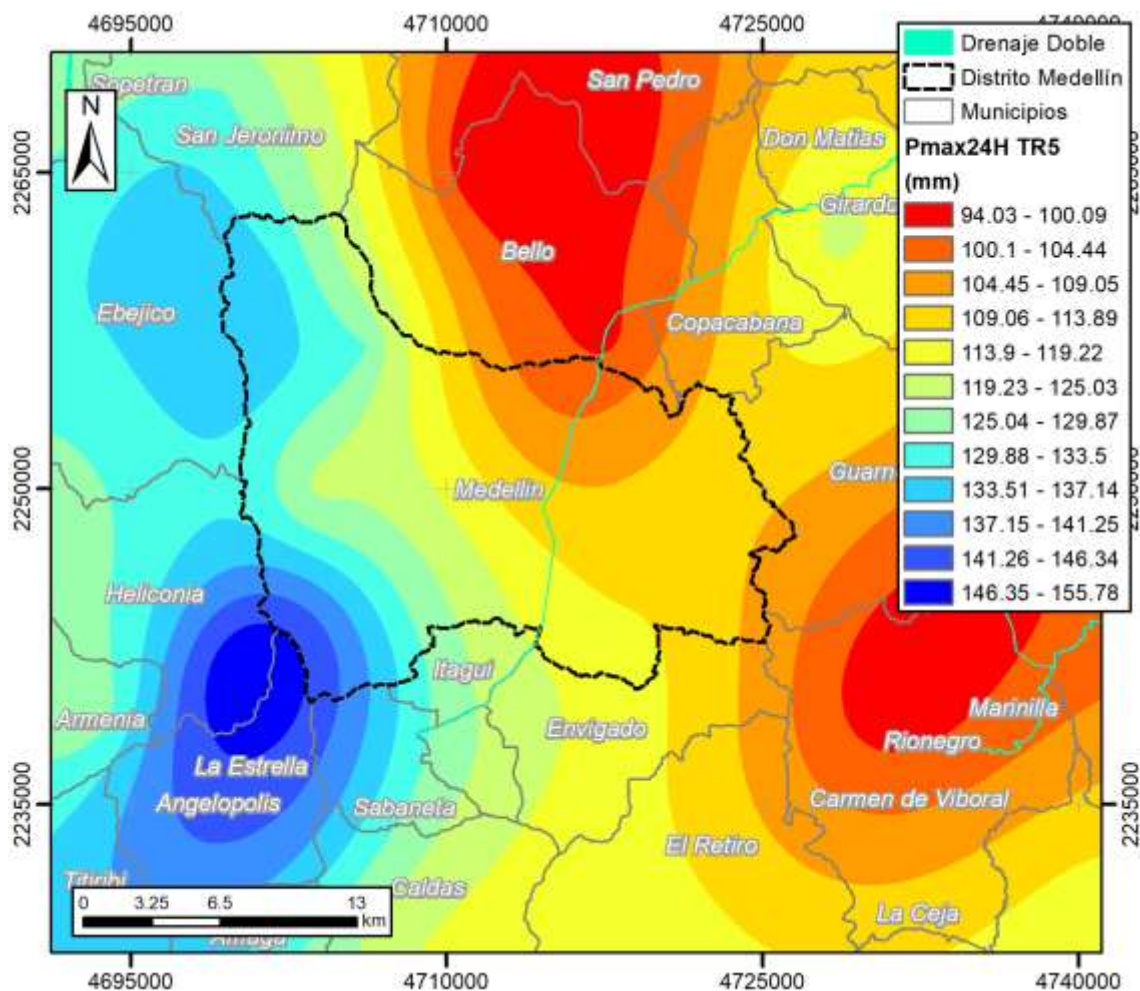


Ilustración 8. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR5.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

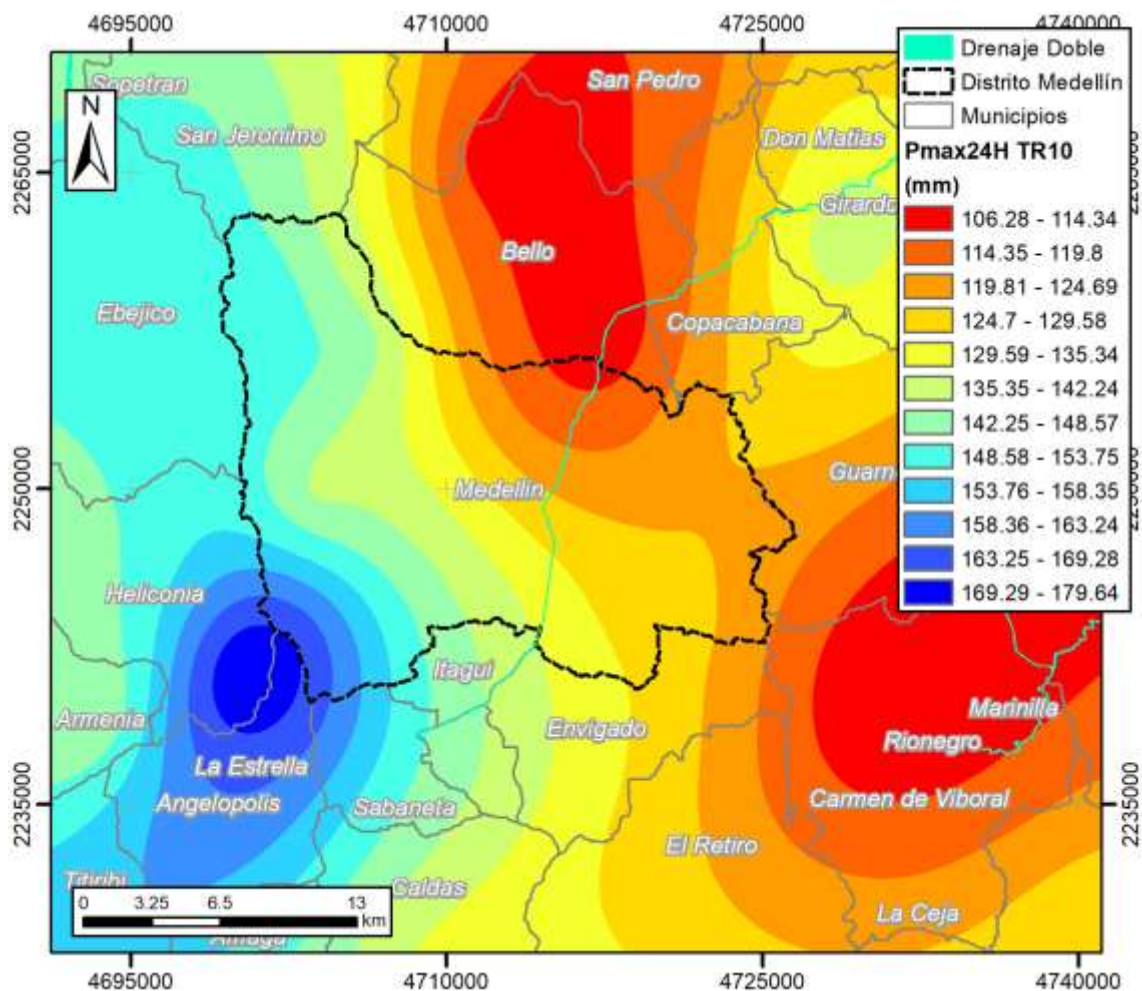


Ilustración 9. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR10.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

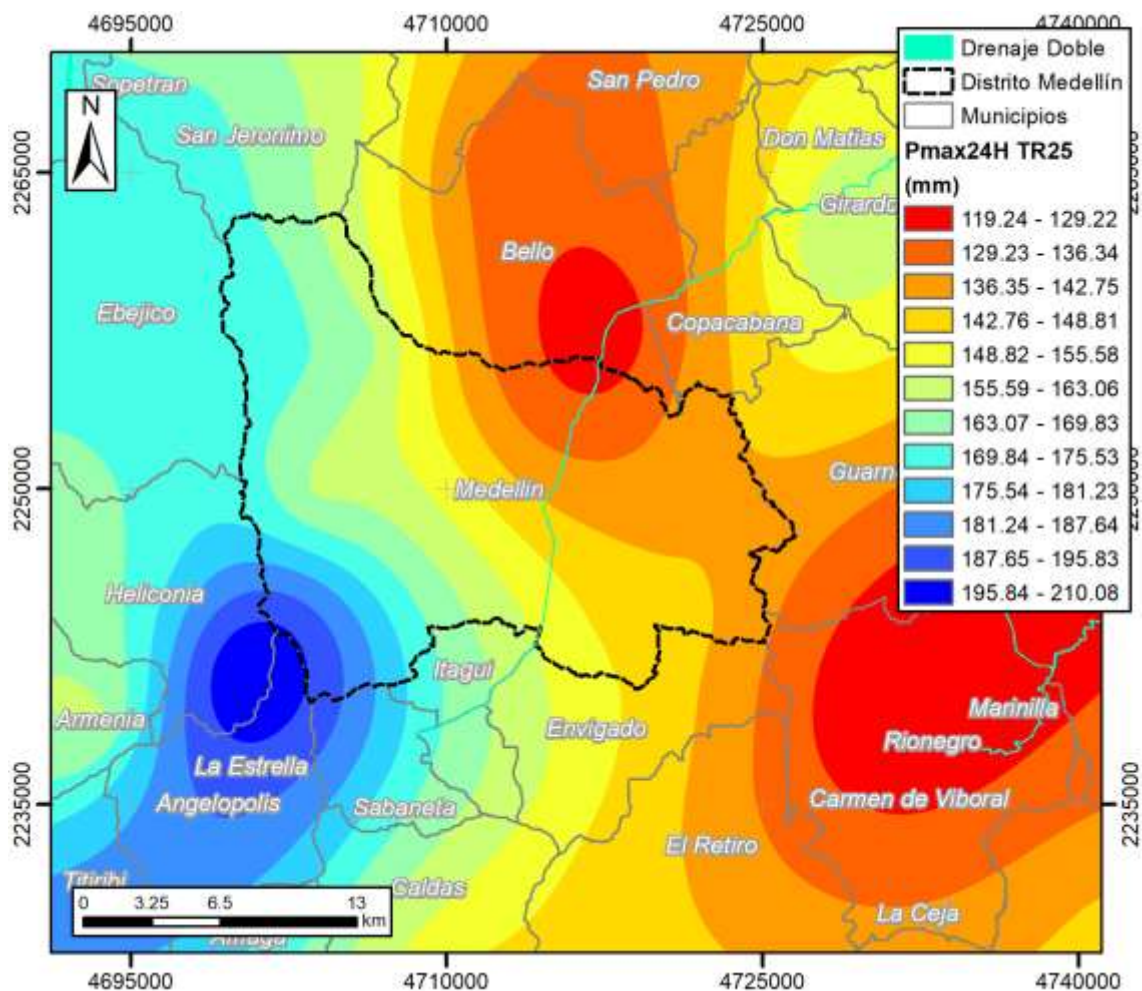


Ilustración 10. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR25.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

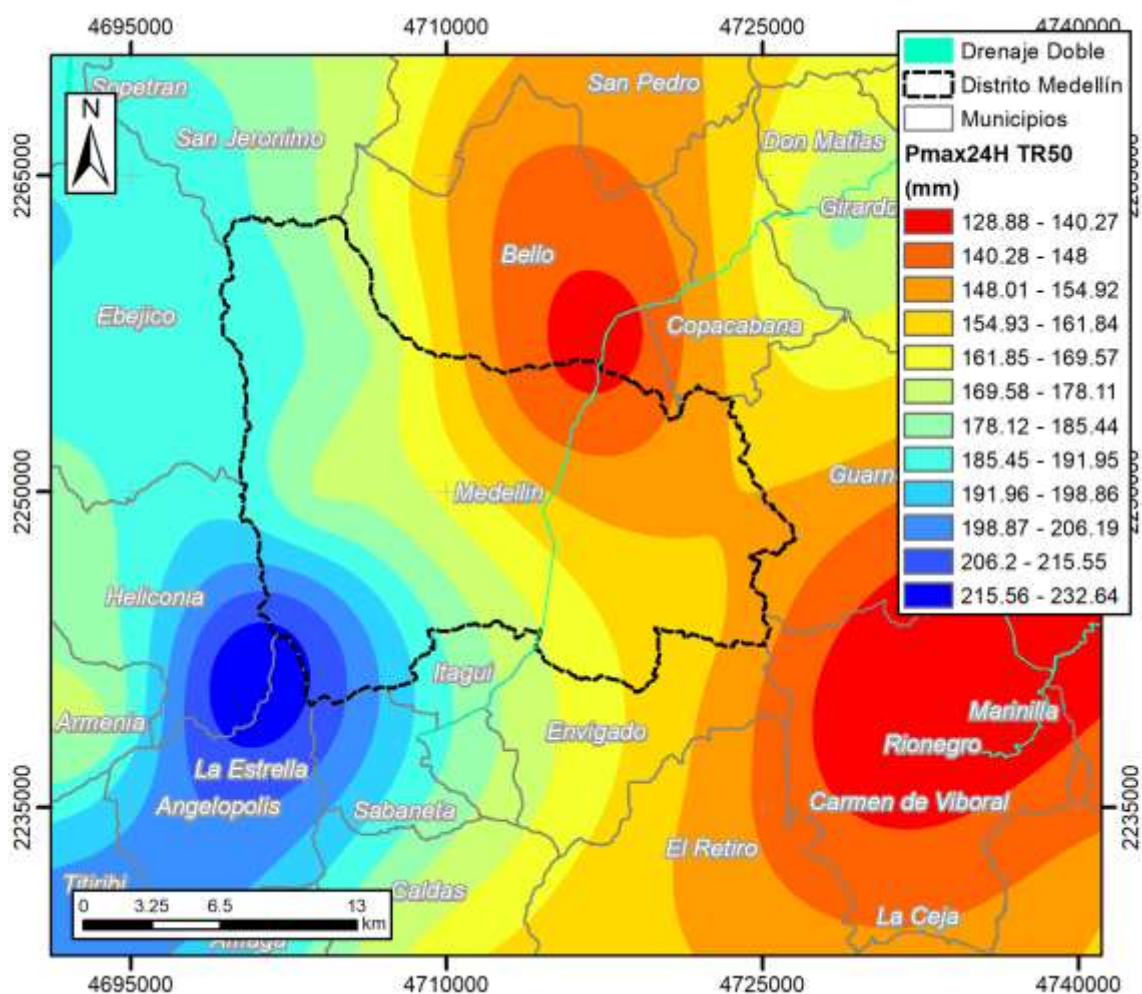


Ilustración 11. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR50.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

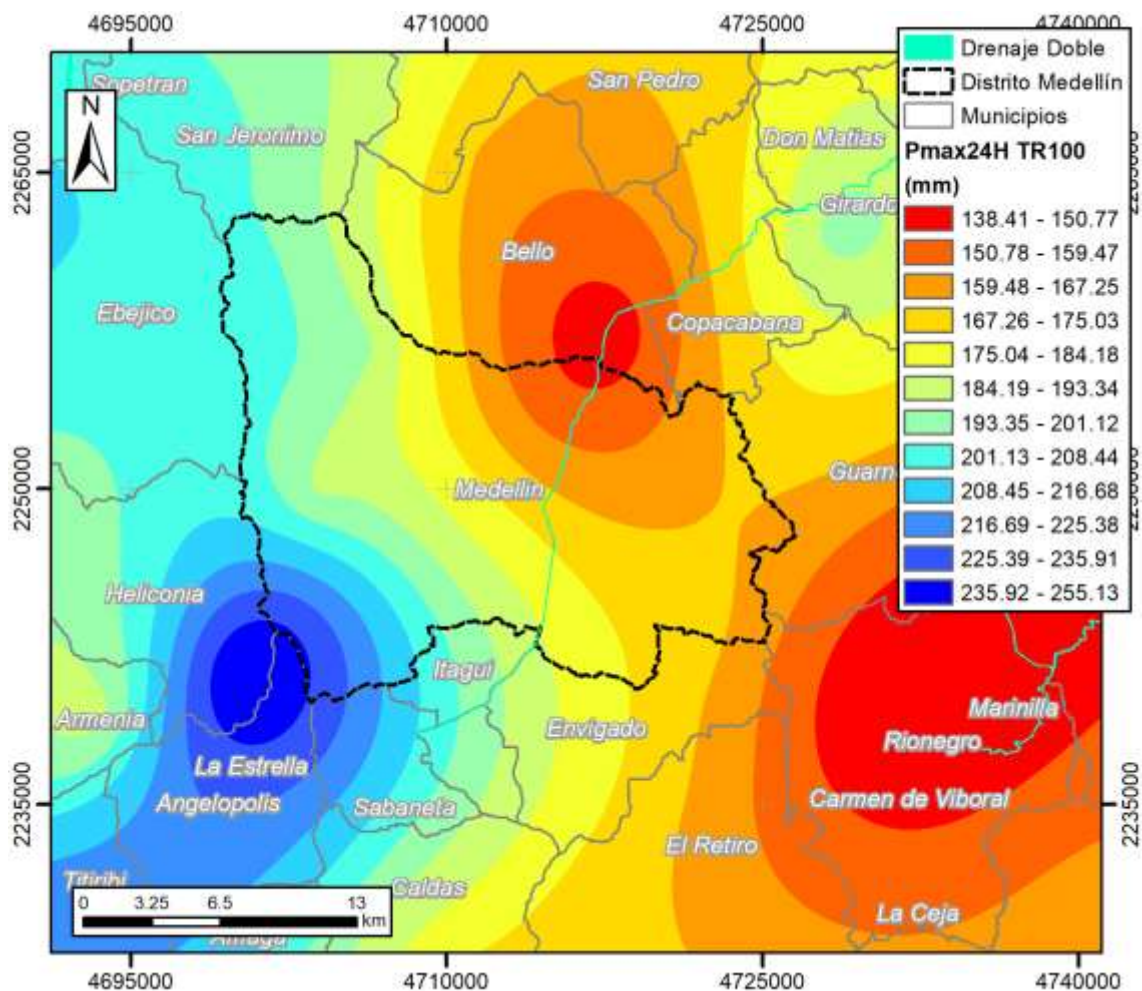


Ilustración 12. Campo de precipitación máxima en 24 horas para TR100.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

2 Bibliografía

Acuerdo Metropolitano 009 del 2012. *Directrices y lineamientos para la elaboración de estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera*. Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT y Universidad de Medellín, Medellín.

Alvioli, M., & Baum, R. L. (2016). Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface. *Environmental Modelling & Software*, 122-135.

Área Metropolitana Del Valle De Aburrá – AMVA. (2007). *Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado*.

Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2002). TRIGRS - A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis. Reston, EUA: U.S. Geological Survey.

Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2008). TRIGRS - A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. Reston, EUA: U.S. Geological Survey.

Campo, J. M., Múnera, J. C. (1997). *Determinación de Tiempos de Concentración y Coeficientes de Escorrentía para Algunas Cuencas de Antioquia*. [Tesis de Pregrado. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 148p]

Chow, V. T. (1992). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia. 667 p.

Chow, V. T.; Maidment, D. R., Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, McGraw-Hill, 583 p.

Clark, C. O. (1945). *Storage and the Unit Hydrograph*. Proc. Amer. Soc. Engs. Vol 69. P 1333 – 1360.

Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018). Actualización POMCA Río Aburrá : Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica, Medellín, Antioquia : Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia.

Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). Decreto Número 1077 de 2015.

Empresas Públicas de Medellín - EPM. (2005). *Revista hidrometeorológica de Empresas Públicas de Medellín*. Departamento de Hidrometría e Instrumentación de EPM.

Empresas Públicas de Medellín - EPM. (2009). *Guía para el diseño Hidráulico de Redes de Alcantarillado*. Medellín

IDEAM. (2013). Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. 2013. Bogotá, D.C.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM. (2014). *Modelación Hidrológica. Amenaza por inundaciones*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>. Fecha consulta: 09/01/2018

Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2010). NSR-10, Norma Sismo Resistente, R. C. D. C. S. 2010. Bogotá.

Montoya-Araque, E. A., & Montoya-Noguera, S. (2023). Sensitivity Analysis of a Physically Based Model to Assess Rainfall-Triggered Shallow Landslides. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2797-2814.

Montoya-Araque, E. A., Lopez-Caballero, F., and Montoya-Noguera, S. (2024b). Using fragility curves in the probabilistic spatial assessment of permanent displacements of slopes. In *Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024)*, Milan, Italy.

Montoya-Araque, E. A., Montoya-Noguera, S., and Lopez-Caballero, F. (2024a). An open-source application software for spatial prediction of permanent displacements in earthquake-induced landslides by the Newmark sliding block method: pyNewmarkDisp. *Environmental Modelling & Software*, 173:105942.

Montoya-Araque, E. A., Montoya-Noguera, S., Lopez-Caballero, F., and Gatti, F. (2025). Numerical earthquake-induced landslide hazard assessment at regional scale in the Colombian Andes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 195: 109370.

Ordoñez Carmona, O., Valencia Marín, M., González Iregui, H., Cañola Herrera, E., Ruiz, M., Rendón Ramírez, A. (2005). *Generalidades del sistema de fallas de Romeral en las cercanías a Medellín*.

Ordoñez, J.I. (2005). *El régimen de los ríos aluviales y sus implicaciones sobre la socavación general*. Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.

Posada, J. E. (1998). *Determinación del Coeficiente de Rugosidad en Canales Naturales*. [Trabajo Dirigido de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas]. Medellín. 74p.

Servicio Geológico Colombiano - SGC. (2015). Guía metodológica para estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa, escala detallada. Colección Guías y Manuales. 179p.

Servicio Geológico Colombiano - SGC. (2021). Guía metodológica para zonificación de amenazas por avenidas torrenciales. Colección Guías y Manuales. 240p.

SGC. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá, D.C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. Bogotá, D. C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

Smith y Vélez. (1997). *Hidrología de Antioquia*. Secretaria de Obras Públicas del Municipio de Medellín y Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

- Snyder, F. (1938). *Synthetic unit hydrographs*. Trans Am Geophysics Union, 19, 447–54
- Tarboton, D. G. (1997). *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*, p 309 - 319
- Témez, J. R. (1978). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. España: Dirección General de Carreteras-MOPU.
- Turner. H.M., y Burdoin, A. J. (1941). *The flood hydrograph*. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, vol 28, no 3, p 232 – 281
- U.S Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. (2016). *HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual*.
- U.S Army Corps Of Engineers – Hydrologic Engineering enter. (2002a). *HEC-RAS river*
- U.S Army Corps Of Engineers – Hydrologic Engineering enter. (2002b). *HEC-RAS*
- U.S Army Corps Of Engineers – Hydrologic Engineering enter. (2010). *HEC-RAS*
- Universidad Nacional De Colombia - UNALMED, Área Metropolitana Del Valle De Aburrá - AMVA, Corporación Autónoma Regional del Centro De Antioquia - CORANTIOQUIA y Corporación Autónoma Regional Rionegro y Nare - CORNARE. (2007). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA) del Río Aburrá*.
- Universidad Nacional De Colombia, Corporación Autónoma Regional del Centro De Antioquia - CORANTIOQUIA, Instituto Mí Río. (2003). *Metodología para la formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (PIOM)*
- Universidad Nacional De Colombia, sede Medellín – UNALMED. (2010). HidroSIG 4.0. Manual de Usuario. Recuperado de <https://minas.Medellín.unal.edu.co/departamentos/geocienciasymedioambiente/hidrosig/es/hidrosig-4-0.html>. Fecha consulta: 09/01/2018
- Vélez, J.J., y Botero, A. (2010). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental*.