



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS

APLICACIÓN DE UN MODELO GENERADOR DE TORMENTAS EN LA CUENCA
DE CHICOASÉN, CHIAPAS.

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
EMILIANO PÉREZ CORTÉS

TUTOR(ES) PRINCIPAL(ES)
DR. RAMÓN DOMINGUEZ MORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. ABRIL 2014

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar
Secretario: Dr. Pedrozo Acuña Adrián
Vocal: Dr. Domínguez Mora Ramón
1^{er}. Suplente: M. I. Franco Víctor
2^{do}. Suplente: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

INSTITUTO DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

Dr. Domínguez Mora Ramón

FIRMA

Contenido

INTRODUCCIÓN	5
1. ANTECEDENTES	7
1.1. Tipos de modelos	7
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO	12
2.1. Localización	12
2.2. Fisiografía	15
2.3. Edafología	15
2.4. Hidrografía	15
2.5. Climatología	16
2.6. Lluvia	16
3. METODOLOGÍA	19
3.1. Modelo de generación de tormentas (basado en la idea de fragmentos del método de Svanidze)	19
3.2. Procedimiento de generación de tormentas sintéticas	19
3.2.1. Primer procedimiento	19
3.2.2. Segundo procedimiento	22
4. APLICACIÓN DEL MODELO A LA GENERACIÓN DE TORMENTAS DIARIAS	25
4.1. Selección de tormentas históricas	25
4.1.1. Periodo de lluvias empleado y selección general de tormentas	25
4.1.2. Validación de lluvias	25
4.1.3. Interpolación de lluvias faltantes	25
4.2. Aplicación del modelo	26
4.2.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm	26
4.2.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm	28
4.2.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm	32

4.3. Primer procedimiento de generación de tormentas sintéticas	37
4.3.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm	37
4.3.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm	43
4.3.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm	49
4.4. Validación del primer procedimiento	54
4.4.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm	54
4.4.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm	63
4.4.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm	72
4.5. Segundo procedimiento de generación de tormentas sintéticas	81
4.5.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm	81
4.5.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm	89
4.5.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm	96
4.6. Validación del segundo procedimiento	104
4.6.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm	104
4.6.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm	112
4.6.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm	120
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	129
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

INTRODUCCIÓN

Cualquiera de los fenómenos relacionados a la generación y distribución de la lluvia en nuestro planeta, y algunas de sus consecuencias directas como son: el escurrimiento superficial, la infiltración y de manera especial el caudal en los ríos, son procesos circunstanciales, y por lo tanto tienen un nivel de incertidumbre o una probabilidad asociada de que sean igualados o excedidos en un número de años. Estos procesos están regidos por las leyes de la probabilidad, se les llama estocásticos.

Una de las dificultades que tienen los hidrólogos se refiere a la escasez y la calidad de datos de precipitación, evaporación, infiltración, caudales, etc. o de cualquier variable meteorológica de interés. En la mayoría de los casos, el hidrólogo supone que el futuro de esta variable de interés es estadísticamente similar al pasado. Este componente del pensamiento del hidrólogo es lo que le da sustento a la hidrología estocástica.

La propiedad básica para un análisis estocástico es que el proceso sea estacionario; es decir, que las propiedades estadísticas del proceso no varían en el tiempo.

Se considera que los datos medidos de una variable hidrológica, por ejemplo el caudal, ordenados en orden cronológico es un registro histórico de ella. Las series deducidas de los registros históricos son las series sintéticas extendidas. Generalmente, de las propiedades de los registros históricos se derivan las series sintéticas extendidas.

Las series sintéticas extendidas deben manifestar propiedades estadísticas similares a aquéllas de la serie histórica que se conoce, de la que se desea generar datos posteriores en el tiempo. Algunas propiedades de las series hidrológicas pueden ser investigadas en un dominio temporal a través del análisis de correlogramas (Zimmermann, E. D. y Silber, M. L. 2002).

El suministro de datos es por lo tanto la serie histórica, y a partir de sus propiedades, se generarán las series sintéticas probables en el futuro. Los métodos estocásticos son tratados en hidrología para resolver el problema de diseño de almacenamientos (presas) y su operación. El volumen de un almacenamiento o embalse depende de la sucesión de escurrimientos superficiales. Los métodos estocásticos proporcionan medios para estimar la probabilidad de secuencia de años secos o avenidas grandes durante cualquier periodo específico en el futuro.

Se requieren muchas propiedades para describir completamente una serie histórica. El análisis estocástico requiere incluir solamente aquéllas que son significativas para el sistema físico que se esté estudiando. Es por ello, que una condición necesaria es identificar el diseño más apropiado para la serie que se esté tratando.

Los métodos de generación artificial de series temporales se basan en el uso de los “registros históricos” como una muestra de la población total. Mientras que los métodos convencionales consideran a los registros como la “población total”. De esto, se concluye que el diseño estaría fundado en estimaciones de lo que “podría pasar”, en vez de lo que “pasó”.

En términos generales, la misma idea básica de generación estocástica es aplicable a caudales, precipitación, evapotranspiración y, como se indicó, a otras variables hidrometeorológicas.

Una serie temporal, puede modelarse matemáticamente. Necesariamente, estos análisis encierran un gran número de cálculos y por ello pueden realizarse con una computadora. El uso de computadoras en todos los aspectos de la ingeniería hidrológica ha llevado a incrementar el énfasis en la modelación de cuencas.

La modelación de cuencas comprende la integración de los procesos hidrológicos en un ente modelo; por ejemplo, un modelo de cuenca, con propósitos ya sea de análisis, diseño, escurrimiento a largo plazo, predicción de volumen, predicción o pronóstico de flujo en tiempo real.

Un modelo es un conjunto de abstracciones matemáticas que representan los cambios relevantes de un ciclo. Dentro de las técnicas de modelación de cuencas son aplicables a cuencas de cualquier tamaño, ya sean pequeñas, de tamaño medio o grandes. En la práctica, sin embargo; las aplicaciones de la modelación son generalmente limitadas al análisis de cuencas en donde la descripción de las variaciones espaciales temporales o variaciones espaciales de precipitación está garantizada. Comúnmente este es el argumento para cuencas de tamaño medio y grande.

La modelación de cuencas radica en lo sucesivo en la elección del tipo, la formulación, construcción, el ensayo, y la aplicación.

Al ingeniero hidrológico le conviene seleccionar un modelo disponible, con conocimiento de su estructura, operación, capacidades, y limitaciones. En ocasiones desarrolla un modelo o modifica uno existente, basándose en necesidades observadas, disponibilidad de datos u otro tipo de restricciones.

En este trabajo se aplicará un modelo generador de tormentas sintéticas para la cuenca de Chicoasén en el estado de Chiapas, México. El tipo de modelo es el método de Svanidze Modificado, para realizar la generación sintética de tormentas de 24 horas que reproduce la distribución espacial y temporal de las precipitaciones históricas.

1. ANTECEDENTES

Una serie temporal es una secuencia ordenada de observaciones cada una de las cuales está asociada a un momento de tiempo. Ejemplos de series temporales se pueden encontrar en cualquier campo de la ciencia. En meteorología, se tienen series temporales de temperatura, cantidad de lluvia en una región, velocidad del viento, etc.

La mayoría de los métodos estadísticos elementales suponen que las observaciones individuales forman un conjunto de datos de variables aleatorias mutuamente independientes. En general, este supuesto de independencia mutua se justifica por la atención prestada a diversos aspectos del fenómeno, incluyendo la extracción aleatoria de la muestra de una población más grande, la asignación aleatoria del tratamiento a cada unidad del fenómeno a estudiar, etc. Además en este tipo de datos el orden de las observaciones no tiene mayor importancia. Sin embargo, en el caso de las series temporales, se debe tener en cuenta, sin embargo, que:

- El orden es fundamental: se tiene un conjunto de datos ordenado
- El supuesto de independencia no se sostiene ya que, en general, las observaciones son dependientes entre sí y la naturaleza de su dependencia es de interés en sí misma

El conjunto de técnicas de estudio de series de observaciones dependientes ordenadas en el tiempo se denomina Análisis de Series Temporales. El instrumento de análisis que se suele utilizar es un modelo que permita reproducir el comportamiento de la variable de interés.

Existen una diversidad de métodos para generar registros sintéticos de precipitación en la literatura, los cuales se distinguen entre ellos por las hipótesis que consideran; esto significa que utilizan conjuntos de parámetros diferentes, igualmente implica que integran diferentes procesos y grados de complejidad. Un parámetro que se considera fundamental en estos métodos es la escala temporal de las precipitaciones generadas, esta escala depende totalmente de los datos históricos disponibles.

1.1. Tipos de modelos

Un primer acercamiento a los modelos de generación sintética de lluvias se puede citar en los trabajos realizados por Delleur y Kavvas, 1978 que utilizaron modelos autorregresivo de promedios móviles integrados (ARIMA) en series de precipitaciones medias mensuales de quince cuencas de Illinois y Kentucky en Estados Unidos, con fines de generación sintética y de pronóstico.

Geng et al, 1986 propusieron un método de generación sintética de datos de precipitación diaria en una estación con un modelo cuyos parámetros se obtienen a partir de datos mensuales en lugar de los datos diarios, considerando por una parte que las probabilidades de transición entre días secos y húmedos, puede estimarse a partir de la fracción de días húmedos por mes y, por otra, la magnitud de la precipitación en un día lluvioso se modela con una distribución gamma, cuyos parámetros pueden relacionarse con la lluvia promedio de los días lluviosos. Sus estudios fueron realizados para aplicarse en modelos de agricultura.

Bogárdi et al, 1988, propusieron un método de generación de tormentas aplicado a registros de precipitaciones diarias de climas semiáridos, usando el concepto de ciclo climático anual, además de generación de números aleatorios con distintas distribuciones de probabilidad.

Se ha prestado atención que algunos autores hacen una clasificación de los métodos de generación de precipitaciones, por ejemplo, Arnaud et al., (1999) y (2007), afrontando este problema concretamente en los modelos de generación horaria, y los agrupan en 5 categorías:

- Modelos de desagregación diaria.
- Modelos basados en la agregación de procesos.
- Modelos basados en la descripción adimensional de los patrones de intensidad de la tormenta.
- Modelos basados en procesos multiplicativos en cascada.
- Otros tipos de modelos estocásticos.

Arnaud et al, 1999 aplicaron un modelo de generación estocástica a datos de la costa francesa consistente en dos pasos para la generación, el primer paso es un proceso descriptivo de la lluvia a partir de variables independientes que la identifican y el ajuste de dichas variable medidas a la mejor función de distribución; en un segundo paso le dan forma a la tormenta con ayuda del método de fragmentos; posteriormente hacen una análisis de sensibilidad de los resultados y al observar que los valores medios cambiaban de una estación a otra. Estos autores realizaron una adecuación del modelo de generación ajustando una distribución exponencial a los valores de la precipitación total inferiores a cuatro veces el valor medio de la precipitación, con base en un estudio regional de las distribuciones de intensidad de precipitación, obtenidas al agrupar a las variables homogeneizadas de 50 estaciones. Ellos posteriormente realizaron una segunda modificación para desarrollar un modelo para la dependencia de las variables intensidad y duración de la tormenta, apoyado en la frecuencia acumulada entre esas dos variables, definieron un parámetro adicional para modelar la dependencia entre dichas variables que caracteriza la curva de frecuencia acumulada de la suma de las probabilidades de las dos variables. Finalmente estudiaron la modelación de la persistencia de la tormenta en un mismo episodio de tormenta para generar láminas de precipitación máxima de 24 horas y

con estas aplicaciones, encontraron mejoras en la calibración de 50 estaciones de medición de la costa del mediterráneo francés.

Otro tipo de categorización de modelos de generación sintética, se funda en el tipo de aplicación; en este último caso se tienen por ejemplo:

- Los modelos generadores de lluvia en un solo sitio, como los propuestos por Chernesson et al, (1996) o Arnaud et al., (1999).
- Los modelos generadores multi-sitio, que generan campos de lluvia en una serie de puntos extendidos en un área dada; Mehrotra et al., (2006) y en Frost et al., (2011).

Wilks, 1998 discutió la extensión de un modelo climático de precipitación de tipo empírico-estadístico y estocástico simple y ampliamente utilizado que también comprende la porción de precipitación de un número más grande de generadores estocásticos de clima, para la simulación simultánea en sitios múltiples; esta extensión la logra manejando cada colección de modelos de sitio individuales, independientes en el tiempo pero con números aleatorios espacialmente correlacionados. Cisneros et al., 1998 desarrolló un modelo que intenta preservar la estructura espacial de las tormentas históricas.

Vischel et al., (2009) presentan una clasificación similar a la de Arnaud (2007) basándose también en las hipótesis que consideran:

- Modelos de celdas de lluvia (e.g. Rodriguez-Iturbe y Eagleson, 1987; Salsón, S. and García-Bartual, R., 2003),
- Modelos invariantes de escala, donde se encuentran los procesos de desagregación en cascada como los propuestos por Molnar y Burlando (2005) y (Linzcar et al., 2011).
- Modelos de lluvia multi-sitio (e.g. Mehrotra et al., 2006)
- Modelos meta-Gaussianos (e.g. Bouvier et al., 2003). Vischel et al., (2009) plantean que cada modelo presenta ventajas y desventajas, que deben ser tomadas en cuenta para definir cuál utilizar finalmente.

Los modelos de celdas de lluvia son complicados para su aplicación, debido al gran número de parámetros que se requieren calcular para su implementación. Los modelos de invariancia en la escala (Scherzer y Lovejoy, 1987) utilizan pocos parámetros, pero requieren información precisa de la variación de la precipitación para varias resoluciones espaciales y temporales. Por otra parte, los modelos meta-Gaussianos son relativamente sencillos de aplicar y requieren pocos parámetros, pero existe un marco teórico que debe ser tomado en cuenta para su implementación. La resolución temporal mínima de los métodos anteriores depende principalmente de la resolución temporal en los datos históricos registrados.

En trabajos creados años atrás como el de, Cole y Sherriff, 1972 ya se enfatizaba que para intervalos de menos de un día, la persistencia en las tormentas hace que el modelado estocástico de precipitación sea muy complejo, estos autores realizaron un resumen de los modelos que se tenían en esa época de precipitación horaria y de duraciones en minutos, la mayoría de los cuales fueron desarrollados para estudios de la hidrología urbana; las cadenas de Markov y los modelos autorregresivos que hoy en día se siguen utilizando.

Existen estudios donde aplicaron métodos de generación horaria que se han usado en las últimas décadas son los de Zimmerman, 1998 quien construyó sintéticamente hietogramas horarios de tormentas para veinte años, englobando 1293 eventos de lluvia; el ajuste de las series reales se realizó con un modelo compuesto por una componente determinística senoidal, con periodo de un año y otra componente aleatoria de "ruido blanco".

Koutsoyiannis y Onof, 2001 utilizaron una metodología para la generación de los datos horarios que se pueden agregar hasta llevarlos a nivel diario; para ello combinaron un modelo de simulación de lluvia basado en el proceso de Bartlet-Lewis, que son técnicas probadas y desarrolladas para el propósito de ajustar valores para la escala más fina (por hora) y obtener los valores necesarios para una escala gruesa (diario): usaron una técnica de agrupación (cluster). La metodología responde directamente a las preguntas de la posible ampliación de la serie horarias para su aplicación a nivel diario en el mismo sitio y proporciona la base teórica para un uso operacional de esta metodología cuando no hay datos horarios disponibles. El algoritmo ha sido validado en modo de prueba plena en el caso de que los datos horarios son disponibles.

Mehrotra y Sharma, 2006 consideran que las tormentas sintéticas generadas pueden ser usadas en los análisis de confiabilidad y riesgo para el diseño y operación de obras hidráulicas.

El análisis de eventos extremos en hidrología, la generación de series de tiempo, que reproduzcan sus características estadísticas, sus autocorrelaciones y posibles correlaciones cruzadas es muy importante porque dichos registros sintéticos pueden posteriormente usarse para simular el comportamiento del sistema hidrológico analizado. Cuando los autores de estos trabajos han analizado la correlación entre las variables características del modelo, por lo general han encontrado que dicha correlación es débil, de tal forma que consideran válida la hipótesis de no dependencia entre esas variables (lo que por lo demás resulta muy conveniente para el desarrollo del modelo).

En este trabajo se propone aplicar con el método de Svanidze Modificado para la generación sintética de tormentas de 24 horas que reproduce la distribución espacial y temporal de las precipitaciones históricas. Este método consiste en dividir en dos partes la generación. La primer parte es un proceso descriptivo de la precipitación a partir de variables independientes que la identifican y el ajuste de dichas variables medidas a la

mejor función de distribución. La segunda parte, se le dan forma a la tormenta con ayuda del método de Svanidze Modificado. Posteriormente se hace un análisis de sensibilidad de los resultados y al observar si los valores medios cambian de una estación a otra se realiza una adecuación del modelo de generación dividiendo las variables en dos grupos y repitiendo el proceso anterior.

Un ejemplo de problema resuelto con el método de Svanidze Modificado es la obtención de registros sintéticos de volúmenes de escurrimiento de series mensuales identificadas por tener una componente invernal, que es característica de las regiones comprendidas en el noroeste de México al ocurrir las llamadas lluvias de invierno (equipatas), en dicho estudio se generaron registros sintéticos para tres presas con propósitos distintos la presa Huites (hidroeléctrica), Josefa Ortiz de Domínguez y Miguel Hidalgo (riego) (Domínguez y Arganis, 2009).

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA EN ESTUDIO

2.1. Localización

Chiapas se localiza al sureste de México; colinda al norte con el estado de Tabasco, al oeste con Veracruz y Oaxaca, al sur con el Océano Pacífico y al este con la República de Guatemala. Al norte $17^{\circ}59'$, al sur $14^{\circ}32'$ de latitud norte; al este $90^{\circ}22'$, al oeste $94^{\circ}14'$ de longitud oeste. Su superficie territorial es de 74,415 km². Chiapas es el octavo estado más grande en la República Mexicana. El estado de Chiapas representa el 3.8 % de la superficie del país. La extensión de la frontera Sur abarca 658.5 km, que representan el 57.3 por ciento del porcentaje total de la extensión de dicha frontera, su extensión de litoral es de 260 km. El número de municipios que conforma el estado es de 122, mismos que se distribuyen en quince regiones socioeconómicas Figura 1.

- I. Metropolitana
- II. Valles Zoque
- III. Mezcalapa
- IV. De los Llanos
- V. Altos Tsotsil-Tseltal
- VI. Frailesca
- VII. De Los Bosques
- VIII. Norte
- IX. Istmo-Costa
- X. Soconusco
- XI. Sierra Mariscal
- XII. Selva Lacandona
- XIII. Maya
- XIV. Tulijá Tseltal Chol
- XV. Meseta Comiteca Tojolabal

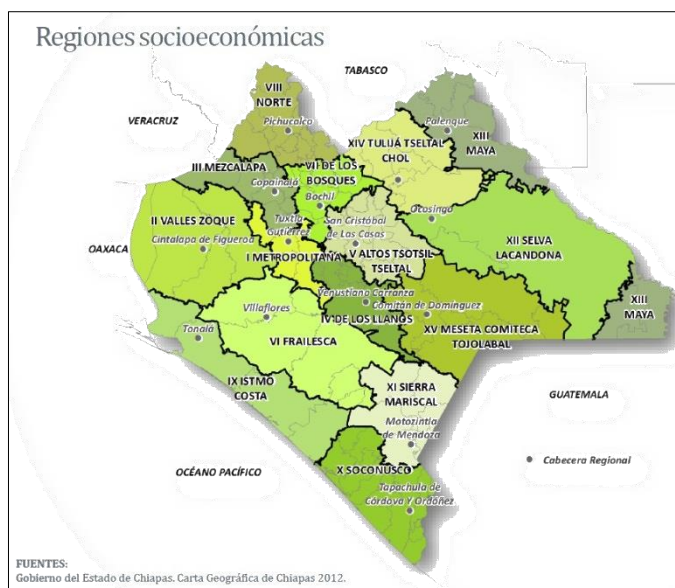


Figura 1. Regiones socioeconómicas

La cuenca en estudio de este trabajo se encuentra en la región socioeconómica VI Frailesca, así mismo se encuentra en la Región Hidrológico-Administrativa XI. Frontera Sur Figura 2 y en la Región Hidrológica 30. Grijalva-Usumacinta Figura 3.

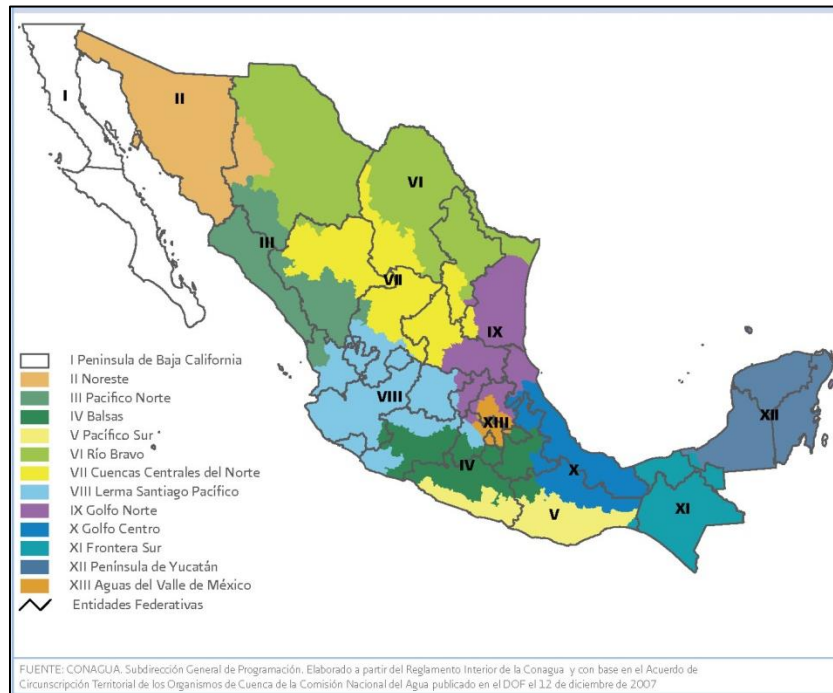


Figura 2. Regiones Hidrológico-Administrativas

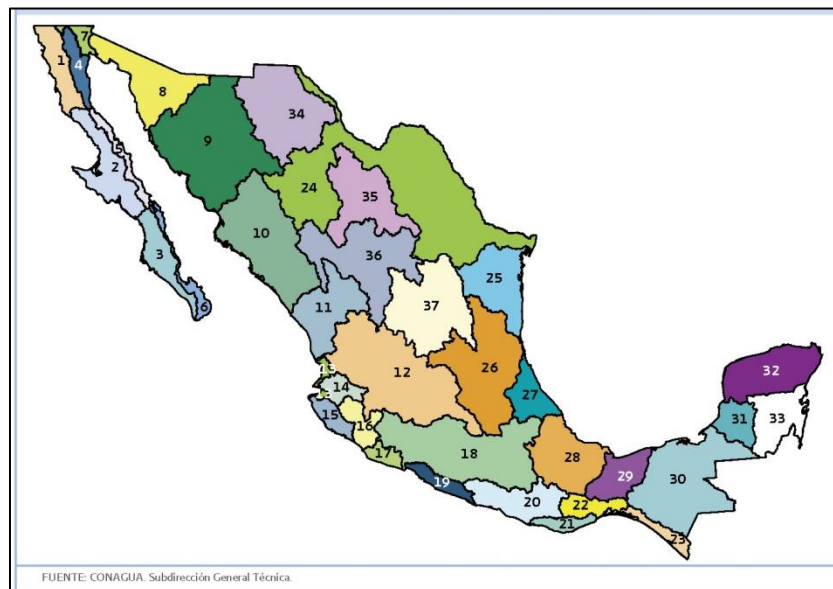


Figura 3. Regiones Hidrológicas

2.2. Fisiografía

El accidente fisiográfico más importante de la cuenca en estudio dentro de la Región Hidrológica 30 está constituido por la Sierra Madre de Chiapas, que se extiende desde la frontera sur con Guatemala hasta la frontera oeste con los estados de Oaxaca y de Veracruz; estos accidentes hacen contacto al sur con la Llanura Costera del Pacífico y al norte con la Depresión Central.

Estas sierras constituyen los sitios en donde ocurren las mayores precipitaciones; en consecuencia en ellas se generan los escurrimientos que fluyen hacia la planicie dando lugar a corrientes generalmente de régimen torrencial, con gastos de consideración aún en el estiaje, además de la formación de grandes avenidas.

2.3. Edafología

El área en que se sitúa la cuenca Chicoasén está ubicada en la porción más oriental de la Sierra Madre de Chiapas y de la Depresión Central. Tomando como base la porción más oriental de la región, se considera que los tipos de suelo que existe principalmente en dicha zona son Litosol y Regosol.

Los litosoles son también llamados suelos no evolucionados, esto como resultado de fenómenos erosivos, que se han formado sobre roca madre dura. También pueden ser resultado de la acumulación reciente de aportes aluviales.

Los regosoles son suelos desarrollados sobre materiales no excesivamente consolidados y que presentan una escasa evolución, fruto generalmente de su reciente formación sobre aportes recientes no aluviales o en zonas con fuertes procesos erosivos que provocan una continua renovación de los suelos.

2.4. Hidrografía

Los principales ríos que se encuentran en la cuenca en estudio son los ríos: El Tablón, Suchiapa, Los Amates, Pando y Santo Domingo, los cuales desembocan al Río Grijalva.

2.5. Climatología

El clima en la región de estudio según Thornthwal se clasifica como Cálido-húmedo a Semicálido-húmedo; en una subclasificación más definida se tiene un clima principalmente Cálido Subhúmedo con lluvias en verano y otros dos tipos de clima en menor proporción, una región Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano y una región Semicálido subhúmedo con lluvias en verano. La vegetación principal es de bosque de coníferas, bosque de encino y bosque mesófilo de montaña.

2.6. Lluvia

Los datos de precipitación se adquirieron de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca Chicoasén Figura 6, las estaciones que se encuentran en cada cuenca son las siguientes:

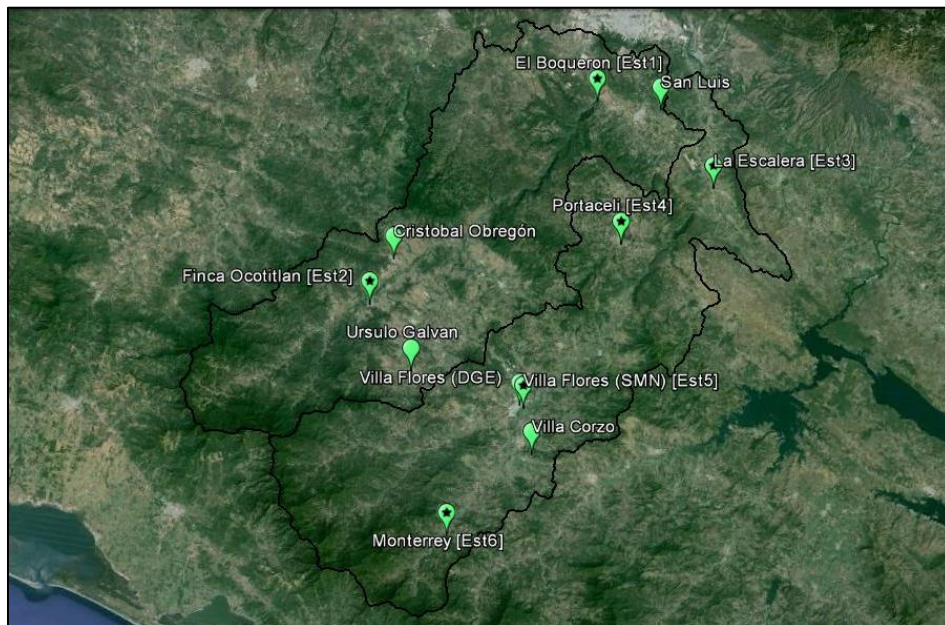


Figura 6. Estaciones pluviométricas en la cuenca de estudio

RH30Ei

Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Alt.
7039	EL BOQUERON, SUCHIAPA	-93.157	16.644	480
7065	F. OCOTITLAN, VILLAFLORES	-93.477	16.369	650
7327	URSULO GALVAN, V. FLORES	-93.419	16.279	700
7332	CRISTOBAL OBREGON, V.FLOR	-93.444	16.43	670

RH30E1

Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Alt.
7091	LA ESCALERA, CHIAPA DE C.	-92.993	16.526	485
7132	PORTACELI, VILLA FLORES	-93.125	16.449	780
7174	VILLA CORZO, VILLA CORZO	-93.25	16.167	600
7175	VILLA FLORES (SMN)	-93.262	16.229	857
7204	VILLA FLORES (DGE)	-93.267	16.233	631
7223	SAN LUIS, SUCHIAPA	-93.067	16.633	480
7349	MONTERREY, ANGEL A.CORZO	-93.369	16.059	700

Del periodo total de registro de las estaciones, se debe identificar aquellos años que contengan todos los datos completos y posteriormente conocer si ese año registrado, es un año de registro completo simultáneo en al menos 6 de las estaciones dentro de la cuenca, como resultado de estas condiciones se obtienen las tablas siguientes:

RH30Ei

Clave	Nombre	Años de Registro	Años Completos	Año de Registro Simultáneo			
7039	EL BOQUERON, SUCHIAPA	57	52	1986	1991	2003	-
7065	F. OCOTITLAN, VILLAFLORES	47	20	1986	1991	2003	2006
7327	URSULO GALVAN, V. FLORES	28	21	-	-	2003	2006
7332	CRISTOBAL OBREGON, V.FLOR	6	-	-	-	-	-

RH30E1

Clave	Nombre	Años de Registro	Años Completos	Año de Registro Simultáneo			
7091	LA ESCALERA, CHIAPA DE C.	54	37	1986	1991	2003	2006
7132	PORTACELI, VILLA FLORES	45	30	1986	1991	2003	2006
7174	VILLA CORZO, VILLA CORZO	19	-	-	-	-	-
7175	VILLA FLORES (SMN)	47	24	1986	1991	-	2006
7204	VILLA FLORES (DGE)	32	26	-	-	-	-
7223	SAN LUIS, SUCHIAPA	6	-	-	-	-	-
7349	MONTERREY, ANGEL A.CORZO	28	13	1986	1991	2003	2006

Se emplearon finalmente las lluvias diarias medidas en los años 1986, 1991, 2003 y 2006, que son los años con mayor registro simultáneo entre dichas estaciones y los registros a usar son de las estaciones: El Boqueron, F. Ocotitlán, La Escalera, Portaceli, Villaflores (SMN) y Monterrey, es decir de la estación 1 a la 6 respectivamente Figura 6 y en lo posterior de este estudio se designarán para su identificación más simple de la siguiente manera:

Clave	Nombre	Identificación
7039	EL BOQUERON, SUCHIAPA	Est1
7065	F. OCOTITLAN, VILLAFLORES	Est2
7091	LA ESCALERA, CHIAPA DE C.	Est3
7132	PORTACELI, VILLA FLORES	Est4
7175	VILLA FLORES (SMN)	Est5
7349	MONTERREY, ANGEL A. CORZO	Est6

3. METODOLOGÍA

3.1. Modelo de generación de tormentas

(basado en la idea de fragmentos del método de Svanidze)

Para realizar la aplicación del procedimiento de fragmentos del método de Svanidze, los eventos históricos de precipitación se caracterizan de dos modos, la primera característica es por su pico u evento extremo, por lo tanto, esta característica señala el valor máximo registrado en el centro del evento o tormenta, y la segunda característica, por la forma en que el evento se presenta (extensión espacial), expresada esta característica en términos de una relación (o fragmentos) entre lo que llovió en cada sitio instrumentado (estación) y lo que llovió en el centro de la tormenta.

Si estas características, magnitud del pico y forma de la tormenta, se consideran independientes, el procedimiento de generación sintética, se realiza en dos etapas. La primera etapa es, generando la característica del pico o precipitación máxima del evento aleatorio correspondiente a cada tormenta sintética, y la segunda etapa es, generando la característica forma, por lo que será distribuida espacialmente de acuerdo a los fragmentos correspondientes a una tormenta histórica seleccionada aleatoriamente.

El procedimiento de generación de tormentas sintéticas, se subdivide en dos procedimientos que desarrollan la misma metodología fundamentalmente.

3.2. Procedimiento de generación de tormentas sintéticas

3.2.1. Primer procedimiento

Los puntos a seguir en el primer procedimiento son:

1. Se determinan dos valores como umbrales, un valor de precipitación máxima y un valor de precipitación media, para realizar el procedimiento de selección de las tormentas históricas en cada una de las n estaciones.
2. Para cada tormenta histórica seleccionada, se determina la precipitación registrada en cada una de las n estaciones, el valor máximo correspondiente y la precipitación media de las n estaciones; es decir.

$PH_{i,j}$ Precipitación histórica registrada para la tormenta i en la estación j

$PHMÁX_i$ Precipitación histórica máxima sobre j de $PH_{i,j}$

$PHMED_i$ Precipitación histórica media para cada tormenta i de los valores $PH_{i,j}$

3. Se determina la función de distribución $F(p_m)$ de los valores máximos puntuales $PHMÁX_i$ correspondientes a cada tormenta histórica seleccionada.
4. Se genera un número aleatorio U_k con distribución uniforme $[0,1]$, y se obtiene la inversa de la función de distribución $F(p_m)$ para estimar el valor sintético correspondiente, $PSMÁX_k$ como se muestra en la Figura 7.

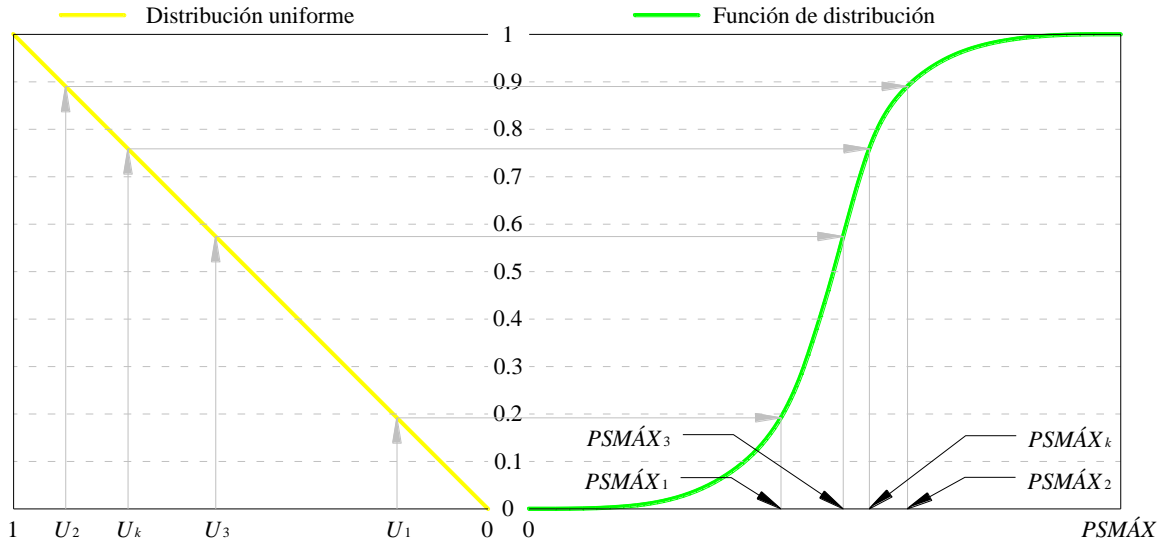


Figura 7. Generación aleatoria de precipitación máxima.

5. Adicionalmente, se selecciona aleatoriamente un número entero, comprendido entre 1 y el número de tormentas del estudio m , para lograr una selección aleatoria de una tormenta histórica, i .
6. La precipitación sintética generada para cada una de las n estaciones j se obtiene al multiplicar los valores registrados en las n estaciones de medición $PH_{i,j}$ para la tormenta i seleccionada en el paso 5, por la relación entre el valor sintético de la precipitación máxima obtenido en el paso 4 y la precipitación histórica máxima correspondiente a la tormenta histórica seleccionada en el paso 5, esto es:

$$PS_{k,j} = \frac{PSMÁX_k}{PHMÁX_i} PH_{i,j}$$

Ecuación 1

Donde $PS_{k,j}$ es la precipitación correspondiente a la tormenta sintética k , en la estación j , escalada de acuerdo con la relación entre la precipitación máxima

sinéctica $PSMÁX_k$ y la precipitación histórica máxima, $PHMÁX_i$ correspondiente a la tormenta seleccionada aleatoriamente en el paso 5.

Los pasos 4, 5 y 6 se repiten para $k = 1, 2, \dots, ns$ (número de tormentas sintéticas que se pretendan generar).

Siguiendo los pasos precedentemente señalados, se busca reproducir la distribución espacial de las tormentas históricas, seleccionadas aleatoriamente, pero escaladas de acuerdo con los valores máximos $PSMÁX_k$, cuya función de distribución pertenece a la de los máximos puntuales históricos.

Por este motivo se define un índice de extensión espacial de las tormentas históricas IEE_i , obtenido como la relación de la precipitación media en la tormenta i entre el valor máximo en dicha tormenta, lo cual equivale a obtener las medias de las tormentas normalizadas mediante una transformación que hace que el valor máximo siempre resulte igual a uno. De acuerdo con lo anterior, el índice de extensión espacial IEE_i se obtiene como:

$$IEE_i = \frac{PHMED_i}{PHMÁX_i}$$

Ecuación 2

Al relacionar la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, se obtiene una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas.

3.2.1.1. Validación del primer procedimiento

Para certificar el desempeño del procedimiento, se hace un cotejo en primera instancia, de las funciones de distribución de las medias y de los máximos de las tormentas, generadas con las funciones de distribución correspondientes a las tormentas históricas. Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas, es decir que para cada parámetro estadístico media, desviación estándar y coeficiente de asimetría, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente en cada una de las estaciones climatológicas con funciones identidad.

Adicionalmente con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula un nuevo coeficiente mediante el siguiente procedimiento:

Para cada parámetro estadístico (media, desviación estándar y coeficiente de asimetría) se obtiene un coeficiente de determinación C_{det} , que tiene en cuenta la variación de las diferencias entre los valores obtenidos para la precipitación de los datos históricos y la precipitación de los datos sintéticos:

$$C_{det} = \frac{Var_i - Var_\varepsilon}{Var_i}$$

Ecuación 3

Donde Var_i representa la varianza del parámetro estadístico i sobre las 6 estaciones de registro, para la muestra histórica; Var_ε la varianza de las diferencias entre los parámetros estadísticos i , de los datos históricos y de los datos sintéticos; adicionalmente i de los parámetros media, desviación estándar y asimetría, sucesivamente.

3.2.2. Segundo procedimiento

Con la intención de lograr mejores resultados, se concibe un segundo procedimiento de generación, en el que las tormentas históricas se ordenan en 2 grupos prácticamente del mismo tamaño; en el primero grupo se consideran las m_1 tormentas con mayor valor máximo y en el segundo grupo las restantes m_2 tormentas.

Al relacionar estos dos grupos por separado con los valores correspondientes del índice de extensión espacial se obtiene, que muestran una menor correlación entre la precipitación máxima y el índice de extensión espacial.

El procedimiento de generación de las tormentas sintéticas se modifica entonces, de tal manera que si el valor máximo generado, $PSMÁX_k$ obtenido en el paso 4 es mayor o igual que el umbral correspondiente al primer grupo de los máximos históricos, se selecciona aleatoriamente una de las tormentas del primer grupo (tormentas con valor máximo grande) y en caso contrario, se selecciona una tormenta del segundo grupo (tormentas cuyo valor máximo es chico).

Los puntos a seguir en el segundo procedimiento son:

1. Se determinan dos valores como umbrales, un valor de precipitación máxima y un valor de precipitación media, para realizar el procedimiento de selección de las tormentas históricas en cada una de las n estaciones.

2. Para cada tormenta histórica seleccionada se determina la precipitación registrada en cada una de las n estaciones, el valor máximo correspondiente y la precipitación media de las n estaciones; es decir.

$PH_{i,j}$ Precipitación histórica registrada para la tormenta i en la estación j

$PHMÁX_i$ Precipitación histórica máxima sobre j de $PH_{i,j}$

$PHMED_i$ Precipitación histórica media para cada tormenta i de los valores $PH_{i,j}$

3. Se determina la función de distribución $F(p_m)$ de los valores máximos puntuales $PHMÁX_i$ correspondientes a cada tormenta histórica seleccionada.
4. Se genera un número aleatorio U_k con distribución uniforme $[0,1]$, y se obtiene la inversa de la función de distribución $F(p_m)$ para estimar el valor sintético correspondiente, $PSMÁX_k$ como se muestra en la Figura 7.
5. Adicionalmente, se selecciona aleatoriamente un número entero, comprendido entre 1 y el número de tormentas del estudio m_1 , si corresponde al primer grupo, o se selecciona aleatoriamente un número entero, comprendido entre m_1 y m_2 , si corresponde al segundo grupo, para lograr una selección aleatoria de una tormenta histórica, i .
6. La precipitación sintética generada para cada una de las n estaciones j se obtiene al multiplicar los valores registrados en las n estaciones de medición $PH_{i,j}$ para la tormenta i seleccionada en el paso 5, por la relación entre el valor sintético de la precipitación máxima obtenido en el paso 4 y la precipitación máxima correspondiente a la tormenta histórica seleccionada en el paso 5, Ecuación 1.

Los pasos 4, 5 y 6 se repiten para $k = 1, 2, \dots, ns$ (número de tormentas sintéticas que se pretendan generar).

Siguiendo los pasos precedentemente señalados, se busca reproducir la distribución espacial de las tormentas históricas de ambos grupos, seleccionadas aleatoriamente, pero escaladas de acuerdo con los valores máximos $PSMÁX_k$, cuya función de distribución pertenece a la de los máximos puntales históricos, de cada grupo.

Adicionalmente se define un índice de extensión espacial de las tormentas históricas IEE_i , de ambos grupos, obtenido como se mencionó anteriormente, como la relación de la precipitación media en la tormenta i entre el valor máximo en dicha tormenta, Ecuación 2, lo cual equivale a obtener las medias de las tormentas normalizadas mediante una transformación que hace que el valor máximo siempre resulte igual a uno.

3.2.2.1. Validación del segundo procedimiento

Para ratificar el desempeño del procedimiento, se hace una comparación en primera instancia, de las funciones de distribución de las medias y de los máximos de las tormentas de ambos grupos, generadas con las funciones de distribución correspondientes a las tormentas históricas. Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

Adicionalmente con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se obtiene el coeficiente de determinación para el segundo procedimiento de la misma manera que se calculó en el primer procedimiento.

4. APLICACIÓN DEL MODELO A LA GENERACIÓN DE TORMENTAS DIARIAS

4.1. Selección de tormentas históricas

4.1.1. Periodo de lluvias empleado y selección general de tormentas

Se emplearon las lluvias diarias medidas en los años 1986, 1991, 2003 y 2006, de las estaciones, El Boqueron, F. Ocotitlán, La Escalera, Portaceli, Villaflores (SMN) y Monterrey, es decir de la estación 1 a la 6 respectivamente. Las tormentas seleccionadas cumplen con las siguientes condiciones.

1. La precipitación en alguna de las 6 estaciones es mayor a una variable llamada *umbral*, o, el promedio aritmético de la precipitación en las 6 estaciones es mayor a una variable llamada *umbral promedio*:
 1. *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm.
 2. *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm.
 3. *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm.

4.1.2. Validación de lluvias

Las lluvias seleccionadas correspondientes a los años empleados fueron validadas con la información de los boletines hidrológicos y de la página electrónica de datos meteorológicos en línea, de las cuencas monitoreadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Así también fueron validadas con las bases de datos meteorológicos, ERIC y CLICOM.

El número de tormentas seleccionadas y validadas para cada uno de los casos es:

1. 30 tormentas con valores mayores a 62.9 mm o mayores a 29.3 mm.
2. 58 tormentas con valores mayores a 53.9 mm o mayores a 25.1 mm.
3. 80 tormentas con valores mayores a 44.9 mm o mayores a 20.9 mm.

4.1.3. Interpolación de lluvias faltantes

No se utiliza ninguna variante de interpolación de datos faltantes para las estaciones de este estudio. El motivo principal es, los años empleados en este estudio no contiene un dato faltante diario. De esta forma no fue necesario completar la información en las estaciones para cada una de las fechas seleccionadas.

4.2. Aplicación del modelo

Se calcula la precipitación máxima y media de las tormentas históricas para cada una de las combinaciones de *umbral* y *umbral promedio*.

Se realiza el análisis estadístico de los datos de precipitación máxima de las tormentas históricas. Al ajustar estos valores a distintas funciones de distribución, se determina que la de menor error estándar de ajuste fue la tipo distribución Gumbel, y se obtuvieron sus parámetros con el método de momentos. La función de distribución obtenida es:

$$F(x) = e^{-e^{-t}}$$

Ecuación 4

Donde

$$t = \alpha(x - \beta)$$

4.2.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Se calcula la precipitación máxima y media de las tormentas históricas.

Fecha	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	Est6	PH media	PH máx
29/05/1986	58	30	38.6	36.2	43	51	42.800	58
30/05/1986	29	40	59.8	67.5	67.5	34	49.633	67.5
06/06/1986	0	64	0	0	0	0	10.667	64
28/08/1986	0	46	9.5	86.5	12.5	3	26.250	86.5
27/09/1986	4.4	0	0.5	1	20.1	80	17.667	80
08/06/1991	36	0	17.8	70	4	36	27.300	70
17/06/1991	42	5	2	7.5	70	42	28.083	70
06/06/2003	64.5	5.7	21.2	1.4	0	0	15.467	64.5
18/06/2003	40	26	17.4	17.3	10.5	75.5	31.117	75.5
25/06/2003	21.2	38	21.8	19	81	74.5	42.583	81
28/06/2003	0	90	0	0	10	0	16.667	90
05/07/2003	0	70	1.7	0.7	10	16.5	16.483	70
06/07/2003	48.4	90	13.9	9.4	19.5	38	36.533	90
26/07/2003	0	80.9	0	0	10.5	28.5	19.983	80.9
07/08/2003	0.2	90.3	1.5	8.5	20	25	24.250	90.3
19/08/2003	5	90.3	0	3	10	34	23.717	90.3
29/08/2003	11	72	24.2	19	10	14	25.033	72
30/08/2003	8.3	90.2	30.2	115	40	0	47.283	115
04/09/2003	18.7	80.7	0	0	25	0	20.733	80.7
16/09/2003	36.5	31	9.1	24	32.8	61.5	32.483	61.5
05/10/2003	61	42	57.6	65	0	70.5	49.350	70.5

06/10/2003	54	72	39.7	16	41.3	18.6	40.267	72
13/05/2006	0	21.8	0	0	0	88	18.300	88
28/05/2006	7	75.5	46.5	4	10.5	0	23.917	75.5
30/05/2006	5	52.6	58.8	39.5	40.5	14.5	35.150	58.8
01/06/2006	0	2.3	2	87.5	20.5	0	18.717	87.5
07/06/2006	47	59.8	17.3	43.4	40	34	40.250	59.8
19/07/2006	10	11.5	0	69.3	60.5	12	27.217	69.3
25/08/2006	0	0	16	66.5	40	12	22.417	66.5
11/09/2006	20	74.4	11.5	41	20	4	28.483	74.4

El análisis estadístico de los datos de precipitación máxima de las 30 tormentas históricas, con $\alpha = 0.1024$, $\beta = 70.3664$ y sustituyendo los valores en la Ecuación 4 se tiene:

$$F(x) = e^{-e^{-0.1024(x-70.3664)}}$$

Ecuación 5

Ordenados	Tr	F(x)	Calculados	Escala gumbel
115	31.000	0.968	103.726	3.418
90.3	15.500	0.935	96.796	2.708
90.3	10.333	0.903	92.670	2.285
90	7.750	0.871	89.688	1.979
90	6.200	0.839	87.330	1.738
88	5.167	0.806	85.365	1.537
87.5	4.429	0.774	83.669	1.363
86.5	3.875	0.742	82.168	1.209
81	3.444	0.710	80.813	1.070
80.9	3.100	0.677	79.571	0.943
80.7	2.818	0.645	78.419	0.825
80	2.583	0.613	77.338	0.714
75.5	2.385	0.581	76.316	0.610
75.5	2.214	0.548	75.340	0.510
74.4	2.067	0.516	74.402	0.413
72	1.938	0.484	73.493	0.320
72	1.824	0.452	72.607	0.230
70.5	1.722	0.419	71.737	0.140
70	1.632	0.387	70.877	0.052
70	1.550	0.355	70.020	-0.035
70	1.476	0.323	69.161	-0.123
69.3	1.409	0.290	68.292	-0.212
67.5	1.348	0.258	67.404	-0.303
66.5	1.292	0.226	66.487	-0.397
64.5	1.240	0.194	65.524	-0.496
64	1.192	0.161	64.497	-0.601

61.5	1.148	0.129	63.371	-0.717
59.8	1.107	0.097	62.087	-0.848
58.8	1.069	0.065	60.525	-1.008
58	1.033	0.032	58.324	-1.234

En la Figura 8 se muestra la función de distribución obtenida, con la escala Gumbel en el eje horizontal.

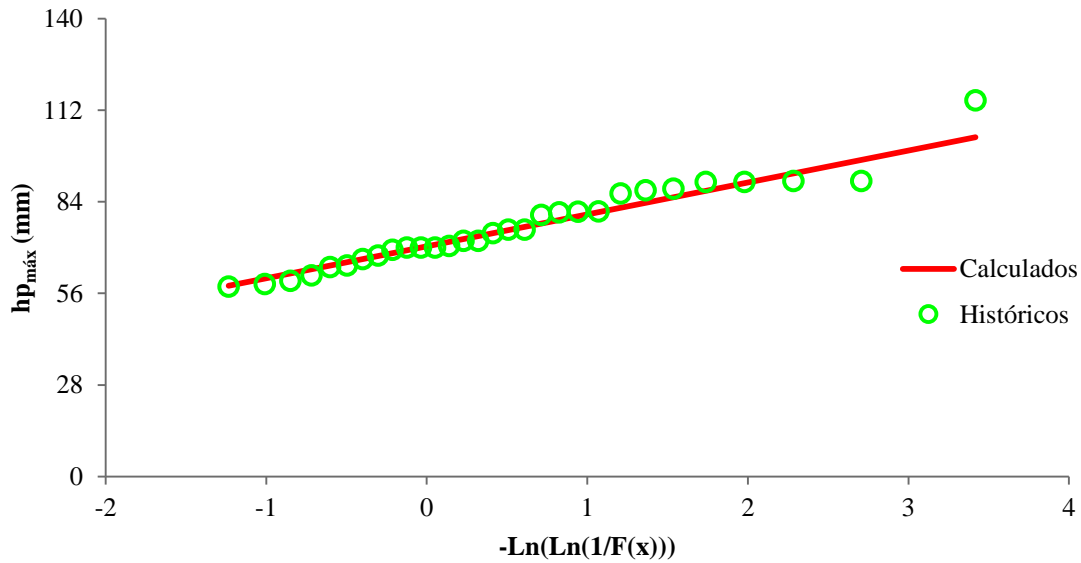


Figura 8. Función de distribución calculada para valores máximos históricos.

Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

4.2.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Se calcula la precipitación máxima y media de las tormentas históricas.

Fecha	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	Est6	PH media	PH máx
29/05/1986	58	30	38.6	36.2	43	51	42.800	58
30/05/1986	29	40	59.8	67.5	67.5	34	49.633	67.5
06/06/1986	0	64	0	0	0	0	10.667	64
01/07/1986	24	40	3.5	19	42.5	30	26.500	42.5
06/07/1986	26.5	36	33.3	28	28	20	28.633	36
04/08/1986	12.8	31	30.5	26.6	47.2	22	28.350	47.2
20/08/1986	0	15.5	0	0	41.5	60	19.500	60
28/08/1986	0	46	9.5	86.5	12.5	3	26.250	86.5
27/09/1986	4.4	0	0.5	1	20.1	80	17.667	80

01/10/1986	0	0	10	1.8	0	57	11.467	57
04/10/1986	8	0	36	57.8	0	23	20.800	57.8
05/05/1991	20	0	0	54	0	20	15.667	54
10/05/1991	55	3	0	2.4	9.6	55	20.833	55
27/05/1991	43	55	0	0	5	43	24.333	55
08/06/1991	36	0	17.8	70	4	36	27.300	70
11/06/1991	4	55	27.2	33.2	0	4	20.567	55
17/06/1991	42	5	2	7.5	70	42	28.083	70
07/07/1991	7	55	0	10	13	7	15.333	55
02/09/1991	6	40	55	20	15.7	6	23.783	55
17/09/1991	20	0	0	57	0	20	16.167	57
04/10/1991	6	32	58	30	10.9	6	23.817	58
06/06/2003	64.5	5.7	21.2	1.4	0	0	15.467	64.5
08/06/2003	48.3	11	4.7	19	40	29.2	25.367	48.3
18/06/2003	40	26	17.4	17.3	10.5	75.5	31.117	75.5
25/06/2003	21.2	38	21.8	19	81	74.5	42.583	81
26/06/2003	1.7	60.3	1.4	1.6	31.5	5.5	17.000	60.3
28/06/2003	0	90	0	0	10	0	16.667	90
05/07/2003	0	70	1.7	0.7	10	16.5	16.483	70
06/07/2003	48.4	90	13.9	9.4	19.5	38	36.533	90
14/07/2003	28.1	60.3	22.3	33.5	10	8.5	27.117	60.3
17/07/2003	0	0	12.7	62	10.5	0	14.200	62
26/07/2003	0	80.9	0	0	10.5	28.5	19.983	80.9
07/08/2003	0.2	90.3	1.5	8.5	20	25	24.250	90.3
17/08/2003	16.1	60.9	7.4	12	15	1.5	18.817	60.9
19/08/2003	5	90.3	0	3	10	34	23.717	90.3
29/08/2003	11	72	24.2	19	10	14	25.033	72
30/08/2003	8.3	90.2	30.2	115	40	0	47.283	115
01/09/2003	0	60.2	8.1	2.3	0	42	18.767	60.2
04/09/2003	18.7	80.7	0	0	25	0	20.733	80.7
06/09/2003	13.5	10.9	55.1	6.4	32.5	22.4	23.467	55.1
13/09/2003	8	60.8	30.8	13	10	16	23.100	60.8
16/09/2003	36.5	31	9.1	24	32.8	61.5	32.483	61.5
20/09/2003	5.6	60.9	10	3	0	8	14.583	60.9
22/09/2003	18.3	60.2	0	36	0	38	25.417	60.2
05/10/2003	61	42	57.6	65	0	70.5	49.350	70.5
06/10/2003	54	72	39.7	16	41.3	18.6	40.267	72
01/05/2006	20	8.8	6.3	21.5	0	54.5	18.517	54.5
13/05/2006	0	21.8	0	0	0	88	18.300	88
20/05/2006	0	56.2	0	12	10.5	37	19.283	56.2
28/05/2006	7	75.5	46.5	4	10.5	0	23.917	75.5
30/05/2006	5	52.6	58.8	39.5	40.5	14.5	35.150	58.8

01/06/2006	0	2.3	2	87.5	20.5	0	18.717	87.5
07/06/2006	47	59.8	17.3	43.4	40	34	40.250	59.8
14/06/2006	6	49.3	0.5	14	60.5	40	28.383	60.5
19/07/2006	10	11.5	0	69.3	60.5	12	27.217	69.3
25/08/2006	0	0	16	66.5	40	12	22.417	66.5
11/09/2006	20	74.4	11.5	41	20	4	28.483	74.4
18/09/2006	9	0	1	55.5	0	0	10.917	55.5

El análisis estadístico de los datos de precipitación máxima de las 58 tormentas históricas, con $\alpha = 0.0905$, $\beta = 59.8312$ y sustituyendo los valores en la Ecuación 4 se tiene:

$$F(x) = e^{-e^{-0.0905(x-59.8312)}}$$

Ecuación 6

Ordenados	Tr	F(x)	Calculados	Escala gumbel
115	59.000	0.983	104.806	4.069
90.3	29.500	0.966	97.049	3.367
90.3	19.667	0.949	92.470	2.953
90	14.750	0.932	89.192	2.656
90	11.800	0.915	86.625	2.424
88	9.833	0.898	84.508	2.233
87.5	8.429	0.881	82.701	2.069
86.5	7.375	0.864	81.121	1.926
81	6.556	0.847	79.712	1.799
80.9	5.900	0.831	78.439	1.684
80.7	5.364	0.814	77.275	1.578
80	4.917	0.797	76.202	1.481
75.5	4.538	0.780	75.203	1.391
75.5	4.214	0.763	74.267	1.306
74.4	3.933	0.746	73.386	1.226
72	3.688	0.729	72.553	1.151
72	3.471	0.712	71.759	1.079
70.5	3.278	0.695	71.002	1.011
70	3.105	0.678	70.277	0.945
70	2.950	0.661	69.579	0.882
70	2.810	0.644	68.907	0.821
69.3	2.682	0.627	68.256	0.762
67.5	2.565	0.610	67.626	0.705
66.5	2.458	0.593	67.013	0.650
64.5	2.360	0.576	66.415	0.596
64	2.269	0.559	65.832	0.543
62	2.185	0.542	65.262	0.491
61.5	2.107	0.525	64.703	0.441

60.9	2.034	0.508	64.154	0.391
60.9	1.967	0.492	63.613	0.342
60.8	1.903	0.475	63.080	0.294
60.5	1.844	0.458	62.553	0.246
60.3	1.788	0.441	62.032	0.199
60.3	1.735	0.424	61.515	0.152
60.2	1.686	0.407	61.002	0.106
60.2	1.639	0.390	60.491	0.060
60	1.595	0.373	59.981	0.014
59.8	1.553	0.356	59.472	-0.032
58.8	1.513	0.339	58.962	-0.079
58	1.475	0.322	58.450	-0.125
58	1.439	0.305	57.935	-0.172
57.8	1.405	0.288	57.415	-0.219
57	1.372	0.271	56.889	-0.266
57	1.341	0.254	56.356	-0.314
56.2	1.311	0.237	55.812	-0.364
55.5	1.283	0.220	55.257	-0.414
55.1	1.255	0.203	54.687	-0.465
55	1.229	0.186	54.099	-0.519
55	1.204	0.169	53.489	-0.574
55	1.180	0.153	52.852	-0.631
55	1.157	0.136	52.180	-0.692
55	1.135	0.119	51.465	-0.757
54.5	1.113	0.102	50.694	-0.827
54	1.093	0.085	49.845	-0.903
48.3	1.073	0.068	48.889	-0.990
47.2	1.054	0.051	47.766	-1.092
42.5	1.035	0.034	46.356	-1.219
36	1.017	0.017	44.296	-1.405

En la Figura 9 se muestra la función de distribución obtenida, con la escala Gumbel en el eje horizontal.

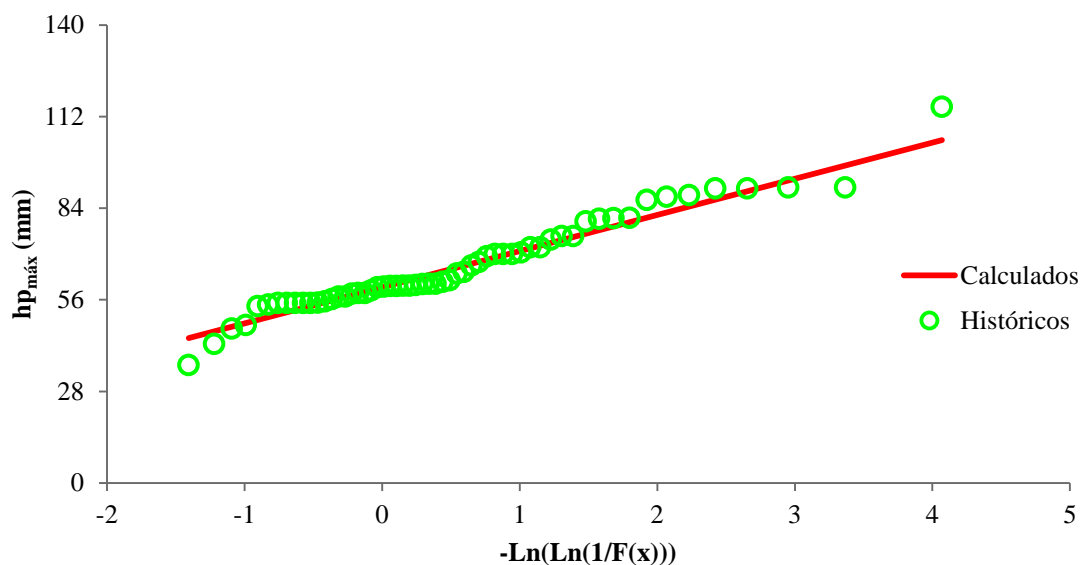


Figura 9. Función de distribución calculada para valores máximos históricos.

Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

4.2.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Se calcula la precipitación máxima y media de las tormentas históricas.

Fecha	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	Est6	PH media	PH máx
29/05/1986	58	30	38.6	36.2	43	51	42.800	58
30/05/1986	29	40	59.8	67.5	67.5	34	49.633	67.5
06/06/1986	0	64	0	0	0	0	10.667	64
26/06/1986	3.5	34	1.5	53.5	40	17	24.917	53.5
28/06/1986	0	38.5	0	0.1	11.1	47	16.117	47
01/07/1986	24	40	3.5	19	42.5	30	26.500	42.5
06/07/1986	26.5	36	33.3	28	28	20	28.633	36
04/08/1986	12.8	31	30.5	26.6	47.2	22	28.350	47.2
15/08/1986	0	49.5	2.5	33	1.5	17	17.250	49.5
16/08/1986	6.5	39.5	2	4.7	26.5	50	21.533	50
20/08/1986	0	15.5	0	0	41.5	60	19.500	60
21/08/1986	4.1	49.5	8.5	7.4	26	20	19.250	49.5
28/08/1986	0	46	9.5	86.5	12.5	3	26.250	86.5
24/09/1986	0	49	0	0	0	2	8.500	49
27/09/1986	4.4	0	0.5	1	20.1	80	17.667	80
28/09/1986	19.2	0	29.7	48.1	29	10	22.667	48.1
01/10/1986	0	0	10	1.8	0	57	11.467	57
04/10/1986	8	0	36	57.8	0	23	20.800	57.8

05/05/1991	20	0	0	54	0	20	15.667	54
10/05/1991	55	3	0	2.4	9.6	55	20.833	55
26/05/1991	0	10	2.5	46.5	1	0	10.000	46.5
27/05/1991	43	55	0	0	5	43	24.333	55
08/06/1991	36	0	17.8	70	4	36	27.300	70
11/06/1991	4	55	27.2	33.2	0	4	20.567	55
17/06/1991	42	5	2	7.5	70	42	28.083	70
24/06/1991	5	2	44.9	29.4	25	5	18.550	44.9
25/06/1991	42	2	28.5	18.7	14	42	24.533	42
03/07/1991	2	10	0	47	0	2	10.167	47
07/07/1991	7	55	0	10	13	7	15.333	55
22/08/1991	22	40	3.2	7.8	34.2	22	21.533	40
02/09/1991	6	40	55	20	15.7	6	23.783	55
17/09/1991	20	0	0	57	0	20	16.167	57
04/10/1991	6	32	58	30	10.9	6	23.817	58
16/05/2003	23	0	2.8	51	0	0	12.800	51
06/06/2003	64.5	5.7	21.2	1.4	0	0	15.467	64.5
08/06/2003	48.3	11	4.7	19	40	29.2	25.367	48.3
18/06/2003	40	26	17.4	17.3	10.5	75.5	31.117	75.5
19/06/2003	6.2	24	11.7	10	0	46	16.317	46
25/06/2003	21.2	38	21.8	19	81	74.5	42.583	81
26/06/2003	1.7	60.3	1.4	1.6	31.5	5.5	17.000	60.3
28/06/2003	0	90	0	0	10	0	16.667	90
05/07/2003	0	70	1.7	0.7	10	16.5	16.483	70
06/07/2003	48.4	90	13.9	9.4	19.5	38	36.533	90
14/07/2003	28.1	60.3	22.3	33.5	10	8.5	27.117	60.3
17/07/2003	0	0	12.7	62	10.5	0	14.200	62
25/07/2003	3	10.8	20.7	2.2	0	49.5	14.367	49.5
26/07/2003	0	80.9	0	0	10.5	28.5	19.983	80.9
07/08/2003	0.2	90.3	1.5	8.5	20	25	24.250	90.3
17/08/2003	16.1	60.9	7.4	12	15	1.5	18.817	60.9
19/08/2003	5	90.3	0	3	10	34	23.717	90.3
24/08/2003	4	50.8	2.4	8	0	0	10.867	50.8
29/08/2003	11	72	24.2	19	10	14	25.033	72
30/08/2003	8.3	90.2	30.2	115	40	0	47.283	115
01/09/2003	0	60.2	8.1	2.3	0	42	18.767	60.2
04/09/2003	18.7	80.7	0	0	25	0	20.733	80.7
06/09/2003	13.5	10.9	55.1	6.4	32.5	22.4	23.467	55.1
13/09/2003	8	60.8	30.8	13	10	16	23.100	60.8
14/09/2003	46.3	32	24.9	28.5	0	14	24.283	46.3
16/09/2003	36.5	31	9.1	24	32.8	61.5	32.483	61.5
20/09/2003	5.6	60.9	10	3	0	8	14.583	60.9
22/09/2003	18.3	60.2	0	36	0	38	25.417	60.2

05/10/2003	61	42	57.6	65	0	70.5	49.350	70.5
06/10/2003	54	72	39.7	16	41.3	18.6	40.267	72
01/05/2006	20	8.8	6.3	21.5	0	54.5	18.517	54.5
13/05/2006	0	21.8	0	0	0	88	18.300	88
20/05/2006	0	56.2	0	12	10.5	37	19.283	56.2
24/05/2006	32	22.8	13	5	40.5	20	22.217	40.5
28/05/2006	7	75.5	46.5	4	10.5	0	23.917	75.5
30/05/2006	5	52.6	58.8	39.5	40.5	14.5	35.150	58.8
01/06/2006	0	2.3	2	87.5	20.5	0	18.717	87.5
04/06/2006	0	25.8	45.7	0	0	7.5	13.167	45.7
07/06/2006	47	59.8	17.3	43.4	40	34	40.250	59.8
14/06/2006	6	49.3	0.5	14	60.5	40	28.383	60.5
19/07/2006	10	11.5	0	69.3	60.5	12	27.217	69.3
25/08/2006	0	0	16	66.5	40	12	22.417	66.5
02/09/2006	19	17.4	42	26	20	20	24.067	42
03/09/2006	10	48.8	14	12	20	9.5	19.050	48.8
11/09/2006	20	74.4	11.5	41	20	4	28.483	74.4
15/09/2006	0	5.7	49	0	0	0	9.117	49
18/09/2006	9	0	1	55.5	0	0	10.917	55.5

El análisis estadístico de los datos de precipitación máxima de las 80 tormentas históricas, con $\alpha = 0.0861$, $\beta = 54.2566$ y sustituyendo los valores en la Ecuación 4 se tiene:

$$F(x) = e^{-e^{-0.0861(x-54.2566)}}$$

Ecuación 7

Ordenados	Tr	F(x)	Calculados	Escala gumbel
115	81.000	0.988	105.225	4.388
90.3	40.500	0.975	97.101	3.689
90.3	27.000	0.963	92.318	3.277
90	20.250	0.951	88.902	2.983
90	16.200	0.938	86.236	2.753
88	13.500	0.926	84.042	2.564
87.5	11.571	0.914	82.175	2.404
86.5	10.125	0.901	80.546	2.263
81	9.000	0.889	79.099	2.139
80.9	8.100	0.877	77.796	2.027
80.7	7.364	0.864	76.609	1.924
80	6.750	0.852	75.517	1.830
75.5	6.231	0.840	74.505	1.743
75.5	5.786	0.827	73.560	1.662

74.4	5.400	0.815	72.675	1.586
72	5.063	0.802	71.839	1.514
72	4.765	0.790	71.049	1.446
70.5	4.500	0.778	70.297	1.381
70	4.263	0.765	69.580	1.319
70	4.050	0.753	68.894	1.260
70	3.857	0.741	68.236	1.204
69.3	3.682	0.728	67.603	1.149
67.5	3.522	0.716	66.993	1.097
66.5	3.375	0.704	66.404	1.046
64.5	3.240	0.691	65.833	0.997
64	3.115	0.679	65.279	0.949
62	3.000	0.667	64.741	0.903
61.5	2.893	0.654	64.218	0.858
60.9	2.793	0.642	63.708	0.814
60.9	2.700	0.630	63.210	0.771
60.8	2.613	0.617	62.723	0.729
60.5	2.531	0.605	62.246	0.688
60.3	2.455	0.593	61.779	0.648
60.3	2.382	0.580	61.321	0.608
60.2	2.314	0.568	60.871	0.570
60.2	2.250	0.556	60.429	0.531
60	2.189	0.543	59.993	0.494
59.8	2.132	0.531	59.563	0.457
58.8	2.077	0.519	59.140	0.420
58	2.025	0.506	58.721	0.384
58	1.976	0.494	58.307	0.349
57.8	1.929	0.481	57.898	0.313
57	1.884	0.469	57.492	0.279
57	1.841	0.457	57.090	0.244
56.2	1.800	0.444	56.691	0.210
55.5	1.761	0.432	56.294	0.175
55.1	1.723	0.420	55.900	0.141
55	1.688	0.407	55.507	0.108
55	1.653	0.395	55.116	0.074
55	1.620	0.383	54.725	0.040
55	1.588	0.370	54.335	0.007
55	1.558	0.358	53.945	-0.027
54.5	1.528	0.346	53.555	-0.060
54	1.500	0.333	53.164	-0.094
53.5	1.473	0.321	52.772	-0.128
51	1.446	0.309	52.378	-0.162
50.8	1.421	0.296	51.981	-0.196

50	1.397	0.284	51.582	-0.230
49.5	1.373	0.272	51.179	-0.265
49.5	1.350	0.259	50.772	-0.300
49.5	1.328	0.247	50.359	-0.336
49	1.306	0.235	49.941	-0.372
49	1.286	0.222	49.516	-0.408
48.8	1.266	0.210	49.083	-0.445
48.3	1.246	0.198	48.640	-0.484
48.1	1.227	0.185	48.187	-0.523
47.2	1.209	0.173	47.721	-0.563
47	1.191	0.160	47.241	-0.604
47	1.174	0.148	46.744	-0.647
46.5	1.157	0.136	46.226	-0.691
46.3	1.141	0.123	45.684	-0.738
46	1.125	0.111	45.114	-0.787
45.7	1.110	0.099	44.507	-0.839
44.9	1.095	0.086	43.856	-0.895
42.5	1.080	0.074	43.147	-0.957
42	1.066	0.062	42.360	-1.024
42	1.052	0.049	41.465	-1.101
40.5	1.038	0.037	40.404	-1.193
40	1.025	0.025	39.057	-1.309
36	1.013	0.012	37.063	-1.480

En la Figura 10 se muestra la función de distribución obtenida, con la escala Gumbel en el eje horizontal.

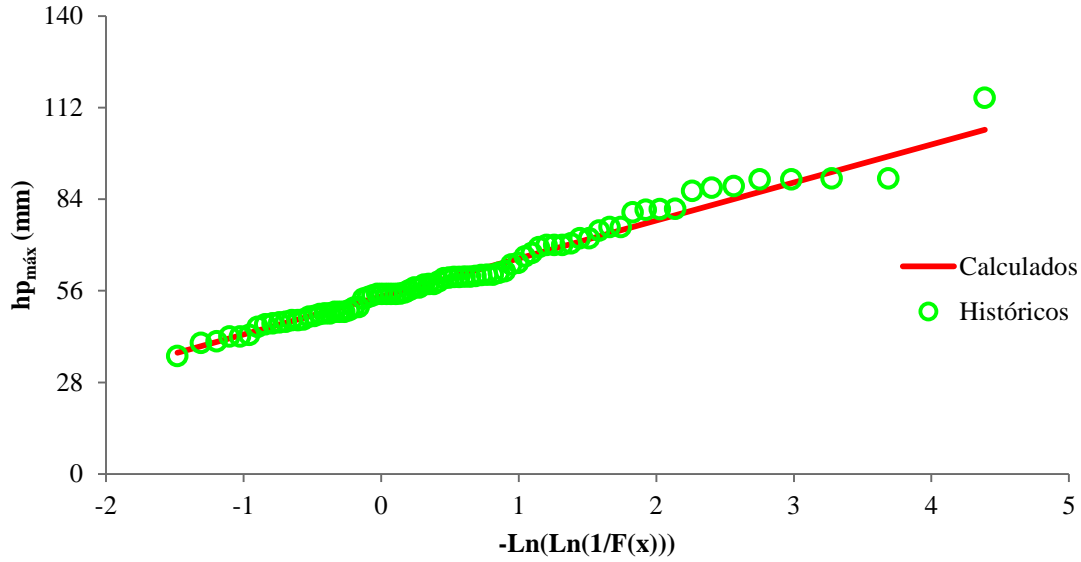


Figura 10. Función de distribución calculada para valores máximos históricos.

Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

4.3. Primer procedimiento de generación de tormentas sintéticas

4.3.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Se generaron 100 números aleatorios con la función de distribución dada por la Ecuación 5 y otros 100 números para seleccionar aleatoriamente (con remplazo) alguna de las 30 tormentas históricas.

U_k	$F(p_m)$	Tormenta histórica seleccionada
0.564	75.819	11
0.386	70.845	20
0.595	76.780	9
0.685	79.853	6
0.553	75.470	24
0.300	68.567	19
0.561	75.712	18
0.232	66.675	30
0.151	64.147	26
0.215	66.170	19
0.792	84.566	14

0.514	74.343	5
0.749	82.485	29
0.130	63.390	19
0.023	57.377	11
0.061	60.351	29
0.347	69.818	2
0.044	59.256	18
0.254	67.282	7
0.343	69.710	5
0.211	66.050	22
0.959	101.256	18
0.219	66.289	16
0.625	77.734	10
0.809	85.516	25
0.873	89.870	18
0.450	72.562	13
0.172	64.856	4
0.407	71.413	27
0.788	84.354	17
0.681	79.701	9
0.454	72.672	10
0.005	54.240	30
0.702	80.519	17
0.646	78.458	18
0.001	51.959	3
0.604	77.037	3
0.617	77.467	16
0.877	90.208	15
0.283	68.096	9
0.467	73.035	23
0.531	74.842	16
0.108	62.565	11
0.830	86.797	2
0.065	60.577	26
0.446	72.453	16
0.339	69.603	8
0.112	62.727	8
0.664	79.068	29
0.360	70.170	15
0.304	68.676	16
0.660	78.924	2
0.262	67.508	1

0.275	67.875	15
0.535	74.959	13
0.941	97.753	7
0.126	63.239	22
0.190	65.402	15
0.766	83.290	10
0.489	73.626	1
0.724	81.384	24
0.104	62.399	14
0.997	128.182	6
0.770	83.485	7
0.322	69.141	27
0.019	56.884	14
0.963	102.281	15
0.318	69.032	30
0.920	94.612	30
0.668	79.214	26
0.194	65.527	11
0.600	76.908	6
0.518	74.459	2
0.582	76.364	25
0.425	71.877	8
0.147	64.008	29
0.382	70.737	23
0.497	73.853	25
0.390	70.952	17
0.429	71.985	5
0.980	108.458	26
0.411	71.521	24
0.621	77.600	13
0.976	106.639	29
0.578	76.239	28
0.326	69.249	24
0.852	88.232	10
0.258	67.395	4
0.176	64.985	1
0.240	66.906	24
0.083	61.455	7
0.539	75.078	10
0.040	58.959	21
0.155	64.285	23
0.048	59.534	15

0.087	61.644	4
0.638	78.180	24
0.070	60.794	23
0.279	67.986	12
0.369	70.385	9

Se identificaron los máximos de dichas tormentas para escalarlas de acuerdo con la Ecuación 1.

Fecha	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	Est6
28/06/2003	0.0	75.8	0.0	0.0	8.4	0.0
16/09/2003	42.0	35.7	10.5	27.6	37.8	70.8
18/06/2003	40.7	26.4	17.7	17.6	10.7	76.8
08/06/1991	41.1	0.0	20.3	79.9	4.6	41.1
28/05/2006	7.0	75.5	46.5	4.0	10.5	0.0
04/09/2003	15.9	68.6	0.0	0.0	21.2	0.0
30/08/2003	5.5	59.4	19.9	75.7	26.3	0.0
11/09/2006	17.9	66.7	10.3	36.7	17.9	3.6
01/06/2006	0.0	1.7	1.5	64.1	15.0	0.0
04/09/2003	15.3	66.2	0.0	0.0	20.5	0.0
26/07/2003	0.0	84.6	0.0	0.0	11.0	29.8
27/09/1986	4.1	0.0	0.5	0.9	18.7	74.3
25/08/2006	0.0	0.0	19.8	82.5	49.6	14.9
04/09/2003	14.7	63.4	0.0	0.0	19.6	0.0
28/06/2003	0.0	57.4	0.0	0.0	6.4	0.0
25/08/2006	0.0	0.0	14.5	60.4	36.3	10.9
30/05/1986	30.0	41.4	61.9	69.8	69.8	35.2
30/08/2003	4.3	46.5	15.6	59.3	20.6	0.0
17/06/1991	40.4	4.8	1.9	7.2	67.3	40.4
27/09/1986	3.8	0.0	0.4	0.9	17.5	69.7
06/10/2003	49.5	66.1	36.4	14.7	37.9	17.1
30/08/2003	7.3	79.4	26.6	101.3	35.2	0.0
19/08/2003	3.7	66.3	0.0	2.2	7.3	25.0
25/06/2003	20.3	36.5	20.9	18.2	77.7	71.5
30/05/2006	7.3	76.5	85.5	57.4	58.9	21.1
30/08/2003	6.5	70.5	23.6	89.9	31.3	0.0
06/07/2003	39.0	72.6	11.2	7.6	15.7	30.6
28/08/1986	0.0	34.5	7.1	64.9	9.4	2.2
07/06/2006	56.1	71.4	20.7	51.8	47.8	40.6
29/08/2003	12.9	84.4	28.4	22.3	11.7	16.4
18/06/2003	42.2	27.4	18.4	18.3	11.1	79.7
25/06/2003	19.0	34.1	19.6	17.0	72.7	66.8

11/09/2006	14.6	54.2	8.4	29.9	14.6	2.9
29/08/2003	12.3	80.5	27.1	21.2	11.2	15.7
30/08/2003	5.7	61.5	20.6	78.5	27.3	0.0
06/06/1986	0.0	52.0	0.0	0.0	0.0	0.0
06/06/1986	0.0	77.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19/08/2003	4.3	77.5	0.0	2.6	8.6	29.2
07/08/2003	0.2	90.2	1.5	8.5	20.0	25.0
18/06/2003	36.1	23.5	15.7	15.6	9.5	68.1
13/05/2006	0.0	18.1	0.0	0.0	0.0	73.0
19/08/2003	4.1	74.8	0.0	2.5	8.3	28.2
28/06/2003	0.0	62.6	0.0	0.0	7.0	0.0
30/05/1986	37.3	51.4	76.9	86.8	86.8	43.7
01/06/2006	0.0	1.6	1.4	60.6	14.2	0.0
19/08/2003	4.0	72.5	0.0	2.4	8.0	27.3
06/06/2003	69.6	6.2	22.9	1.5	0.0	0.0
06/06/2003	62.7	5.5	20.6	1.4	0.0	0.0
25/08/2006	0.0	0.0	19.0	79.1	47.6	14.3
07/08/2003	0.2	70.2	1.2	6.6	15.5	19.4
19/08/2003	3.8	68.7	0.0	2.3	7.6	25.9
30/05/1986	33.9	46.8	69.9	78.9	78.9	39.8
29/05/1986	67.5	34.9	44.9	42.1	50.0	59.4
07/08/2003	0.2	67.9	1.1	6.4	15.0	18.8
06/07/2003	40.3	75.0	11.6	7.8	16.2	31.6
17/06/1991	58.7	7.0	2.8	10.5	97.8	58.7
06/10/2003	47.4	63.2	34.9	14.1	36.3	16.3
07/08/2003	0.1	65.4	1.1	6.2	14.5	18.1
25/06/2003	21.8	39.1	22.4	19.5	83.3	76.6
29/05/1986	73.6	38.1	49.0	46.0	54.6	64.7
28/05/2006	7.5	81.4	50.1	4.3	11.3	0.0
26/07/2003	0.0	62.4	0.0	0.0	8.1	22.0
08/06/1991	65.9	0.0	32.6	128.2	7.3	65.9
17/06/1991	50.1	6.0	2.4	8.9	83.5	50.1
07/06/2006	54.3	69.1	20.0	50.2	46.2	39.3
26/07/2003	0.0	56.9	0.0	0.0	7.4	20.0
07/08/2003	0.2	102.3	1.7	9.6	22.7	28.3
11/09/2006	18.6	69.0	10.7	38.0	18.6	3.7
11/09/2006	25.4	94.6	14.6	52.1	25.4	5.1
01/06/2006	0.0	2.1	1.8	79.2	18.6	0.0
28/06/2003	0.0	65.5	0.0	0.0	7.3	0.0
08/06/1991	39.6	0.0	19.6	76.9	4.4	39.6
30/05/1986	32.0	44.1	66.0	74.5	74.5	37.5
30/05/2006	6.5	68.3	76.4	51.3	52.6	18.8
06/06/2003	71.9	6.4	23.6	1.6	0.0	0.0

25/08/2006	0.0	0.0	15.4	64.0	38.5	11.6
13/05/2006	0.0	17.5	0.0	0.0	0.0	70.7
30/05/2006	6.3	66.1	73.9	49.6	50.9	18.2
29/08/2003	10.8	71.0	23.8	18.7	9.9	13.8
27/09/1986	4.0	0.0	0.4	0.9	18.1	72.0
01/06/2006	0.0	2.9	2.5	108.5	25.4	0.0
28/05/2006	6.6	71.5	44.0	3.8	9.9	0.0
06/07/2003	41.7	77.6	12.0	8.1	16.8	32.8
25/08/2006	0.0	0.0	25.7	106.6	64.1	19.2
19/07/2006	11.0	12.7	0.0	76.2	66.6	13.2
28/05/2006	6.4	69.2	42.7	3.7	9.6	0.0
25/06/2003	23.1	41.4	23.7	20.7	88.2	81.2
28/08/1986	0.0	35.8	7.4	67.4	9.7	2.3
29/05/1986	65.0	33.6	43.2	40.6	48.2	57.1
28/05/2006	6.2	66.9	41.2	3.5	9.3	0.0
17/06/1991	36.9	4.4	1.8	6.6	61.5	36.9
25/06/2003	19.6	35.2	20.2	17.6	75.1	69.1
05/10/2003	51.0	35.1	48.2	54.4	0.0	59.0
13/05/2006	0.0	15.9	0.0	0.0	0.0	64.3
07/08/2003	0.1	59.5	1.0	5.6	13.2	16.5
28/08/1986	0.0	32.8	6.8	61.6	8.9	2.1
28/05/2006	7.2	78.2	48.2	4.1	10.9	0.0
13/05/2006	0.0	15.1	0.0	0.0	0.0	60.8
05/07/2003	0.0	68.0	1.7	0.7	9.7	16.0
18/06/2003	37.3	24.2	16.2	16.1	9.8	70.4

En la Figura 11 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 70.8 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 16/09/2003 en este caso la número 20 cuyo máximo registrado fue de 61.5 mm.

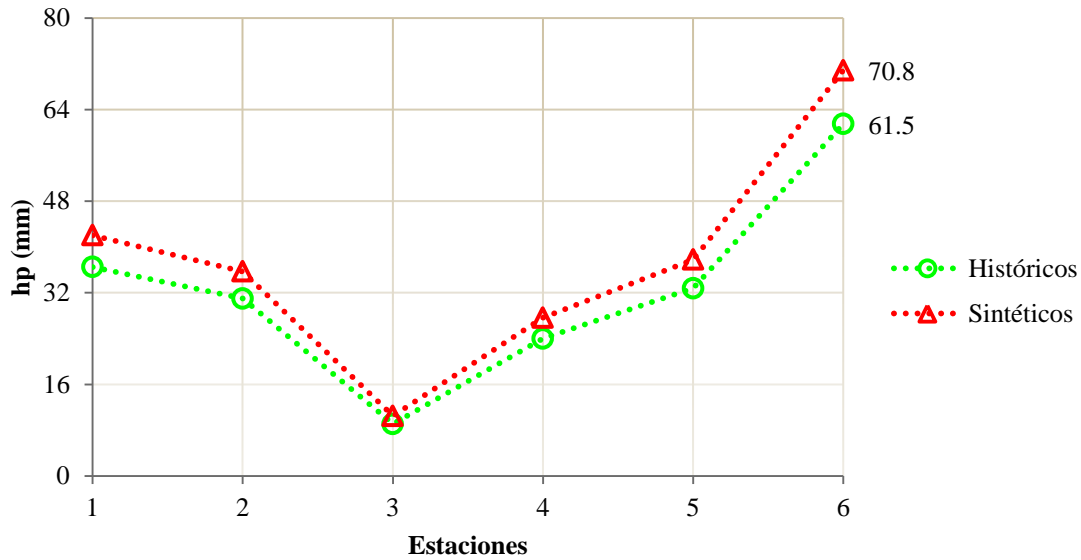


Figura 11. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm*

4.3.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Se generaron 100 números aleatorios con la función de distribución dada por la Ecuación 6 y otros 100 números para seleccionar aleatoriamente (con remplazo) alguna de las 58 tormentas históricas.

U_k	$F(p_m)$	Tormenta histórica seleccionada
0.123	51.656	56
0.820	77.701	30
0.030	45.911	9
0.119	51.481	4
0.987	107.571	37
0.734	72.826	29
0.995	118.075	26
0.666	69.795	49
0.585	66.719	43
0.649	69.101	29
0.226	55.438	19
0.948	92.237	2
0.183	53.980	48
0.564	65.977	28
0.457	62.526	12
0.495	63.737	48

0.781	75.293	53
0.478	63.191	27
0.688	70.690	6
0.777	75.063	1
0.645	68.942	34
0.393	60.576	26
0.653	69.261	23
0.059	48.329	12
0.243	56.001	40
0.307	58.000	26
0.884	82.968	16
0.606	67.484	57
0.841	79.234	45
0.222	55.304	25
0.115	51.303	9
0.888	83.385	10
0.439	61.994	50
0.136	52.210	24
0.080	49.608	26
0.435	61.871	56
0.038	46.699	55
0.051	47.767	23
0.311	58.123	20
0.717	72.003	9
0.901	84.860	37
0.965	96.823	23
0.542	65.256	13
0.264	56.680	54
0.499	63.866	42
0.880	82.564	22
0.773	74.836	7
0.546	65.391	7
0.098	50.498	47
0.795	76.074	21
0.739	73.025	23
0.094	50.299	53
0.696	71.041	52
0.709	71.632	20
0.969	98.221	17
0.375	60.056	6
0.560	65.839	34
0.624	68.124	20
0.200	54.585	10

0.923	87.684	51
0.158	53.048	39
0.538	65.122	19
0.431	61.747	4
0.204	54.723	4
0.756	73.904	44
0.453	62.402	18
0.397	60.698	21
0.752	73.694	50
0.354	59.414	49
0.102	50.693	41
0.628	68.277	14
0.034	46.322	3
0.952	93.157	54
0.016	44.179	40
0.859	80.621	7
0.581	66.577	48
0.816	77.429	36
0.931	88.954	40
0.824	77.978	24
0.863	80.967	1
0.414	61.221	41
0.845	79.545	39
0.055	48.055	18
0.410	61.099	47
0.012	43.436	46
0.760	74.117	38
0.286	57.345	11
0.692	70.864	58
0.610	67.632	51
0.674	70.129	37
0.517	64.422	4
0.974	99.814	11
0.474	63.064	33
0.589	66.862	37
0.482	63.318	21
0.521	64.553	56
0.072	49.152	38
0.504	63.995	36
0.713	71.816	15
0.803	76.572	10

Se identificaron los máximos de dichas tormentas para escalarlas de acuerdo con la Ecuación 1.

Fecha	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	Est6
25/08/2006	0.0	0.0	12.4	51.7	31.1	9.3
14/07/2003	36.2	77.7	28.7	43.2	12.9	11.0
27/09/1986	2.5	0.0	0.3	0.6	11.5	45.9
01/07/1986	29.1	48.5	4.2	23.0	51.5	36.3
30/08/2003	7.8	84.4	28.2	107.6	37.4	0.0
06/07/2003	39.2	72.8	11.2	7.6	15.8	30.7
26/06/2003	3.3	118.1	2.7	3.1	61.7	10.8
20/05/2006	0.0	69.8	0.0	14.9	13.0	46.0
20/09/2003	6.1	66.7	11.0	3.3	0.0	8.8
06/07/2003	37.2	69.1	10.7	7.2	15.0	29.2
02/09/1991	6.0	40.3	55.4	20.2	15.8	6.0
30/05/1986	39.6	54.7	81.7	92.2	92.2	46.5
13/05/2006	0.0	13.4	0.0	0.0	0.0	54.0
05/07/2003	0.0	66.0	1.6	0.7	9.4	15.6
05/05/1991	23.2	0.0	0.0	62.5	0.0	23.2
13/05/2006	0.0	15.8	0.0	0.0	0.0	63.7
07/06/2006	59.2	75.3	21.8	54.6	50.4	42.8
28/06/2003	0.0	63.2	0.0	0.0	7.0	0.0
04/08/1986	19.2	46.4	45.7	39.8	70.7	32.9
29/05/1986	75.1	38.8	50.0	46.8	55.7	66.0
17/08/2003	18.2	68.9	8.4	13.6	17.0	1.7
26/06/2003	1.7	60.6	1.4	1.6	31.6	5.5
08/06/2003	69.3	15.8	6.7	27.2	57.4	41.9
05/05/1991	17.9	0.0	0.0	48.3	0.0	17.9
06/09/2003	13.7	11.1	56.0	6.5	33.0	22.8
26/06/2003	1.6	58.0	1.3	1.5	30.3	5.3
11/06/1991	6.0	83.0	41.0	50.1	0.0	6.0
11/09/2006	18.1	67.5	10.4	37.2	18.1	3.6
05/10/2003	68.6	47.2	64.7	73.1	0.0	79.2
25/06/2003	14.5	25.9	14.9	13.0	55.3	50.9
27/09/1986	2.8	0.0	0.3	0.6	12.9	51.3
01/10/1986	0.0	0.0	14.6	2.6	0.0	83.4
28/05/2006	5.7	62.0	38.2	3.3	8.6	0.0
18/06/2003	27.7	18.0	12.0	12.0	7.3	52.2
26/06/2003	1.4	49.6	1.2	1.3	25.9	4.5
25/08/2006	0.0	0.0	14.9	61.9	37.2	11.2
19/07/2006	6.7	7.7	0.0	46.7	40.8	8.1
08/06/2003	47.8	10.9	4.6	18.8	39.6	28.9
17/09/1991	20.4	0.0	0.0	58.1	0.0	20.4

27/09/1986	4.0	0.0	0.5	0.9	18.1	72.0
30/08/2003	6.1	66.6	22.3	84.9	29.5	0.0
08/06/2003	96.8	22.1	9.4	38.1	80.2	58.5
10/05/1991	65.3	3.6	0.0	2.8	11.4	65.3
14/06/2006	5.6	46.2	0.5	13.1	56.7	37.5
16/09/2003	37.9	32.2	9.5	24.9	34.1	63.9
06/06/2003	82.6	7.3	27.1	1.8	0.0	0.0
20/08/1986	0.0	19.3	0.0	0.0	51.8	74.8
20/08/1986	0.0	16.9	0.0	0.0	45.2	65.4
01/05/2006	18.5	8.2	5.8	19.9	0.0	50.5
04/10/1991	7.9	42.0	76.1	39.3	14.3	7.9
08/06/2003	73.0	16.6	7.1	28.7	60.5	44.1
07/06/2006	39.5	50.3	14.6	36.5	33.6	28.6
01/06/2006	0.0	1.9	1.6	71.0	16.6	0.0
17/09/1991	25.1	0.0	0.0	71.6	0.0	25.1
17/06/1991	58.9	7.0	2.8	10.5	98.2	58.9
04/08/1986	16.3	39.4	38.8	33.8	60.1	28.0
17/08/2003	17.4	65.8	8.0	13.0	16.2	1.6
17/09/1991	23.9	0.0	0.0	68.1	0.0	23.9
01/10/1986	0.0	0.0	9.6	1.7	0.0	54.6
30/05/2006	7.5	78.4	87.7	58.9	60.4	21.6
04/09/2003	12.3	53.0	0.0	0.0	16.4	0.0
02/09/1991	7.1	47.4	65.1	23.7	18.6	7.1
01/07/1986	34.9	58.1	5.1	27.6	61.7	43.6
01/07/1986	30.9	51.5	4.5	24.5	54.7	38.6
22/09/2003	22.5	73.9	0.0	44.2	0.0	46.7
07/07/1991	7.9	62.4	0.0	11.3	14.7	7.9
04/10/1991	6.3	33.5	60.7	31.4	11.4	6.3
28/05/2006	6.8	73.7	45.4	3.9	10.2	0.0
20/05/2006	0.0	59.4	0.0	12.7	11.1	39.1
13/09/2003	6.7	50.7	25.7	10.8	8.3	13.3
27/05/1991	53.4	68.3	0.0	0.0	6.2	53.4
06/06/1986	0.0	46.3	0.0	0.0	0.0	0.0
14/06/2006	9.2	75.9	0.8	21.6	93.2	61.6
06/09/2003	10.8	8.7	44.2	5.1	26.1	18.0
20/08/1986	0.0	20.8	0.0	0.0	55.8	80.6
13/05/2006	0.0	16.5	0.0	0.0	0.0	66.6
29/08/2003	11.8	77.4	26.0	20.4	10.8	15.1
06/09/2003	21.8	17.6	89.0	10.3	52.5	36.2
18/06/2003	41.3	26.9	18.0	17.9	10.8	78.0
29/05/1986	81.0	41.9	53.9	50.5	60.0	71.2
13/09/2003	8.1	61.2	31.0	13.1	10.1	16.1

04/09/2003	18.4	79.5	0.0	0.0	24.6	0.0
07/07/1991	6.1	48.1	0.0	8.7	11.4	6.1
01/05/2006	22.4	9.9	7.1	24.1	0.0	61.1
06/10/2003	32.6	43.4	24.0	9.7	24.9	11.2
01/09/2003	0.0	74.1	10.0	2.8	0.0	51.7
04/10/1986	7.9	0.0	35.7	57.3	0.0	22.8
18/09/2006	11.5	0.0	1.3	70.9	0.0	0.0
30/05/2006	5.8	60.5	67.6	45.4	46.6	16.7
30/08/2003	5.1	55.0	18.4	70.1	24.4	0.0
01/07/1986	36.4	60.6	5.3	28.8	64.4	45.5
04/10/1986	13.8	0.0	62.2	99.8	0.0	39.7
07/08/2003	0.1	63.1	1.0	5.9	14.0	17.5
30/08/2003	4.8	52.4	17.6	66.9	23.3	0.0
04/10/1991	6.6	34.9	63.3	32.8	11.9	6.6
25/08/2006	0.0	0.0	15.5	64.6	38.8	11.6
01/09/2003	0.0	49.2	6.6	1.9	0.0	34.3
29/08/2003	9.8	64.0	21.5	16.9	8.9	12.4
08/06/1991	36.9	0.0	18.3	71.8	4.1	36.9
01/10/1986	0.0	0.0	13.4	2.4	0.0	76.6

En la Figura 12 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 58.1 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 17/09/1991 en este caso la número 20 cuyo máximo registrado fue de 57 mm.

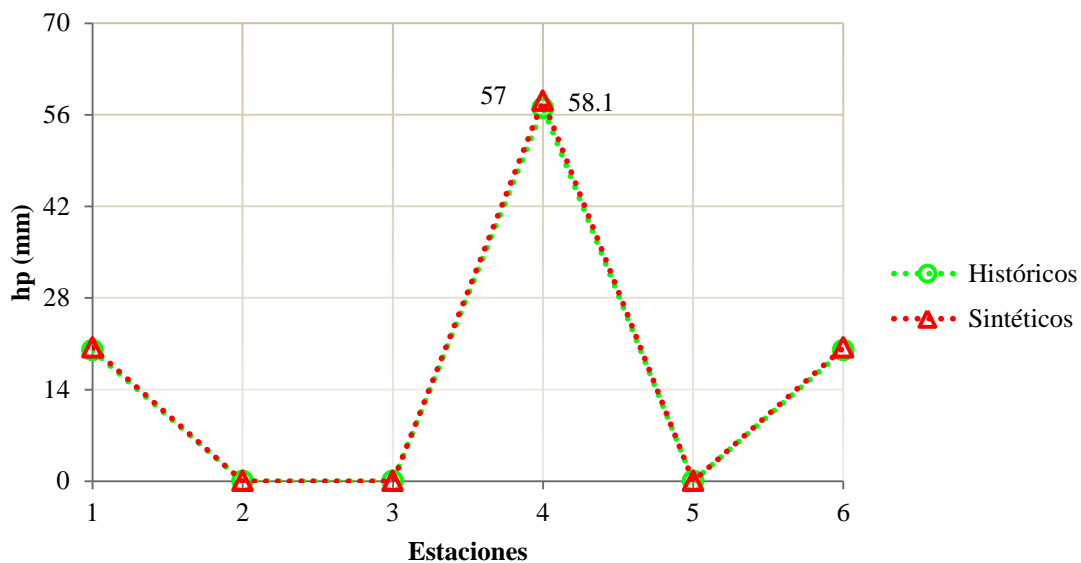


Figura 12. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

4.3.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Se generaron 100 números aleatorios con la función de distribución dada por la Ecuación 7 y otros 100 números para seleccionar aleatoriamente (con remplazo) alguna de las 80 tormentas históricas.

U_k	$F(p_m)$	Tormenta histórica seleccionada
0.144	46.586	38
0.841	74.640	3
0.051	41.574	53
0.140	46.416	46
0.008	35.988	13
0.756	69.040	2
0.016	37.796	77
0.688	65.664	29
0.606	62.295	20
0.670	64.898	1
0.247	50.365	67
0.969	94.567	44
0.204	48.887	27
0.585	61.491	80
0.478	57.784	58
0.517	59.078	27
0.803	71.843	34
0.499	58.494	79
0.709	66.653	49
0.798	71.579	42
0.666	64.724	9
0.414	55.715	78
0.674	65.074	73
0.080	43.509	57
0.264	50.942	16
0.329	53.011	77
0.905	81.059	63
0.628	63.128	40
0.863	76.460	23
0.243	50.229	76
0.136	46.245	54
0.909	81.592	55
0.461	57.218	30
0.158	47.126	75
0.102	44.650	78
0.457	57.086	38

0.059	42.165	37
0.072	43.030	73
0.333	53.139	68
0.738	68.116	53
0.923	83.513	12
0.987	104.354	72
0.563	60.712	59
0.286	51.641	36
0.521	59.216	19
0.901	80.548	71
0.794	71.320	50
0.568	60.858	51
0.119	45.478	26
0.816	72.743	70
0.760	69.264	74
0.115	45.291	34
0.717	67.043	33
0.730	67.702	69
0.991	108.590	64
0.397	55.165	49
0.581	61.342	8
0.645	63.827	68
0.222	49.497	55
0.944	87.396	32
0.179	47.954	15
0.559	60.567	67
0.453	56.955	46
0.226	49.638	47
0.777	70.258	22
0.474	57.651	66
0.418	55.844	69
0.773	70.020	30
0.375	54.490	29
0.123	45.662	18
0.649	63.994	60
0.055	41.877	45
0.973	96.237	36
0.038	40.450	17
0.880	78.137	51
0.602	62.141	28
0.837	74.320	11
0.952	89.257	16
0.845	74.966	75

0.884	78.561	43
0.435	56.397	18
0.867	76.833	15
0.076	43.273	65
0.431	56.268	26
0.033	40.053	25
0.781	70.500	14
0.307	52.330	56
0.713	66.847	41
0.632	63.289	32
0.696	66.032	13
0.538	59.814	47
0.995	115.288	56
0.495	58.358	7
0.610	62.451	12
0.503	58.629	71
0.542	59.955	39
0.094	44.236	14
0.525	59.355	11
0.734	67.908	61
0.824	73.320	54

Se identificaron los máximos de dichas tormentas para escalarlas de acuerdo con la Ecuación 1.

Fecha	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	Est6
19/06/2003	6.3	24.3	11.8	10.1	0.0	46.6
06/06/1986	0.0	74.6	0.0	0.0	0.0	0.0
30/08/2003	3.0	32.6	10.9	41.6	14.5	0.0
25/07/2003	2.8	10.1	19.4	2.1	0.0	46.4
28/08/1986	0.0	19.1	4.0	36.0	5.2	1.2
30/05/1986	29.7	40.9	61.2	69.0	69.0	34.8
03/09/2006	7.7	37.8	10.8	9.3	15.5	7.4
07/07/1991	8.4	65.7	0.0	11.9	15.5	8.4
10/05/1991	62.3	3.4	0.0	2.7	10.9	62.3
29/05/1986	64.9	33.6	43.2	40.5	48.1	57.1
24/05/2006	39.8	28.4	16.2	6.2	50.4	24.9
14/07/2003	44.1	94.6	35.0	52.5	15.7	13.3
25/06/1991	48.9	2.3	33.2	21.8	16.3	48.9
18/09/2006	10.0	0.0	1.1	61.5	0.0	0.0
14/09/2003	57.8	39.9	31.1	35.6	0.0	17.5
25/06/1991	59.1	2.8	40.1	26.3	19.7	59.1
16/05/2003	32.4	0.0	3.9	71.8	0.0	0.0

15/09/2006	0.0	6.8	58.5	0.0	0.0	0.0
17/08/2003	17.6	66.7	8.1	13.1	16.4	1.6
05/07/2003	0.0	71.6	1.7	0.7	10.2	16.9
15/08/1986	0.0	64.7	3.3	43.1	2.0	22.2
11/09/2006	15.0	55.7	8.6	30.7	15.0	3.0
14/06/2006	6.5	53.0	0.5	15.1	65.1	43.0
13/09/2003	5.7	43.5	22.0	9.3	7.2	11.4
28/09/1986	20.3	0.0	31.5	50.9	30.7	10.6
03/09/2006	10.9	53.0	15.2	13.0	21.7	10.3
06/10/2003	60.8	81.1	44.7	18.0	46.5	20.9
26/06/2003	1.8	63.1	1.5	1.7	33.0	5.8
08/06/1991	39.3	0.0	19.4	76.5	4.4	39.3
02/09/2006	22.7	20.8	50.2	31.1	23.9	23.9
01/09/2003	0.0	46.2	6.2	1.8	0.0	32.3
04/09/2003	18.9	81.6	0.0	0.0	25.3	0.0
22/08/1991	31.5	57.2	4.6	11.2	48.9	31.5
25/08/2006	0.0	0.0	11.3	47.1	28.3	8.5
11/09/2006	12.0	44.7	6.9	24.6	12.0	2.4
19/06/2003	7.7	29.8	14.5	12.4	0.0	57.1
18/06/2003	22.3	14.5	9.7	9.7	5.9	42.2
14/06/2006	4.3	35.1	0.4	10.0	43.0	28.4
28/05/2006	4.9	53.1	32.7	2.8	7.4	0.0
30/08/2003	4.9	53.4	17.9	68.1	23.7	0.0
21/08/1986	6.9	83.5	14.3	12.5	43.9	33.7
07/06/2006	82.0	104.4	30.2	75.7	69.8	59.3
16/09/2003	36.0	30.6	9.0	23.7	32.4	60.7
08/06/2003	51.6	11.8	5.0	20.3	42.8	31.2
05/05/1991	21.9	0.0	0.0	59.2	0.0	21.9
04/06/2006	0.0	45.5	80.5	0.0	0.0	13.2
19/08/2003	3.9	71.3	0.0	2.4	7.9	26.9
24/08/2003	4.8	60.9	2.9	9.6	0.0	0.0
24/06/1991	5.1	2.0	45.5	29.8	25.3	5.1
01/06/2006	0.0	1.9	1.7	72.7	17.0	0.0
19/07/2006	10.0	11.5	0.0	69.3	60.5	12.0
16/05/2003	20.4	0.0	2.5	45.3	0.0	0.0
04/10/1991	6.9	37.0	67.0	34.7	12.6	6.9
30/05/2006	5.8	60.6	67.7	45.5	46.6	16.7
01/05/2006	39.8	17.5	12.6	42.8	0.0	108.6
17/08/2003	14.6	55.2	6.7	10.9	13.6	1.4
04/08/1986	16.6	40.3	39.6	34.6	61.3	28.6
28/05/2006	5.9	63.8	39.3	3.4	8.9	0.0
04/09/2003	11.5	49.5	0.0	0.0	15.3	0.0

17/09/1991	30.7	0.0	0.0	87.4	0.0	30.7
27/09/1986	2.6	0.0	0.3	0.6	12.0	48.0
24/05/2006	47.9	34.1	19.4	7.5	60.6	29.9
25/07/2003	3.5	12.4	23.8	2.5	0.0	57.0
26/07/2003	0.0	49.6	0.0	0.0	6.4	17.5
27/05/1991	54.9	70.3	0.0	0.0	6.4	54.9
20/05/2006	0.0	57.7	0.0	12.3	10.8	38.0
30/05/2006	4.7	50.0	55.8	37.5	38.5	13.8
22/08/1991	38.5	70.0	5.6	13.7	59.9	38.5
07/07/1991	6.9	54.5	0.0	9.9	12.9	6.9
04/10/1986	6.3	0.0	28.4	45.7	0.0	18.2
20/09/2003	5.9	64.0	10.5	3.2	0.0	8.4
17/07/2003	0.0	0.0	8.6	41.9	7.1	0.0
08/06/2003	96.2	21.9	9.4	37.9	79.7	58.2
01/10/1986	0.0	0.0	7.1	1.3	0.0	40.4
24/08/2003	6.2	78.1	3.7	12.3	0.0	0.0
03/07/1991	2.6	13.2	0.0	62.1	0.0	2.6
20/08/1986	0.0	19.2	0.0	0.0	51.4	74.3
28/09/1986	35.6	0.0	55.1	89.3	53.8	18.6
25/08/2006	0.0	0.0	18.0	75.0	45.1	13.5
06/07/2003	42.2	78.6	12.1	8.2	17.0	33.2
04/10/1986	7.8	0.0	35.1	56.4	0.0	22.4
27/09/1986	4.2	0.0	0.5	1.0	19.3	76.8
13/05/2006	0.0	10.7	0.0	0.0	0.0	43.3
24/06/1991	6.3	2.5	56.3	36.8	31.3	6.3
17/06/1991	24.0	2.9	1.1	4.3	40.1	24.0
24/09/1986	0.0	70.5	0.0	0.0	0.0	2.9
06/09/2003	12.8	10.4	52.3	6.1	30.9	21.3
28/06/2003	0.0	66.8	0.0	0.0	7.4	0.0
17/09/1991	22.2	0.0	0.0	63.3	0.0	22.2
28/08/1986	0.0	35.1	7.3	66.0	9.5	2.3
26/07/2003	0.0	59.8	0.0	0.0	7.8	21.1
06/09/2003	28.2	22.8	115.3	13.4	68.0	46.9
06/07/1986	43.0	58.4	54.0	45.4	45.4	32.4
21/08/1986	5.2	62.5	10.7	9.3	32.8	25.2
04/06/2006	0.0	33.1	58.6	0.0	0.0	9.6
25/06/2003	15.7	28.1	16.1	14.1	60.0	55.1
24/09/1986	0.0	44.2	0.0	0.0	0.0	1.8
20/08/1986	0.0	15.3	0.0	0.0	41.1	59.4
22/09/2003	20.6	67.9	0.0	40.6	0.0	42.9
01/09/2003	0.0	73.3	9.9	2.8	0.0	51.2

En la Figura 13 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 46.6 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 19/06/2003 en este caso la número 38 cuyo máximo registrado fue de 46 mm.

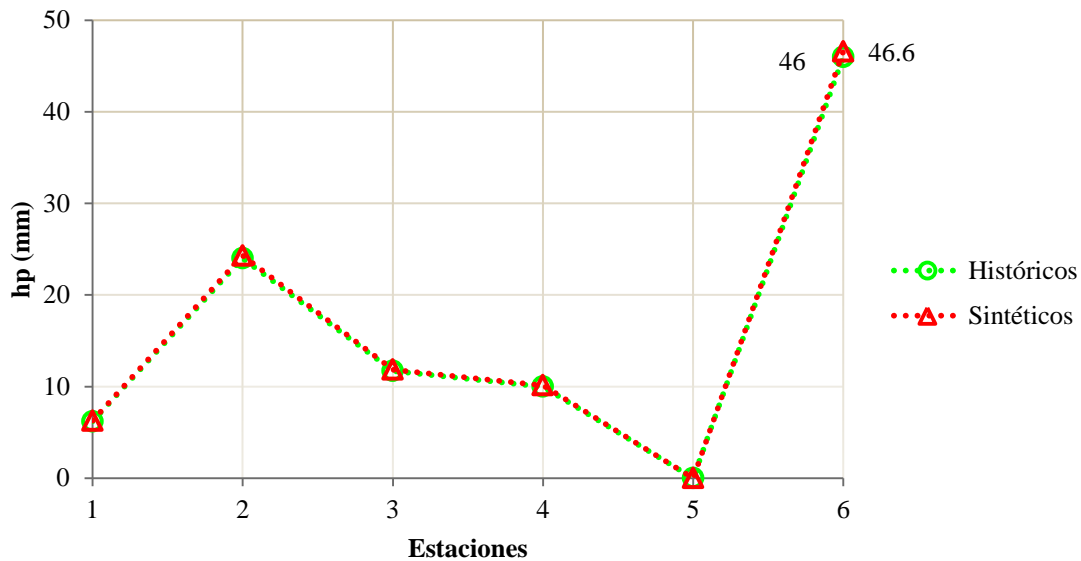


Figura 13. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

4.4. Validación del primer procedimiento

4.4.1. *Umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

En primera instancia se verifica la eficacia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 14 y la Figura 15 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

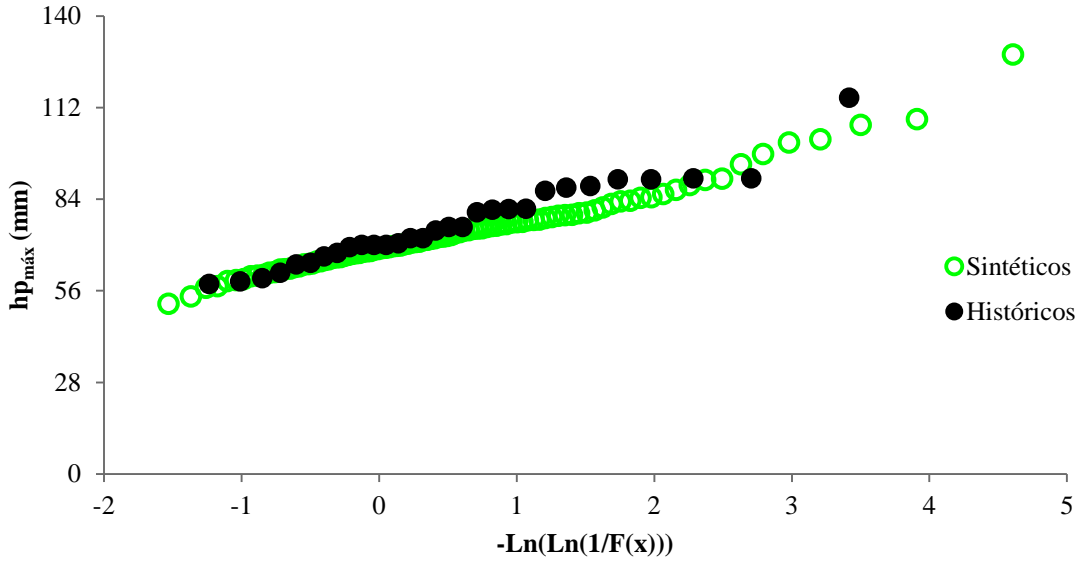


Figura 14. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm*

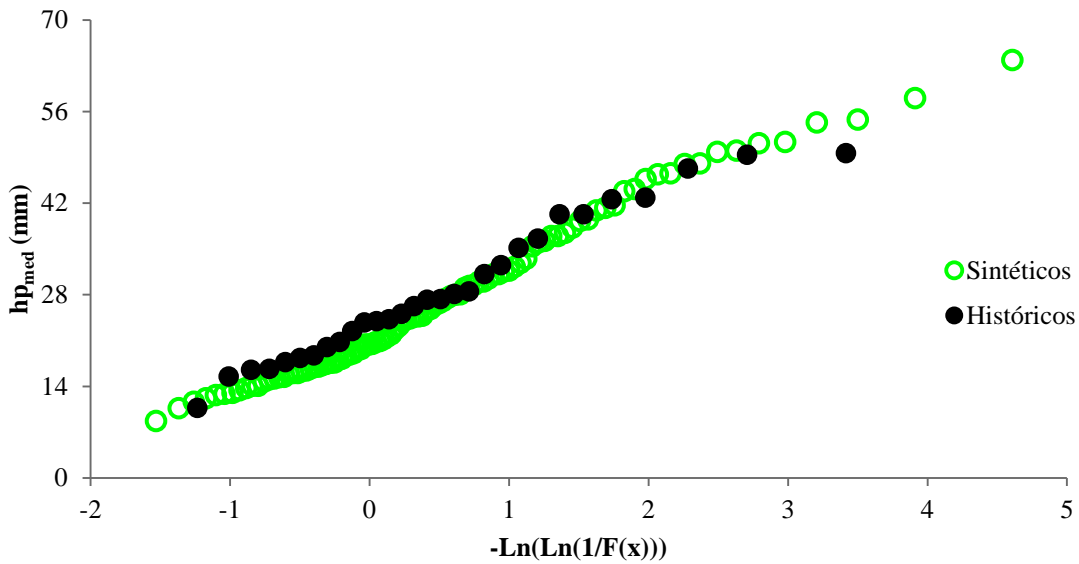


Figura 15. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm*

En la Figura 15 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones medias se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones máximas Figura 14, los valores correspondientes a las tormentas generadas resulta menor o mayor que los de las históricas en una zona de la figura.

Para identificar las causas que motivan las diferencias encontradas entre las precipitaciones máximas sintéticas y las históricas, se construyen la Figura 16 y la Figura 17, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias, para las tormentas históricas y para las sintéticas respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos.

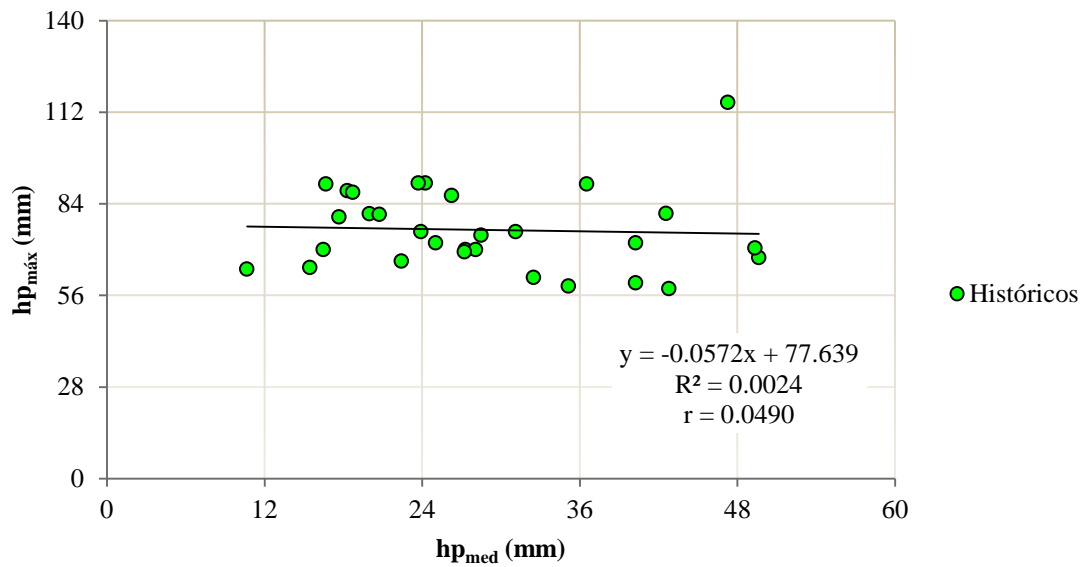


Figura 16. Relación entre la precipitación media y precipitación máxima de 30 datos históricos

Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

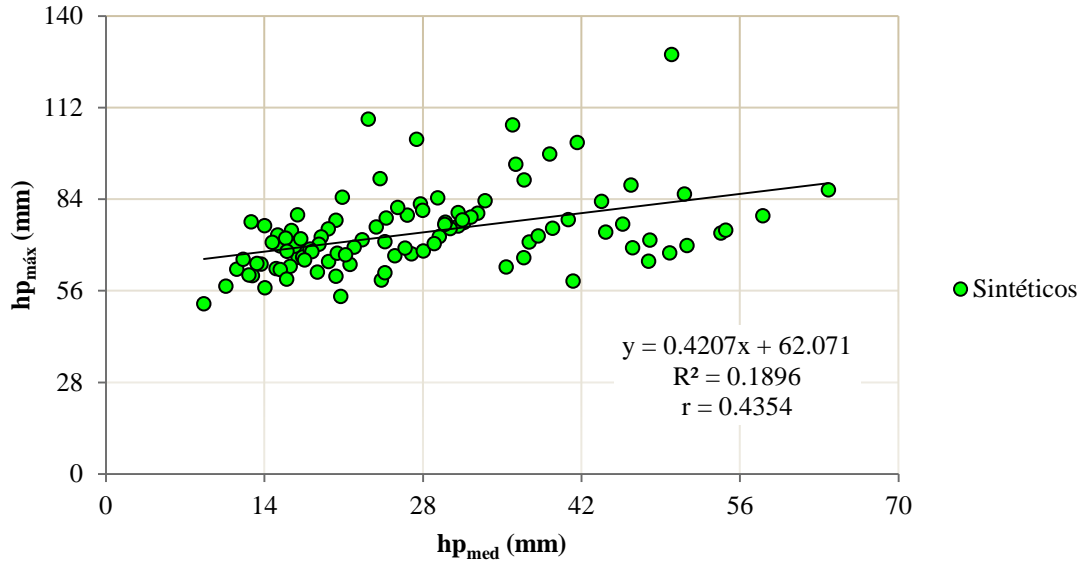


Figura 17. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Realizando un análisis más a fondo se descubre que la correlación tan pequeña que se observa en la Figura 16 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo, en otras palabras, la correlación que se obtiene puede considerarse espuria (un análisis de la correlación espuria entre variables se encuentra en Echávez y Arrijoja, 2006).

Por este motivo se define un índice de extensión espacial de las tormentas históricas (IEE), Ecuación 2. Al relacionar la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, se obtiene la Figura 18 que muestra una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas.

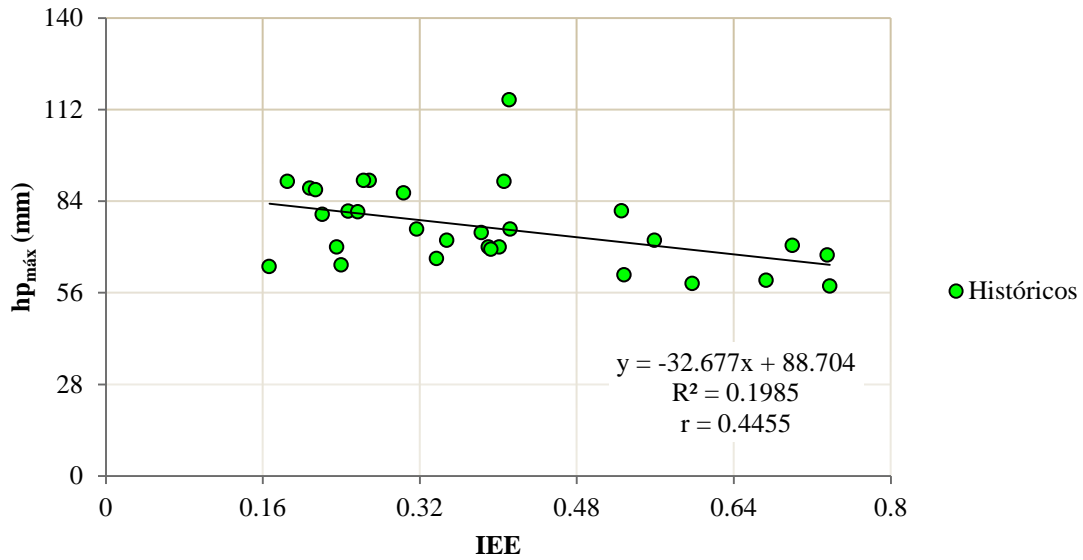


Figura 18. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos históricos.

Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

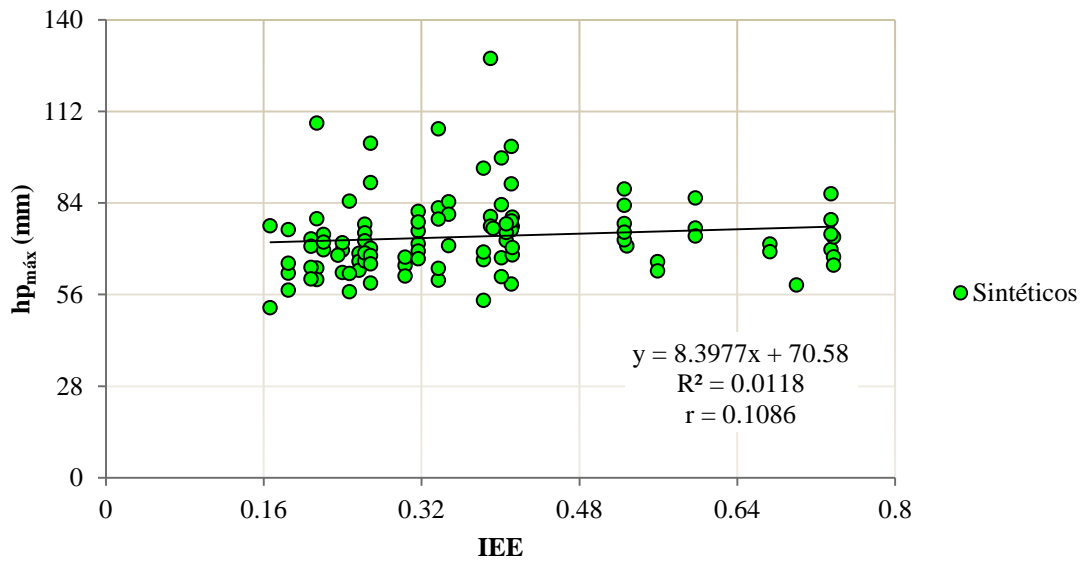


Figura 19. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

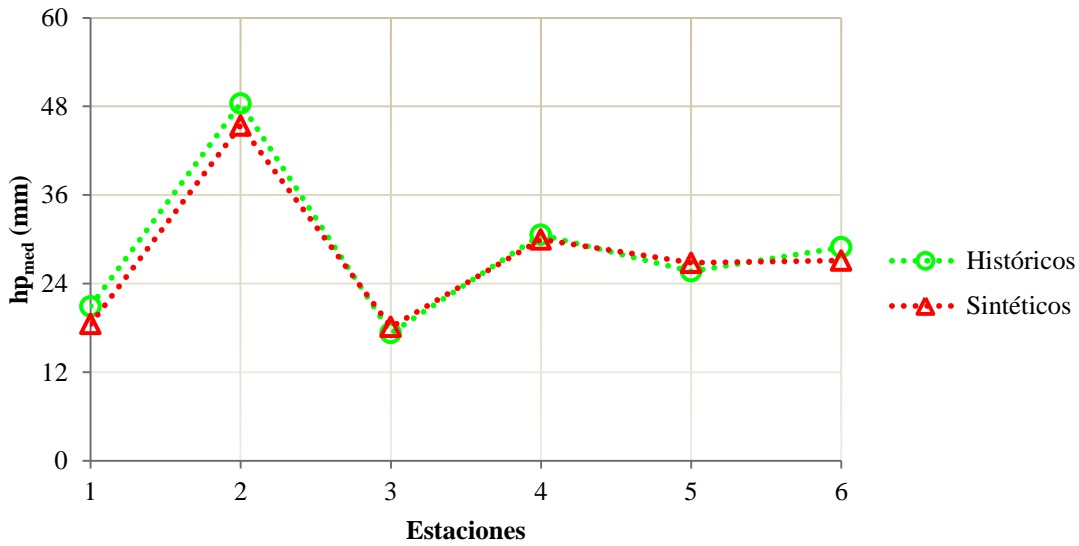


Figura 20. Comportamiento de la media para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

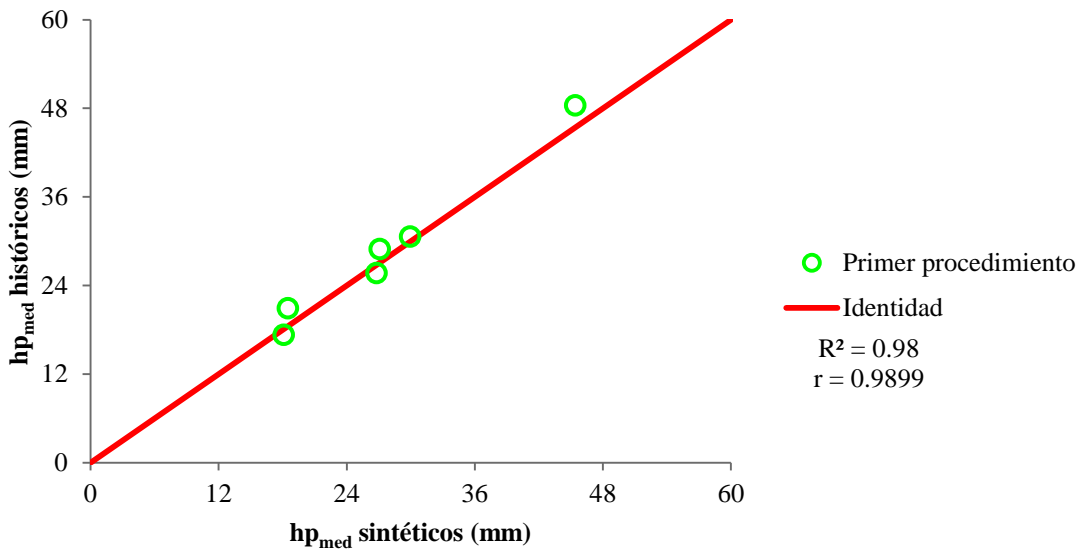


Figura 21. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

En la Figura 20 se muestra la representación lograda de los valores medios estación por estación entre los históricos y los sintéticos, adicionalmente muestra que para la estación 1, 2, 4 y 6 el valor medio de los datos generados sintéticamente es menor al valor medio de los históricos empleados, finalmente para las estaciones restantes la representación se considera adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 21, la cual muestra una función identidad y por lo tanto es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría.

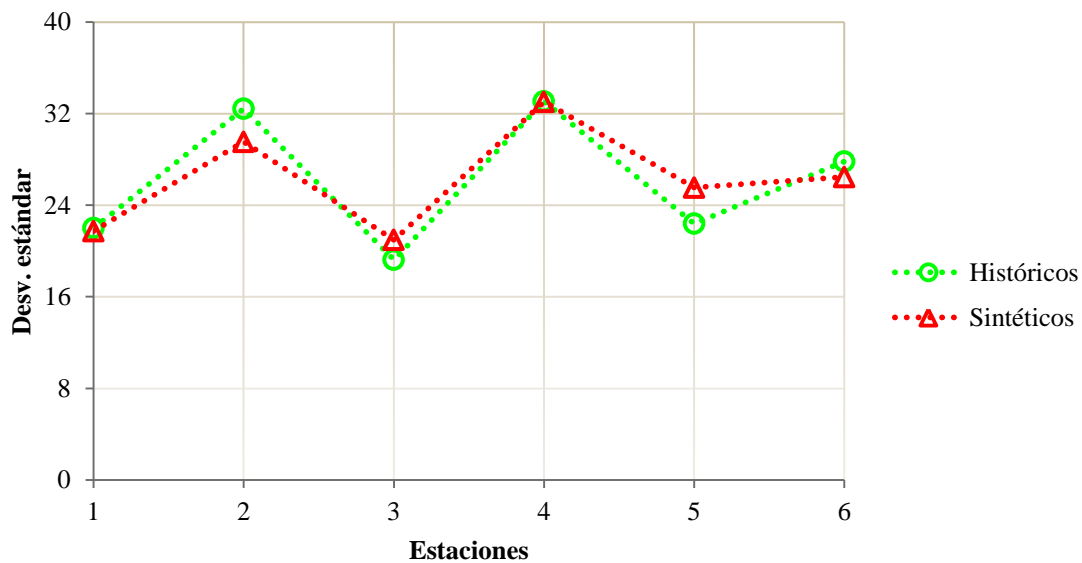


Figura 22. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

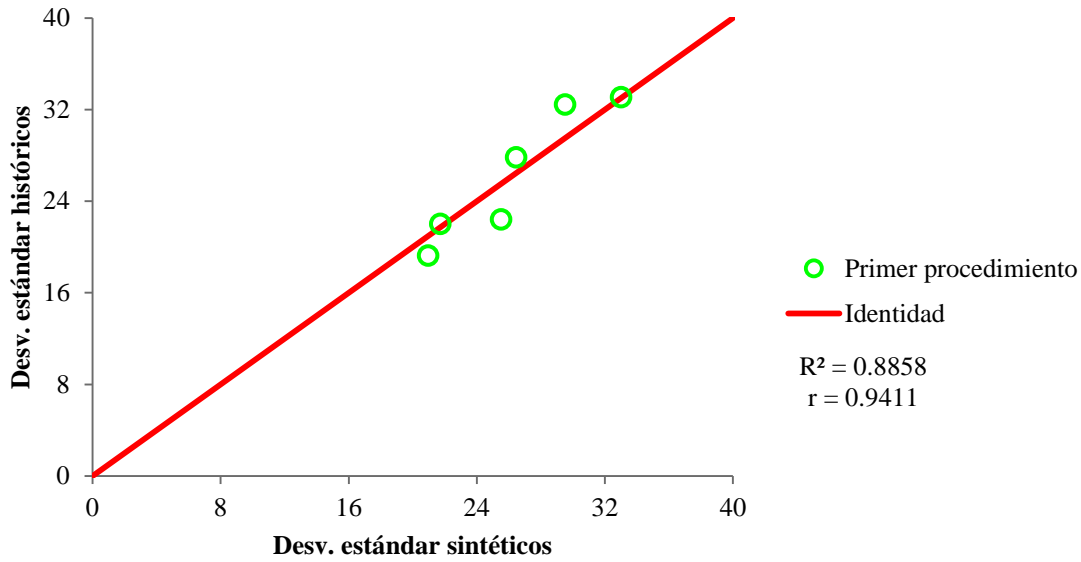


Figura 23. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

El análisis de la Figura 22 presenta que en las estaciones 1, 2, 4 y 6, el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en las estaciones 3 y 5 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 23 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que se acepta la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

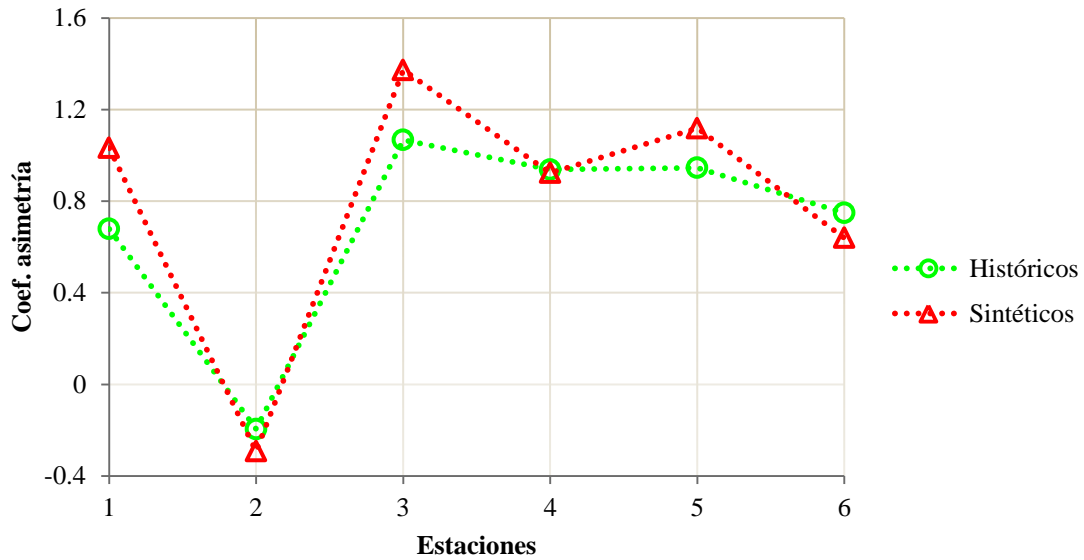


Figura 24. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

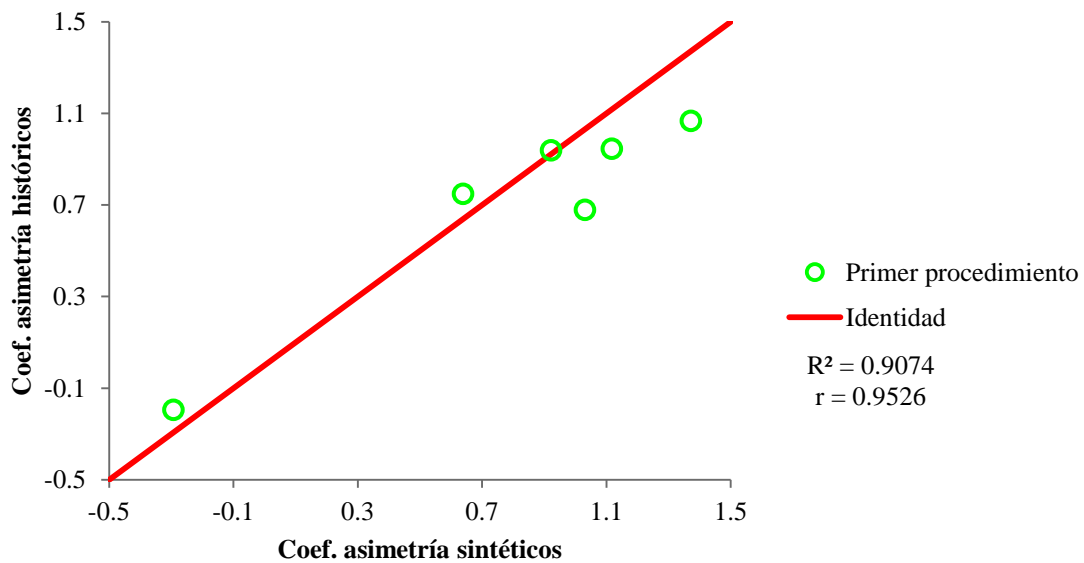


Figura 25. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

El análisis de la Figura 24 presenta que en las estaciones 2, 4 y 6, el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en las estaciones 1, 3 y 5 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 25 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que se acepta la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

	Var_i	Var_ε	C_{det}
Media	118.399	2.928	0.9753
Desv. estándar	33.844	4.646	0.8627
Coef. asimetría	0.211	0.042	0.8031

4.4.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Como ya fue expuesto, en primera instancia se verifica la pertinencia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 26 y la Figura 27 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

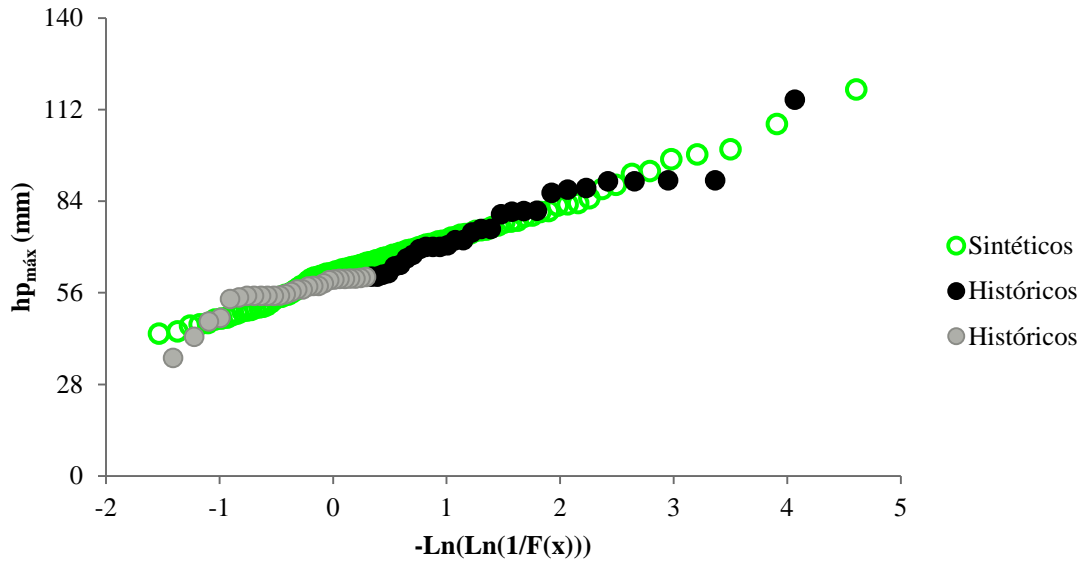


Figura 26. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

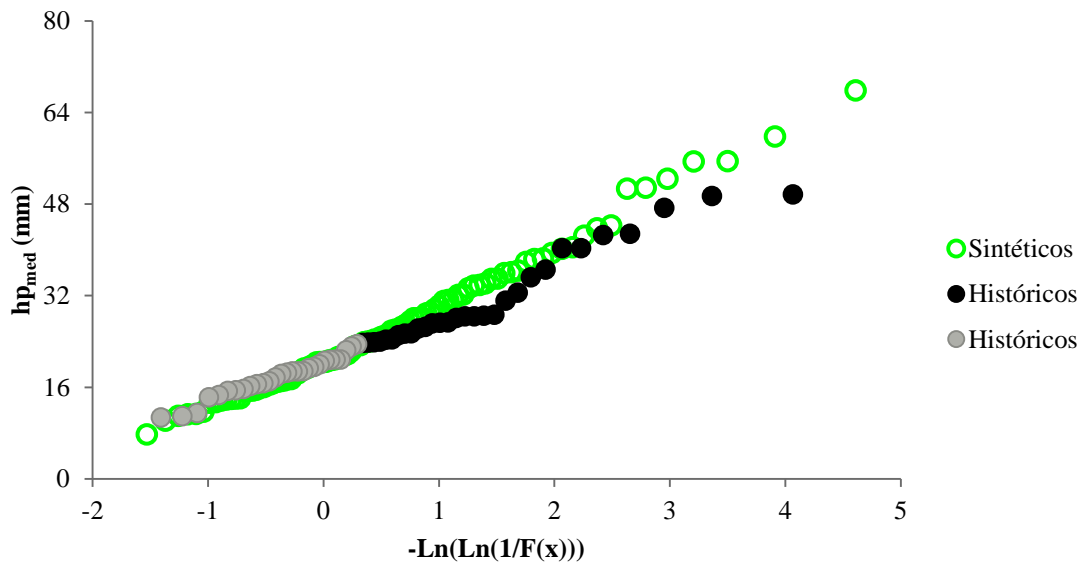


Figura 27. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

En la Figura 26 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones máximas puntuales se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones medias Figura 27, los valores correspondientes a las tormentas generadas resultan mayores que los de las históricas en una zona de la figura.

Como fue expuesto anteriormente, para identificar las causas que motivan la diferencia encontrada entre las precipitaciones medias sintéticas y las históricas, se construyen la Figura 28 y la Figura 29, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias, para las tormentas históricas y para las sintéticas respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos.

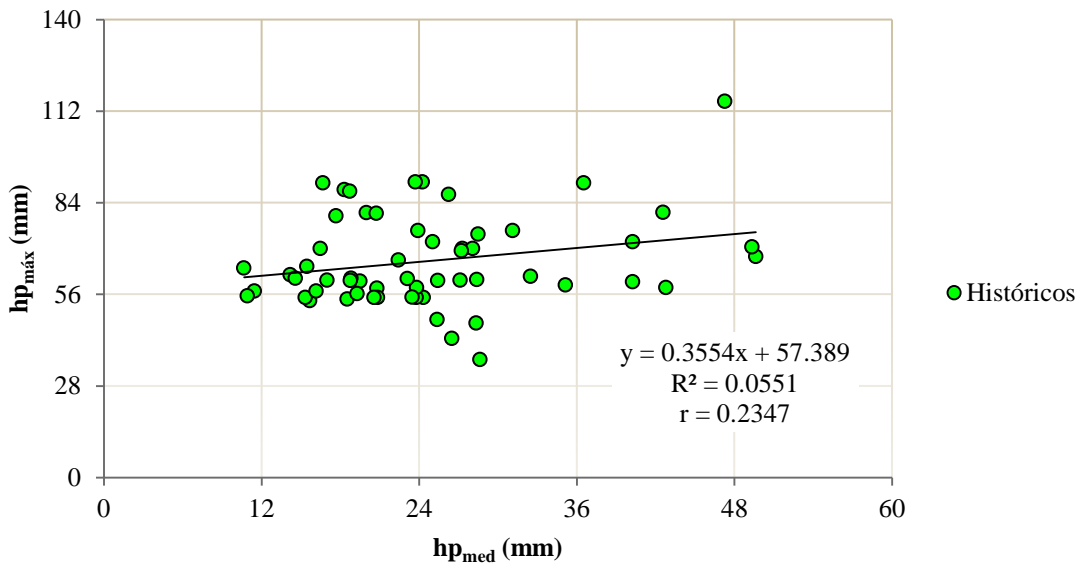


Figura 28. Relación entre la precipitación media y precipitación máxima de 58 datos históricos

Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

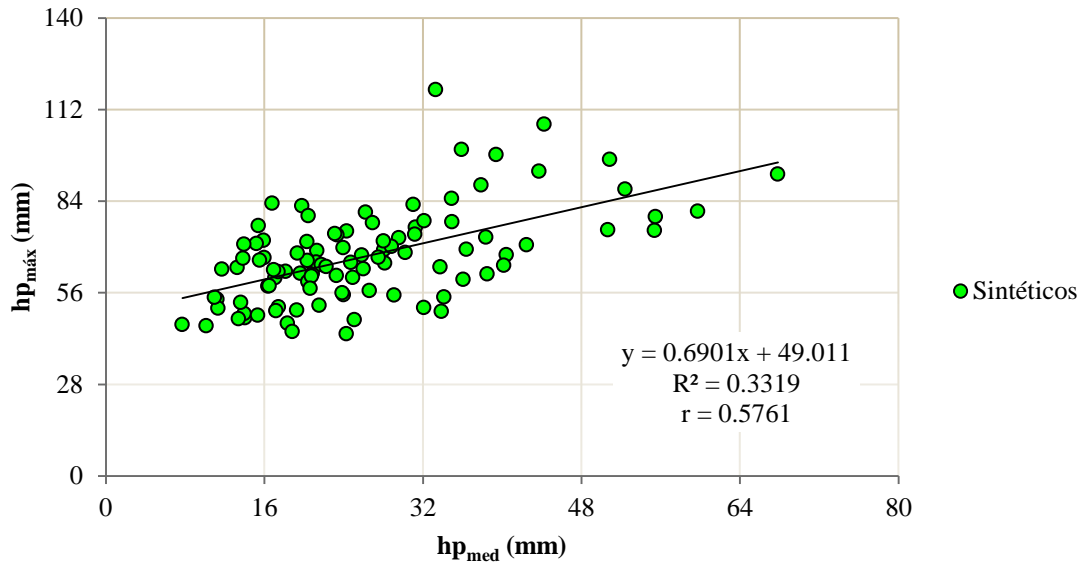


Figura 29. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm*

De nueva cuenta, el análisis muestra que la correlación muy pequeña que se observa en la Figura 28 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo.

Al relacionar la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, se obtiene la Figura 30 que muestra una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas.

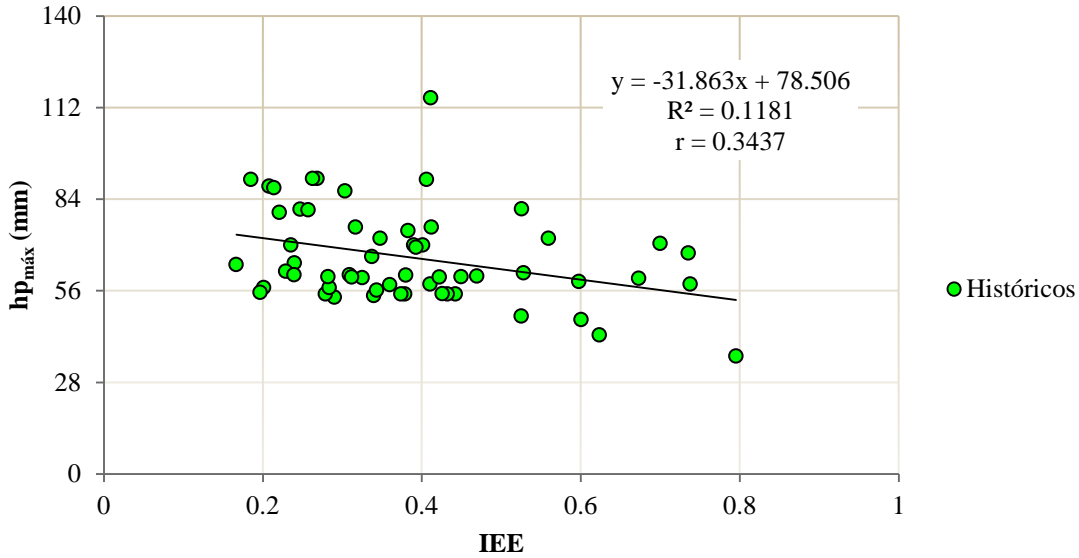


Figura 30. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos históricos.

Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

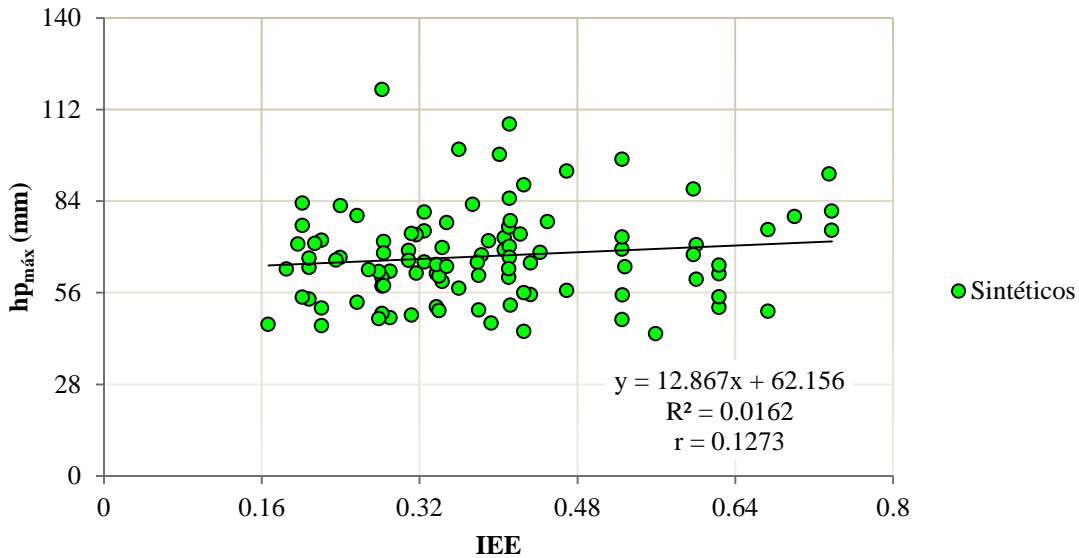


Figura 31. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

De nueva cuenta, una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

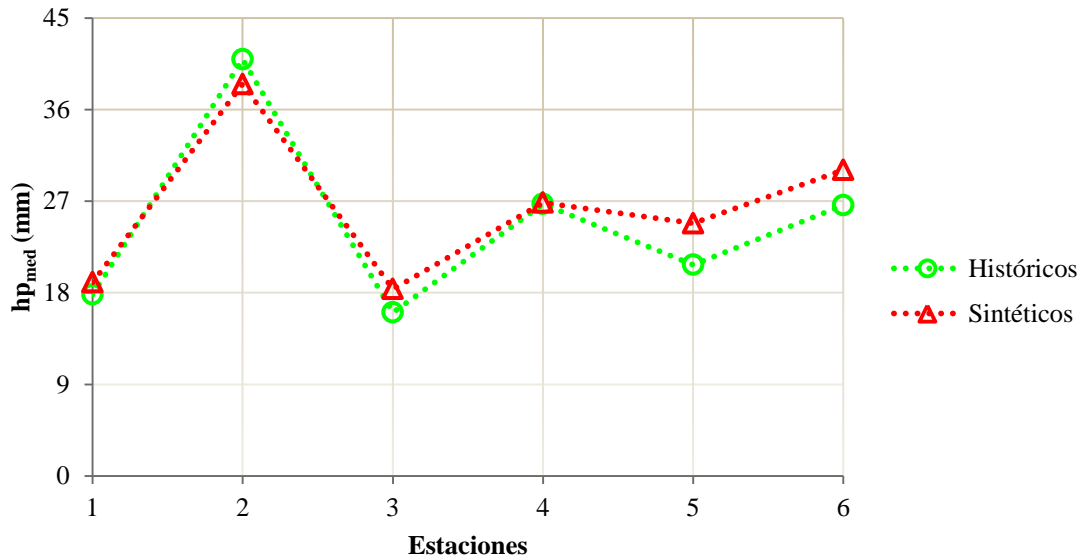


Figura 32. Comportamiento de la media para cada estación.

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

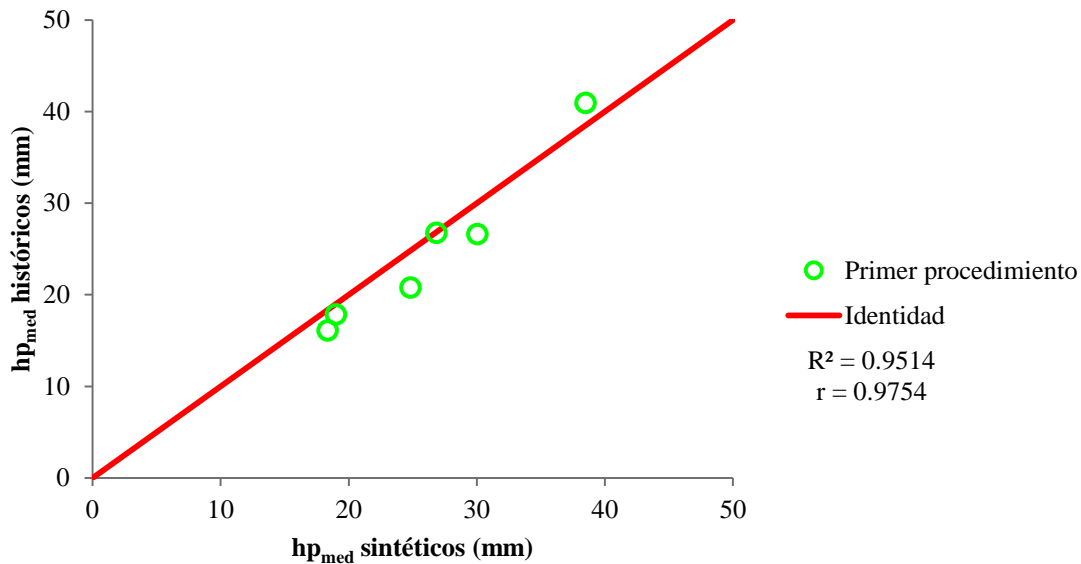


Figura 33. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

En la Figura 32 se exhibe la representación lograda de los valores medios estación por estación entre los históricos y los sintéticos, adicionalmente presenta que sólo en una estación, el valor medio de los datos generados sintéticamente es menor al valor medio de los históricos empleados, finalmente la representación de este parámetro estadístico se considera adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 33, la cual presenta una función identidad y es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados y se debe agregar que este grupo de umbrales no mejora con respecto al grupo de umbrales anterior.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría.

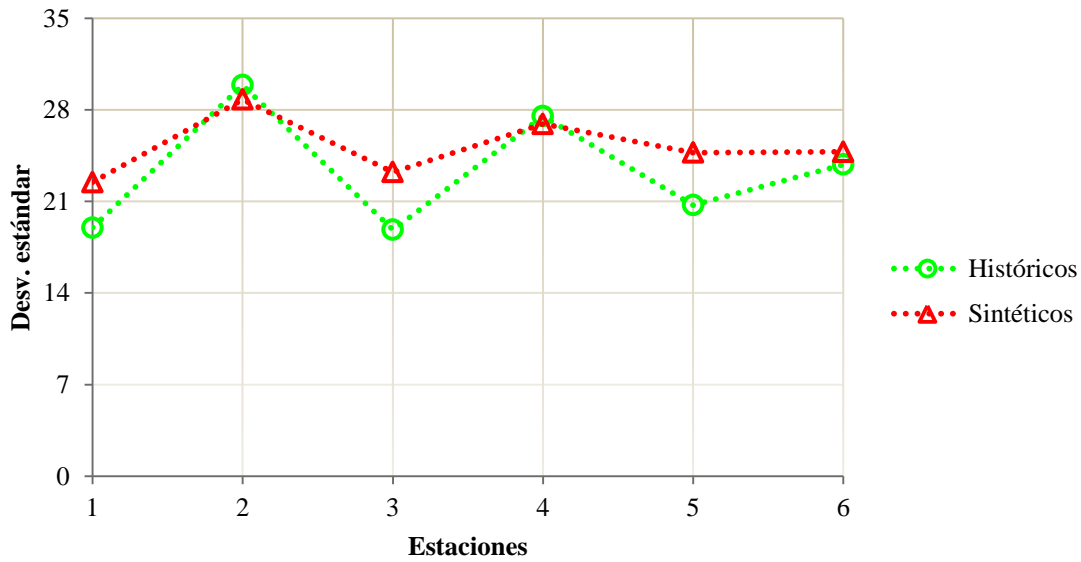


Figura 34. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

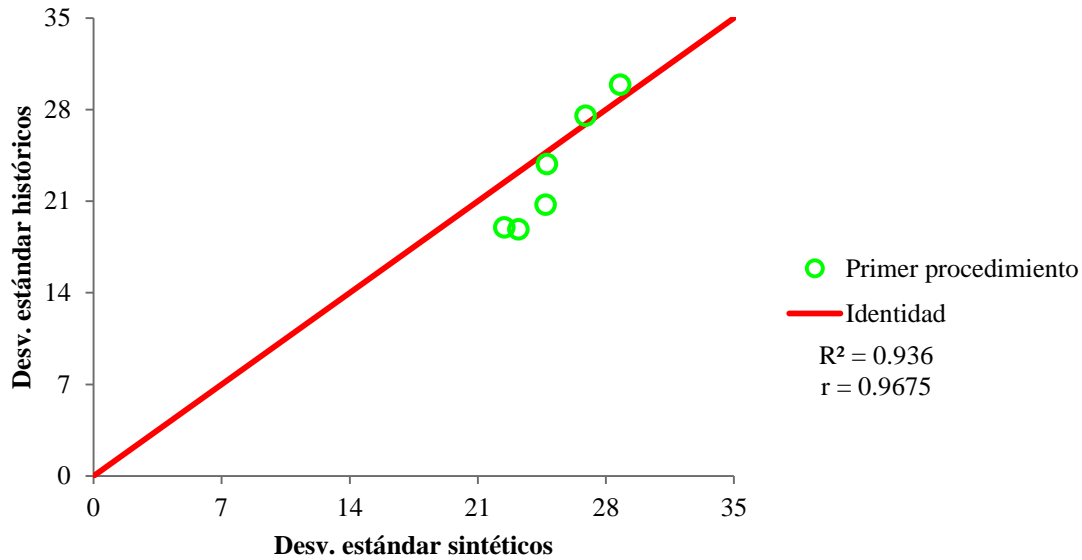


Figura 35. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

El análisis de la Figura 34 presenta que en las estaciones 2 y 4, el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en las estaciones 1, 3, 5 y 6 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 35 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que se acepta la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

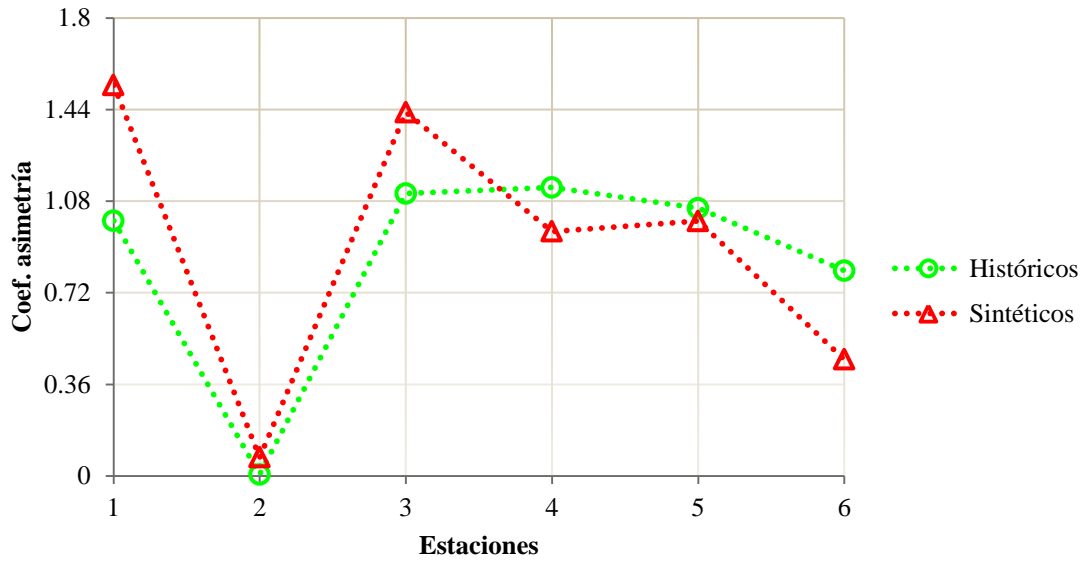


Figura 36. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm*

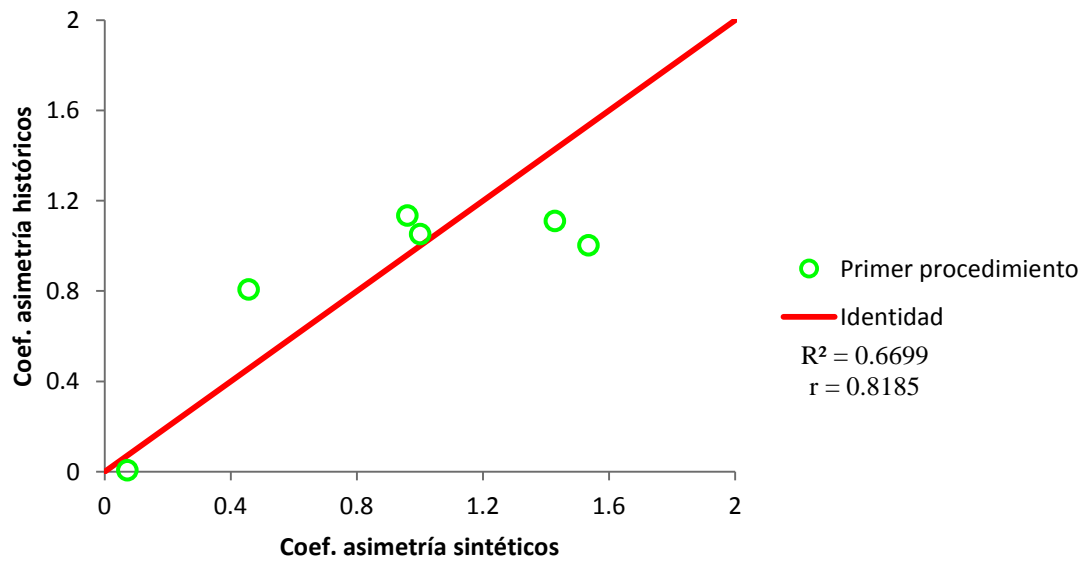


Figura 37. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm*

El análisis de la Figura 36 presenta que en las estaciones 4, 5 y 6, el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en las estaciones 1, 2 y 3 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 37 presenta, como los puntos no son cercanos a la función identidad, por lo que se no se acepta del todo la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

	Var_i	Var_ε	C_{det}
Media	81.678	5.690	0.9303
Desv. estándar	21.351	5.879	0.7247
Coef. asimetría	0.185	0.105	0.4330

4.4.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Como suceso iterativo, en primera instancia se verifica la eficacia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 38 y la Figura 39 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

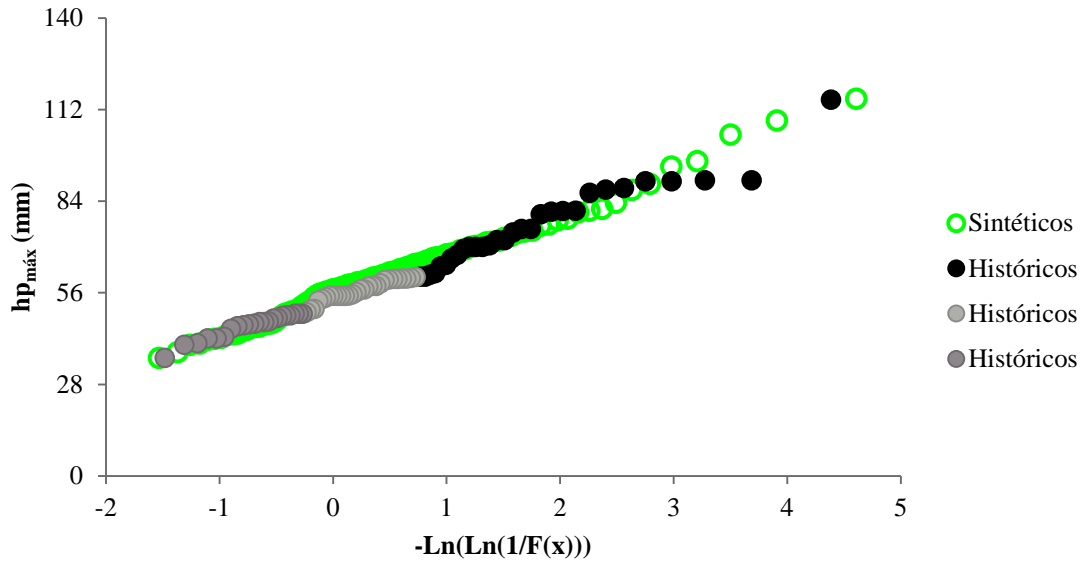


Figura 38. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

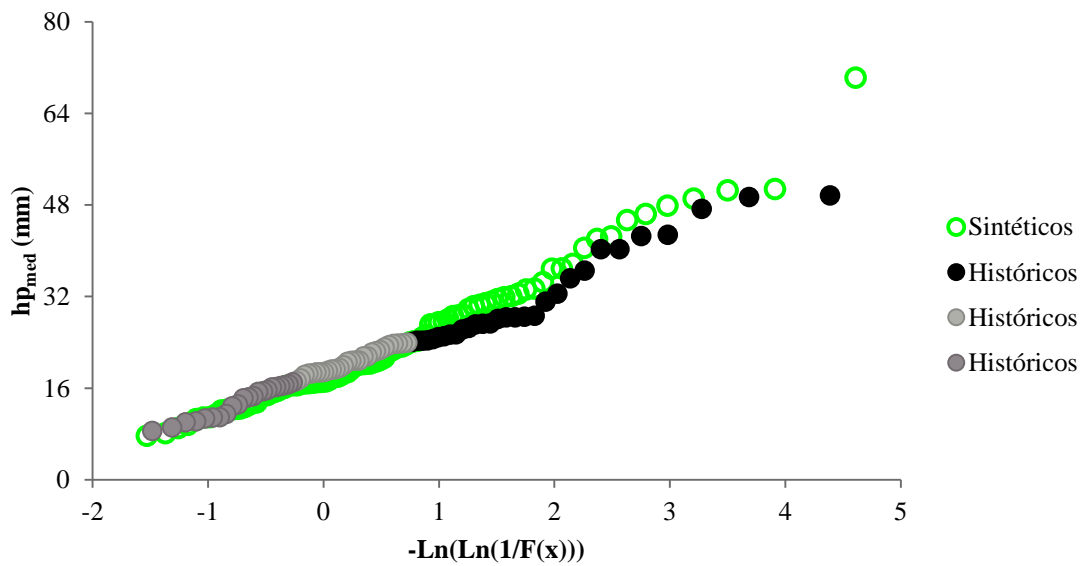


Figura 39. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

En la Figura 38 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones máximas puntuales se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones

medias Figura 39, los valores correspondientes a las tormentas generadas resultan mayores que los de las históricas en una zona de la figura.

Como suceso iterativo, para identificar las causas que motivan las diferencias encontradas entre las precipitaciones medias sintéticas y las históricas, se construyen la Figura 40 y la Figura 41, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias, para las tormentas históricas y para las sintéticas respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos.

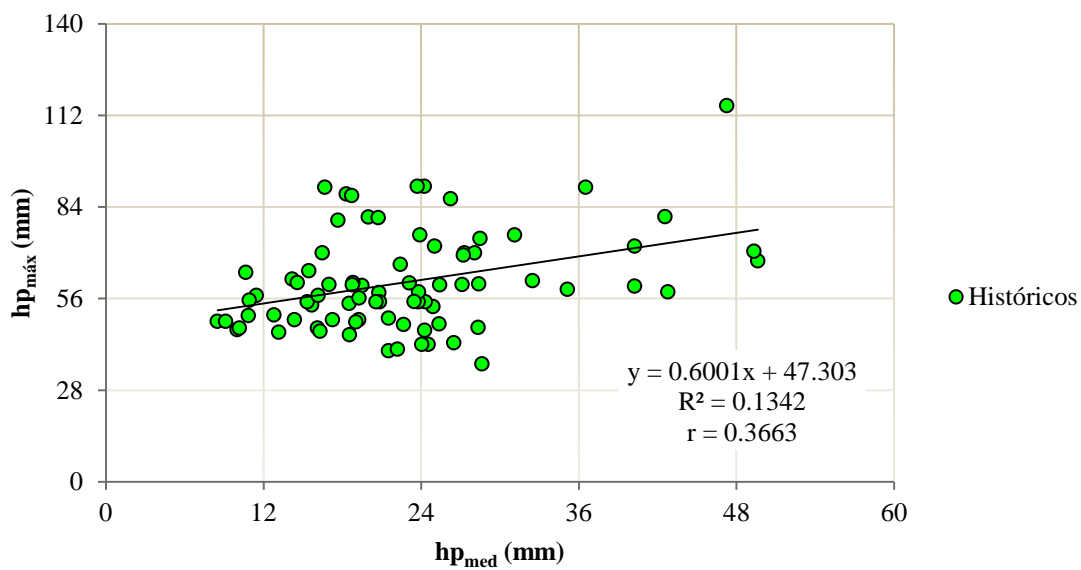


Figura 40. Relación entre la precipitación media y precipitación máxima de 80 datos históricos

Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

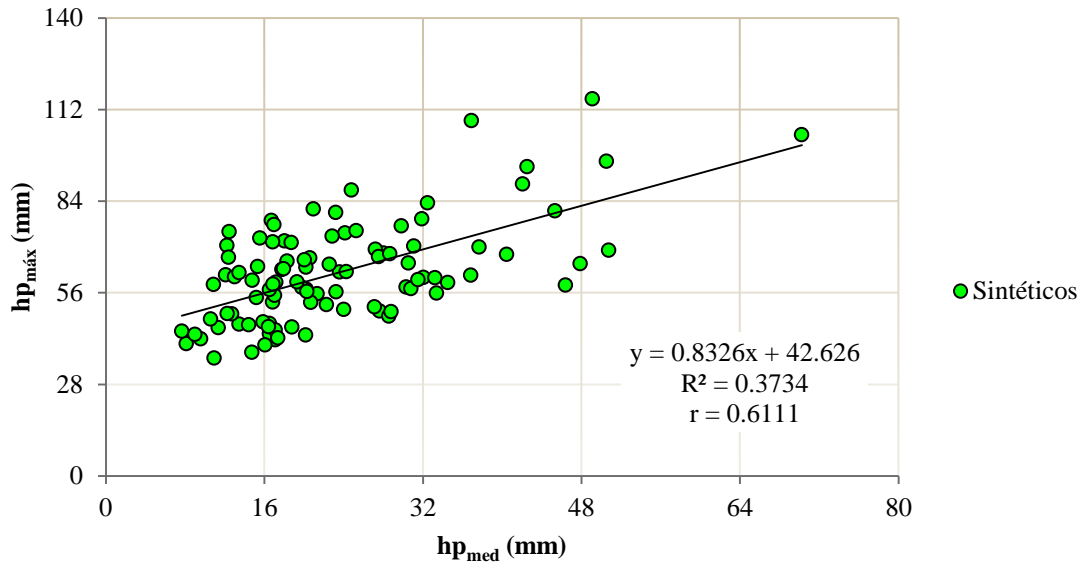


Figura 41. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Como suceso iterativo, el análisis muestra que la correlación tan pequeña que se observa en la Figura 40 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo.

Al relacionar la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, se obtiene la Figura 42 que muestra una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas.

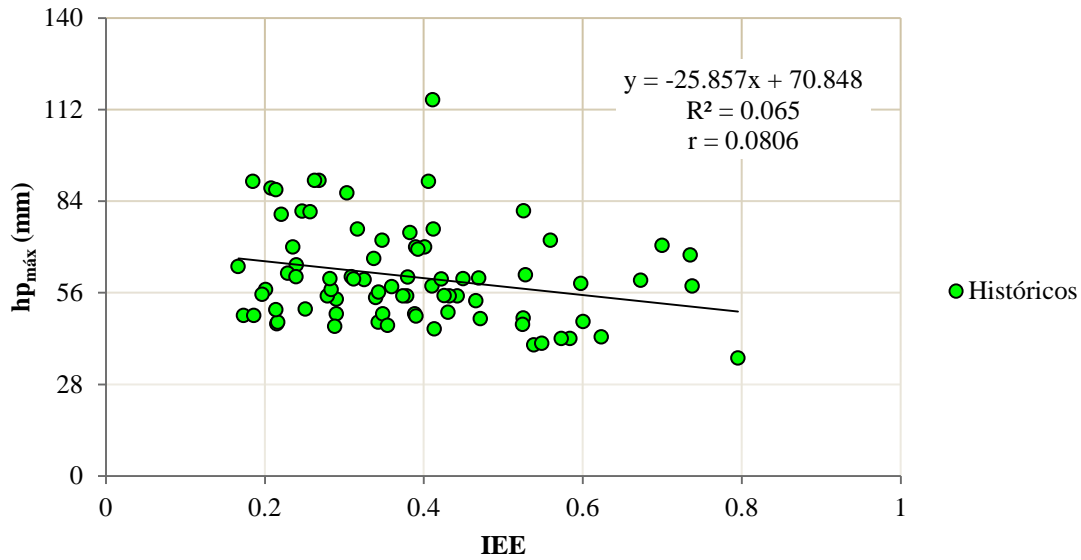


Figura 42. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos históricos.

Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

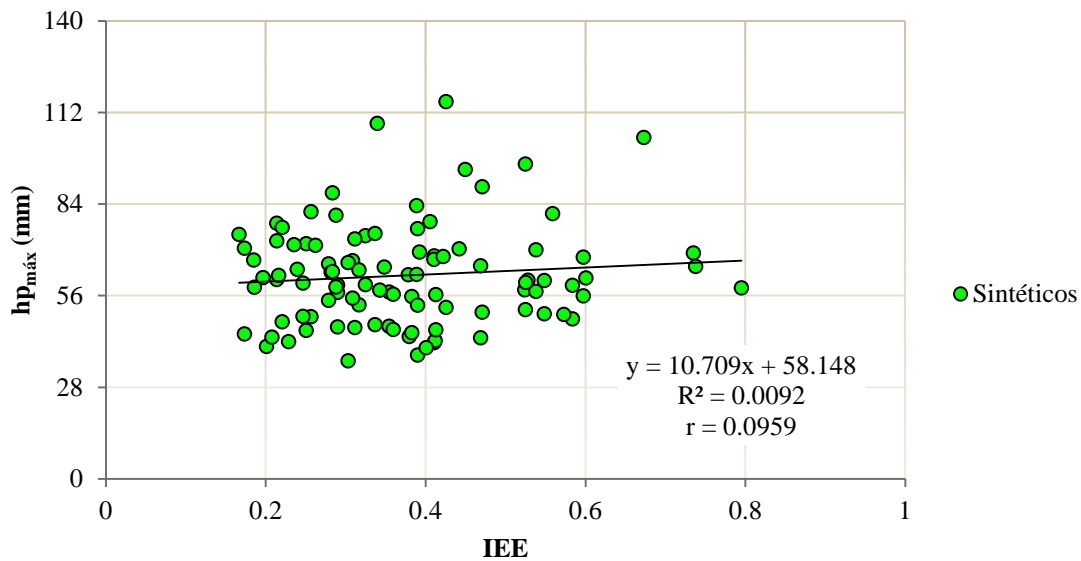


Figura 43. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos.

Primer procedimiento de generación, umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen

representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

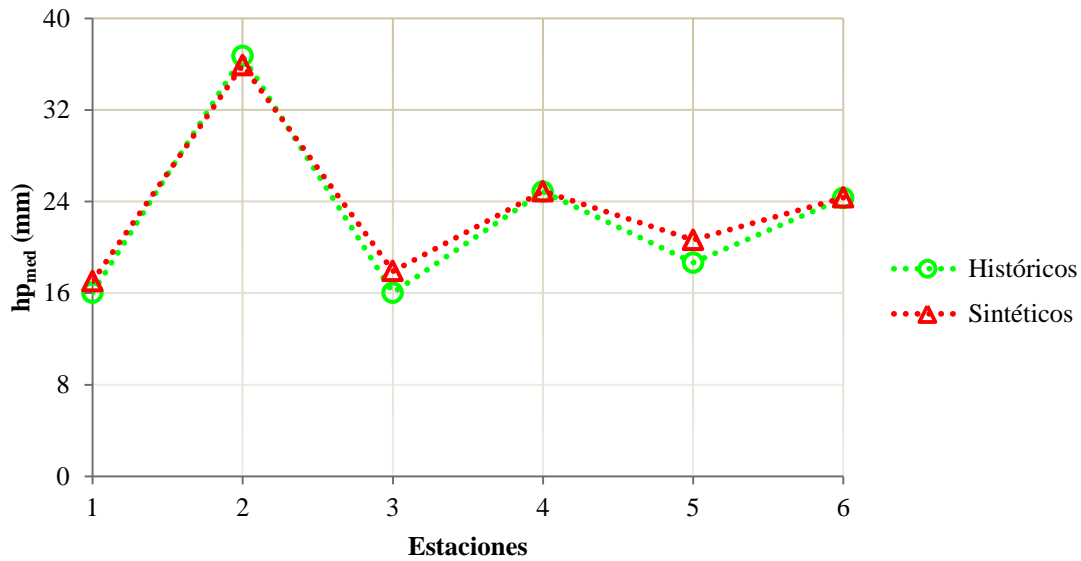


Figura 44. Comportamiento de la media para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

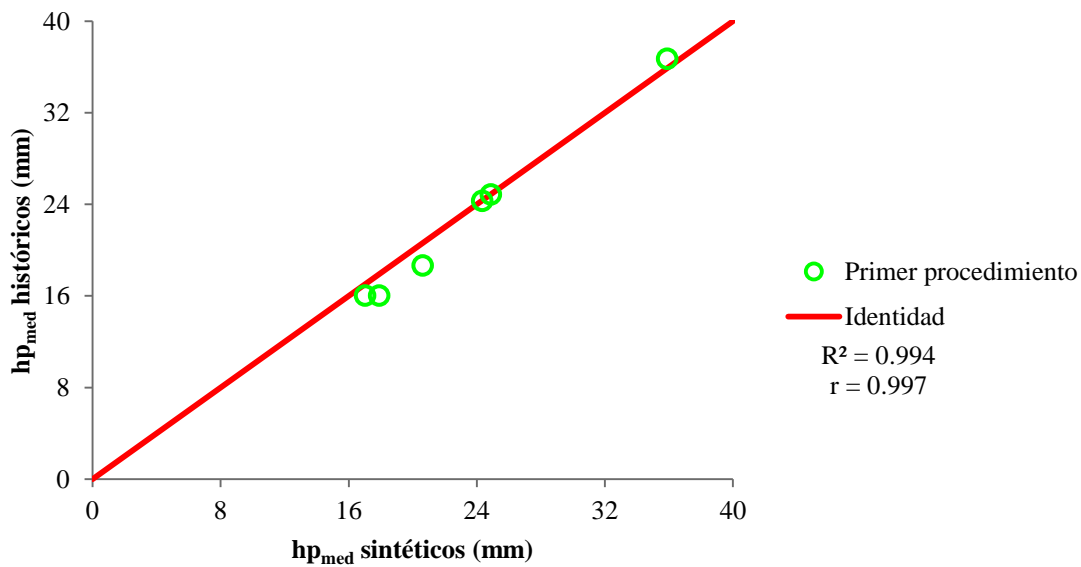


Figura 45. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Repitiendo, en la Figura 44 se exhibe la representación lograda de los valores medios estación por estación entre los históricos y los sintéticos, adicionalmente presenta que en las estaciones 1, 3 y 5, el valor medio de los datos generados sintéticamente es mayor al valor medio de los históricos empleados, sólo en la estación 2 es menor, y en las estaciones 4 y 6 son iguales, con esto finalmente se considera la representación de este parámetro estadístico adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 45, la cual presenta una función identidad y es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados y se debe agregar que este grupo de umbrales mejora con respecto al grupo de umbrales anterior.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría.

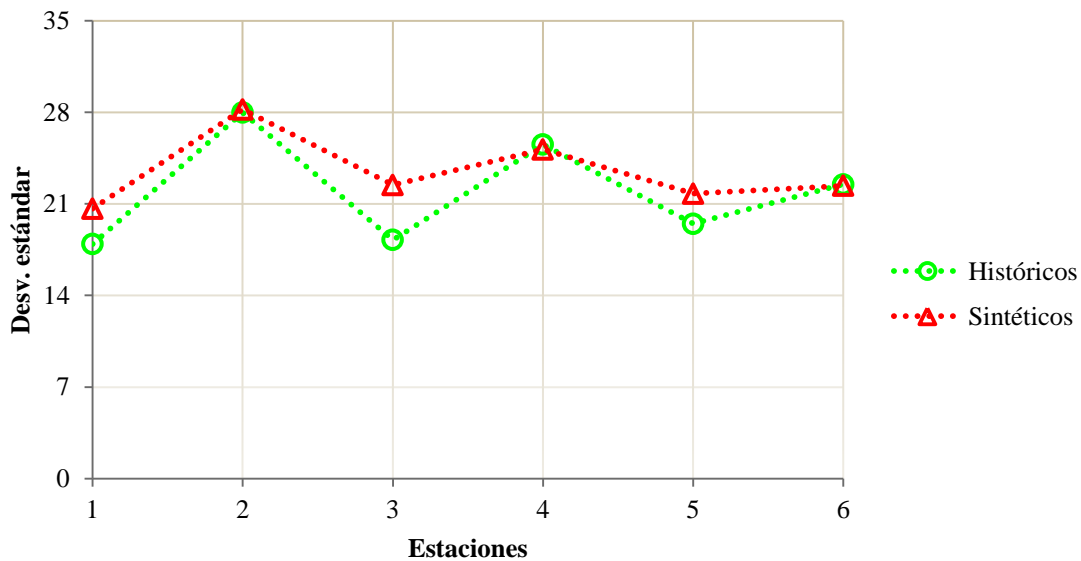


Figura 46. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

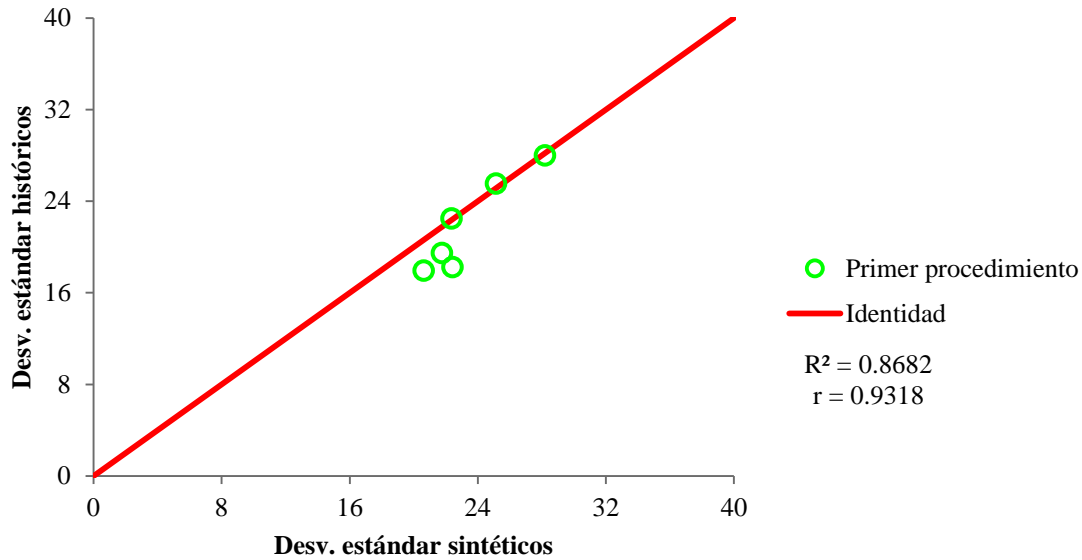


Figura 47. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Repitiendo los análisis, la Figura 46 presenta que en las estaciones 2, 4 y 6 el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en las estaciones 1, 3 y 5 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 47 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que se acepta la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

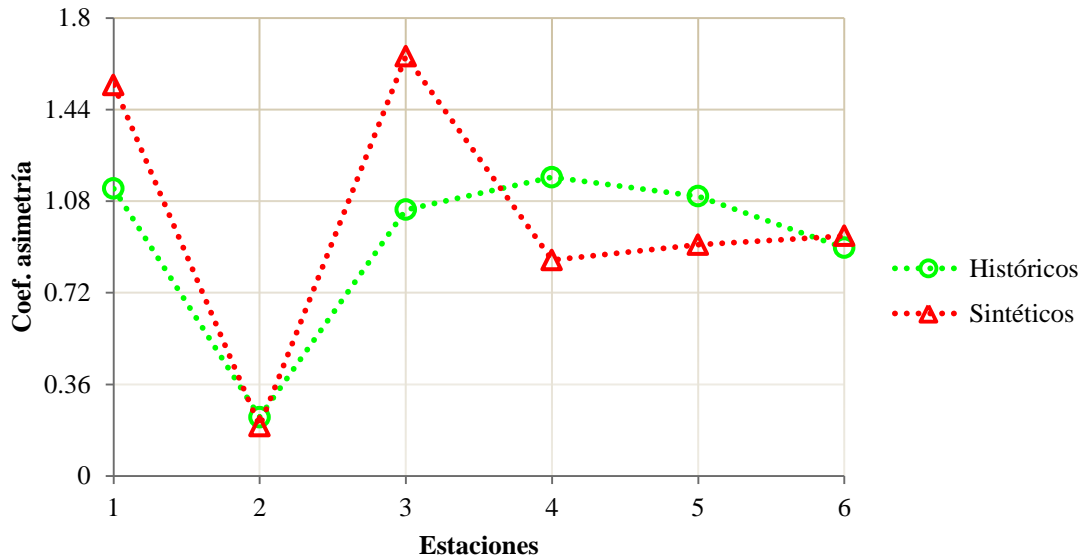


Figura 48. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm*

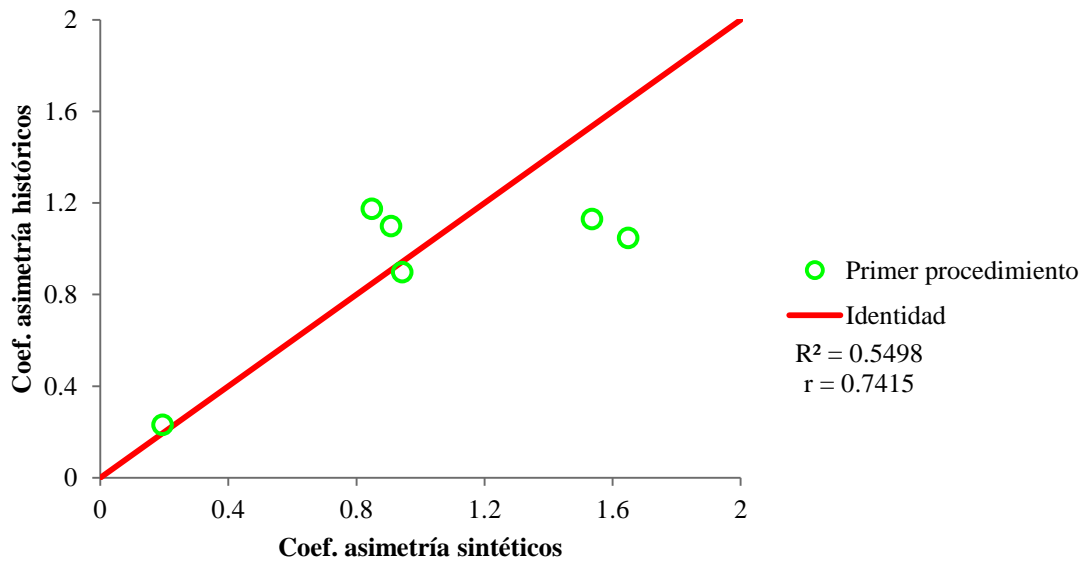


Figura 49. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Primer procedimiento de generación, *umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm*

Repitiendo los análisis, la Figura 48 presenta que en las estaciones 2, 4 y 5, el parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador, está por debajo de los históricos y en

las estaciones 1, 3 y 6 está por encima de los históricos, pero se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 49 presenta, como más de la mitad de los puntos no son cercanos a la función identidad, no se acepta del todo la representación de este estadístico con los valores generados con el modelo.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

	Var_i	Var_e	C_{det}
Media	61.763	1.249	0.9798
Desv. estándar	17.127	3.427	0.7999
Coef. asimetría	0.126	0.126	-0.0010

4.5. Segundo procedimiento de generación de tormentas sintéticas

Con la finalidad lograr mejores resultados se propone un segundo procedimiento de generación en el que las tormentas históricas se clasificaron en 2 grupos prácticamente del mismo tamaño.

4.5.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Las tormentas históricas se ordenaron de mayor a menor de acuerdo con su precipitación máxima, y se dividieron en dos grupos, las primeras 14 formaron el grupo de tormentas grandes mayores a 75 mm y las 16 restantes formaron el grupo de tormentas pequeñas menores a 75 mm.

En el primero grupo se consideraron las 14 tormentas con mayor valor máximo y en el segundo grupo las restantes 16 tormentas. Al relacionar estos dos grupos por separado con los valores correspondientes del índice de extensión espacial se obtiene la Figura 50 y la Figura 51, que muestran una menor correlación entre la precipitación máxima y el índice de extensión espacial, particularmente para el grupo de las tormentas con mayor precipitación máxima.

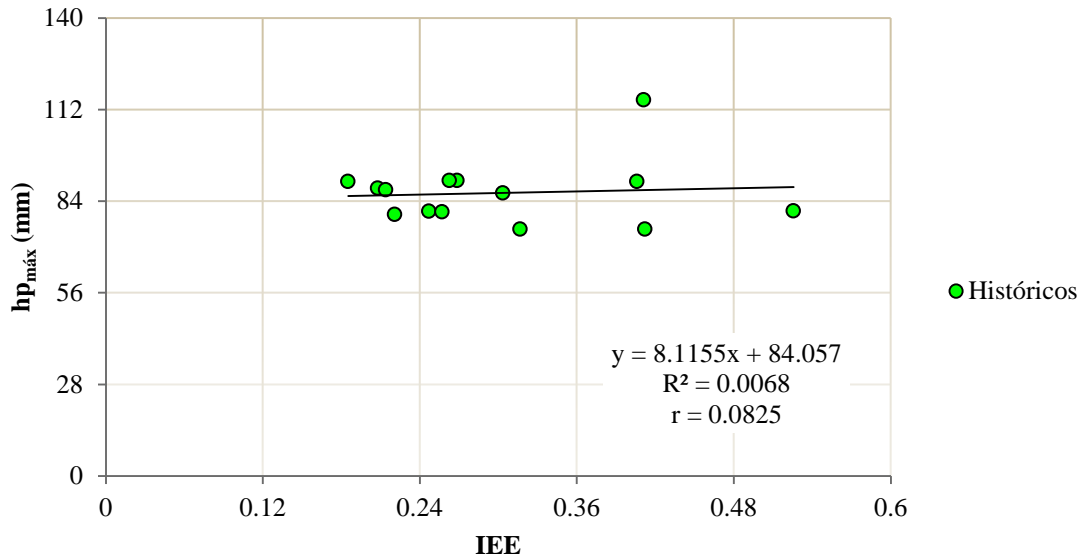


Figura 50. Relación entre el IEE y precipitación máxima primer grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

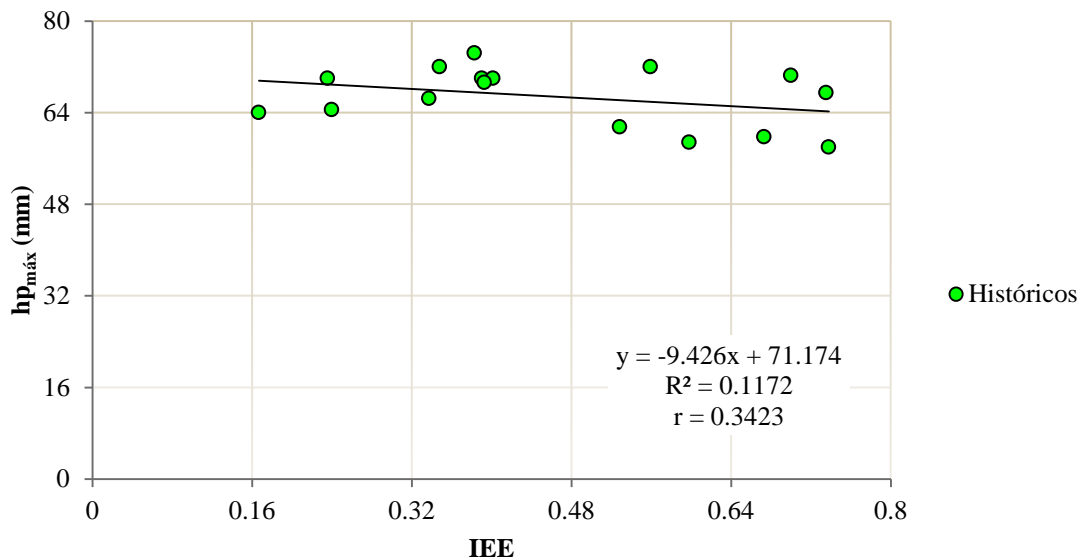


Figura 51. Relación entre el IEE y precipitación máxima segundo grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

El procedimiento de generación de las tormentas sintéticas se modifica entonces, de tal manera que si el valor máximo generado, $PSMÁX_k$ obtenido en el paso 4 de la metodología es mayor o igual que el umbral correspondiente a las 14 primeras tormentas de los máximos históricos, se selecciona aleatoriamente una de las tormentas del primer grupo (tormentas

con valor máximo grande) y en caso contrario, se selecciona una tormenta del segundo grupo (tormentas cuyo valor máximo es chico).

Se generaron 100 números aleatorios con distribución uniforme [0,1] que se tomaron como el valor de la probabilidad de no excedencia de la función de distribución Gumbel de ajuste de los datos históricos Ecuación 5 y con ella se generaron 100 datos de la precipitación máxima sintética $PSMÁX_k$; $k = 1,2,\dots, 100$.

Para la selección de las tormentas que deberían escalarse, se consideró que si la precipitación máxima sintética $PSMÁX_k$ era mayor o igual que la el umbral correspondiente a las 14 primeras tormentas de los máximos históricos, se seleccionaba aleatoriamente una tormenta del grupo de las tormentas grandes y en caso contrario, del grupo de las tormentas chicas. Al igual que en el primer procedimiento de generación la tormenta seleccionada se escaló multiplicando el valor medido en cada estación por la relación entre el valor máximo generado y el valor máximo correspondiente a la tormenta histórica seleccionada Ecuación 1.

U_k	$F(p_m)$	Tormenta histórica seleccionada
0.475	73.252	29
0.172	64.849	22
0.382	70.732	16
0.471	73.141	15
0.339	69.597	24
0.087	61.634	22
0.347	69.812	21
0.018	56.856	27
0.937	97.048	10
0.001	51.716	22
0.578	76.233	4
0.300	68.561	30
0.535	74.953	27
0.916	94.084	7
0.809	85.504	3
0.848	87.932	11
0.133	63.530	28
0.830	86.784	6
0.040	58.943	15
0.129	63.382	30
0.997	127.443	8
0.745	82.295	6

0.005	54.166	20
0.411	71.516	17
0.595	76.773	9
0.659	78.916	6
0.236	66.785	18
0.958	101.205	14
0.193	65.521	26
0.574	76.109	6
0.467	73.030	16
0.240	66.900	17
0.792	84.555	12
0.488	73.621	20
0.432	72.088	21
0.788	84.344	13
0.390	70.947	29
0.403	71.300	20
0.663	79.061	5
0.069	60.783	16
0.253	67.276	24
0.318	69.027	20
0.894	91.766	3
0.617	77.460	13
0.852	88.217	10
0.232	66.669	20
0.125	63.231	16
0.898	92.168	2
0.450	72.557	27
0.147	64.001	20
0.091	61.818	20
0.446	72.447	28
0.048	59.520	28
0.061	60.339	19
0.322	69.135	18
0.727	81.545	1
0.912	93.605	8
0.976	106.553	5
0.553	75.464	2
0.275	67.869	28
0.510	74.222	24
0.890	91.377	4
0.783	84.135	1
0.557	75.584	1
0.108	62.556	26

0.805	85.276	4
0.749	82.476	5
0.104	62.390	28
0.706	80.671	12
0.454	72.667	25
0.980	108.355	3
0.386	70.839	15
0.304	68.670	29
0.368	70.380	25
0.211	66.044	16
0.933	96.419	12
0.168	64.718	24
0.283	68.091	25
0.176	64.979	20
0.215	66.164	30
0.766	83.280	10
0.197	65.644	24
0.407	71.408	19
0.762	83.088	11
0.364	70.272	27
0.112	62.719	24
0.638	78.173	3
0.044	59.241	30
0.962	102.225	12
0.027	57.788	24
0.869	89.524	1
0.326	69.243	17
0.826	86.531	8
0.941	97.717	9
0.834	87.042	5
0.873	89.852	13
0.424	71.871	24
0.856	88.509	9
0.065	60.565	18
0.155	64.278	16

Fecha	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	Est6
30/05/2006	6.2	65.5	73.3	49.2	50.5	18.1
19/07/2006	9.4	10.8	0.0	64.8	56.6	11.2
29/08/2003	10.8	70.7	23.8	18.7	9.8	13.8
11/09/2006	19.7	73.1	11.3	40.3	19.7	3.9
25/08/2006	0.0	0.0	16.7	69.6	41.9	12.6
19/07/2006	8.9	10.2	0.0	61.6	53.8	10.7
05/07/2003	0.0	69.8	1.7	0.7	10.0	16.5
16/09/2003	33.7	28.7	8.4	22.2	30.3	56.9
26/07/2003	0.0	97.0	0.0	0.0	12.6	34.2
19/07/2006	7.5	8.6	0.0	51.7	45.1	9.0
28/06/2003	0.0	76.2	0.0	0.0	8.5	0.0
29/05/1986	68.6	35.5	45.6	42.8	50.8	60.3
16/09/2003	44.5	37.8	11.1	29.3	40.0	75.0
01/06/2006	0.0	2.5	2.2	94.1	22.0	0.0
19/08/2003	4.7	85.5	0.0	2.8	9.5	32.2
04/09/2003	20.4	87.9	0.0	0.0	27.2	0.0
07/06/2006	49.9	63.5	18.4	46.1	42.5	36.1
13/05/2006	0.0	21.5	0.0	0.0	0.0	86.8
11/09/2006	15.8	58.9	9.1	32.5	15.8	3.2
29/05/1986	63.4	32.8	42.2	39.6	47.0	55.7
28/08/1986	0.0	67.8	14.0	127.4	18.4	4.4
13/05/2006	0.0	20.4	0.0	0.0	0.0	82.3
17/06/1991	32.5	3.9	1.5	5.8	54.2	32.5
06/10/2003	53.6	71.5	39.4	15.9	41.0	18.5
25/06/2003	20.1	36.0	20.7	18.0	76.8	70.6
13/05/2006	0.0	19.5	0.0	0.0	0.0	78.9
05/10/2003	57.8	39.8	54.6	61.6	0.0	66.8
28/05/2006	9.4	101.2	62.3	5.4	14.1	0.0
06/06/1986	0.0	65.5	0.0	0.0	0.0	0.0
13/05/2006	0.0	18.9	0.0	0.0	0.0	76.1
29/08/2003	11.2	73.0	24.5	19.3	10.1	14.2
06/10/2003	50.2	66.9	36.9	14.9	38.4	17.3
27/09/1986	4.7	0.0	0.5	1.1	21.2	84.6
17/06/1991	44.2	5.3	2.1	7.9	73.6	44.2
05/07/2003	0.0	72.1	1.8	0.7	10.3	17.0
18/06/2003	44.7	29.0	19.4	19.3	11.7	84.3
30/05/2006	6.0	63.5	70.9	47.7	48.9	17.5
17/06/1991	42.8	5.1	2.0	7.6	71.3	42.8
06/07/2003	42.5	79.1	12.2	8.3	17.1	33.4
29/08/2003	9.3	60.8	20.4	16.0	8.4	11.8

25/08/2006	0.0	0.0	16.2	67.3	40.5	12.1
17/06/1991	41.4	4.9	2.0	7.4	69.0	41.4
19/08/2003	5.1	91.8	0.0	3.0	10.2	34.6
18/06/2003	41.0	26.7	17.9	17.7	10.8	77.5
26/07/2003	0.0	88.2	0.0	0.0	11.4	31.1
17/06/1991	40.0	4.8	1.9	7.1	66.7	40.0
29/08/2003	9.7	63.2	21.3	16.7	8.8	12.3
07/08/2003	0.2	92.2	1.5	8.7	20.4	25.5
16/09/2003	43.1	36.6	10.7	28.3	38.7	72.6
17/06/1991	38.4	4.6	1.8	6.9	64.0	38.4
17/06/1991	37.1	4.4	1.8	6.6	61.8	37.1
07/06/2006	56.9	72.4	21.0	52.6	48.5	41.2
07/06/2006	46.8	59.5	17.2	43.2	39.8	33.8
08/06/1991	31.0	0.0	15.3	60.3	3.4	31.0
05/10/2003	59.8	41.2	56.5	63.7	0.0	69.1
30/08/2003	5.9	64.0	21.4	81.5	28.4	0.0
28/08/1986	0.0	49.8	10.3	93.6	13.5	3.2
06/07/2003	57.3	106.6	16.5	11.1	23.1	45.0
07/08/2003	0.2	75.5	1.3	7.1	16.7	20.9
07/06/2006	53.3	67.9	19.6	49.3	45.4	38.6
25/08/2006	0.0	0.0	17.9	74.2	44.6	13.4
28/06/2003	0.0	91.4	0.0	0.0	10.2	0.0
30/08/2003	6.1	66.0	22.1	84.1	29.3	0.0
30/08/2003	5.5	59.3	19.8	75.6	26.3	0.0
06/06/1986	0.0	62.6	0.0	0.0	0.0	0.0
28/06/2003	0.0	85.3	0.0	0.0	9.5	0.0
06/07/2003	44.4	82.5	12.7	8.6	17.9	34.8
07/06/2006	49.0	62.4	18.0	45.3	41.7	35.5
27/09/1986	4.4	0.0	0.5	1.0	20.3	80.7
06/06/2003	72.7	6.4	23.9	1.6	0.0	0.0
19/08/2003	6.0	108.4	0.0	3.6	12.0	40.8
11/09/2006	19.0	70.8	10.9	39.0	19.0	3.8
30/05/2006	5.8	61.4	68.7	46.1	47.3	16.9
06/06/2003	70.4	6.2	23.1	1.5	0.0	0.0
29/08/2003	10.1	66.0	22.2	17.4	9.2	12.8
27/09/1986	5.3	0.0	0.6	1.2	24.2	96.4
25/08/2006	0.0	0.0	15.6	64.7	38.9	11.7
06/06/2003	68.1	6.0	22.4	1.5	0.0	0.0
17/06/1991	39.0	4.6	1.9	7.0	65.0	39.0
29/05/1986	66.2	34.2	44.0	41.3	49.1	58.2
26/07/2003	0.0	83.3	0.0	0.0	10.8	29.3
25/08/2006	0.0	0.0	15.8	65.6	39.5	11.8
08/06/1991	36.7	0.0	18.2	71.4	4.1	36.7

04/09/2003	19.3	83.1	0.0	0.0	25.7	0.0
16/09/2003	41.7	35.4	10.4	27.4	37.5	70.3
25/08/2006	0.0	0.0	15.1	62.7	37.7	11.3
19/08/2003	4.3	78.2	0.0	2.6	8.7	29.4
29/05/1986	59.2	30.6	39.4	37.0	43.9	52.1
27/09/1986	5.6	0.0	0.6	1.3	25.7	102.2
25/08/2006	0.0	0.0	13.9	57.8	34.8	10.4
30/08/2003	6.5	70.2	23.5	89.5	31.1	0.0
06/10/2003	51.9	69.2	38.2	15.4	39.7	17.9
28/08/1986	0.0	46.0	9.5	86.5	12.5	3.0
25/06/2003	25.6	45.8	26.3	22.9	97.7	89.9
06/07/2003	46.8	87.0	13.4	9.1	18.9	36.8
18/06/2003	47.6	30.9	20.7	20.6	12.5	89.9
25/08/2006	0.0	0.0	17.3	71.9	43.2	13.0
25/06/2003	23.2	41.5	23.8	20.8	88.5	81.4
05/10/2003	52.4	36.1	49.5	55.8	0.0	60.6
29/08/2003	9.8	64.3	21.6	17.0	8.9	12.5

En la Figura 52 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada con el segundo procedimiento, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 56.9 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 16/09/2003 en este caso la misma tormenta utilizada en el primer procedimiento, cuyo máximo registrado fue de 61.5 mm, este ejemplo de escalamiento presenta la mejora en la generación de tormentas con el segundo procedimiento del modelo generador.

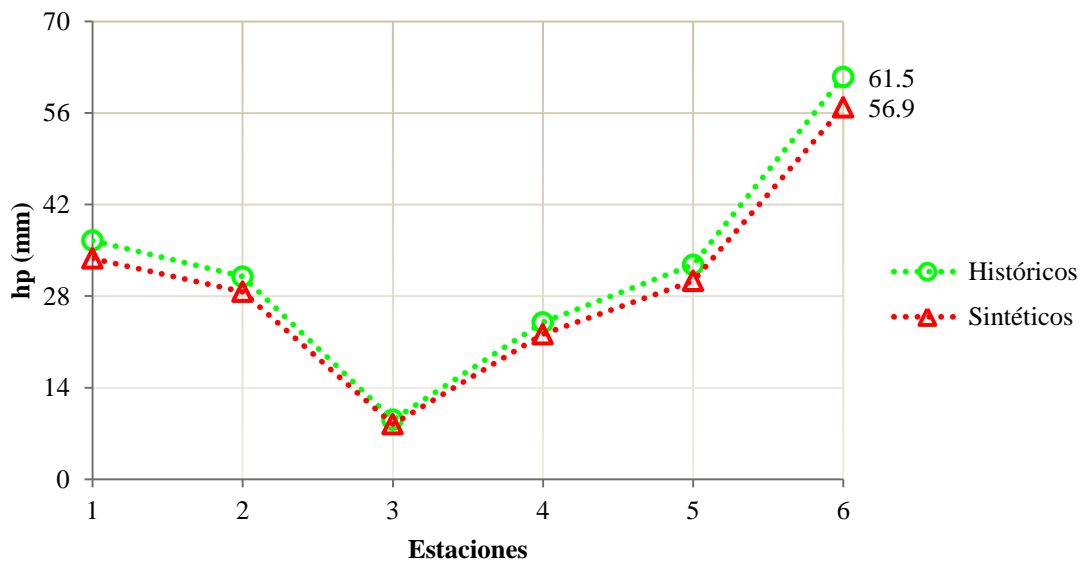


Figura 52. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

4.5.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Las tormentas históricas se ordenaron de mayor a menor de acuerdo con su precipitación máxima, y se dividieron en dos grupos, las primeras 30 formaron el grupo de tormentas grandes mayores a 70 mm y las 28 restantes formaron el grupo de tormentas pequeñas menores a 70 mm.

En el primero grupo se consideraron las 30 tormentas con mayor valor máximo y en el segundo grupo las restantes 28 tormentas. Al relacionar estos dos grupos por separado con los valores correspondientes del índice de extensión espacial se obtiene la Figura 53 y la Figura 54, que muestran una menor correlación entre la precipitación máxima y el índice de extensión espacial, particularmente para el grupo de las tormentas con mayor precipitación máxima.

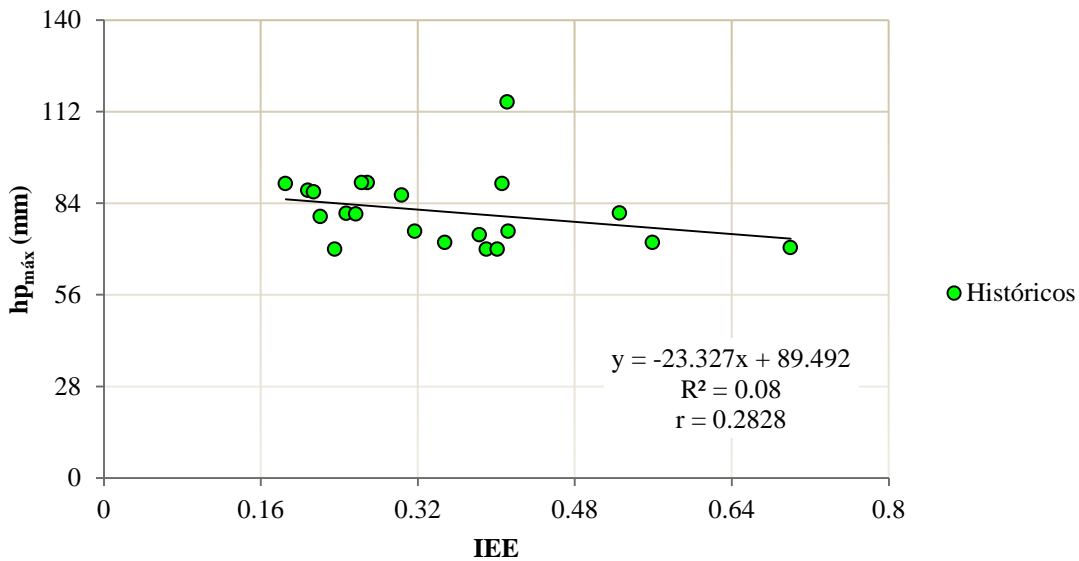


Figura 53. Relación entre el IEE y precipitación máxima primer grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

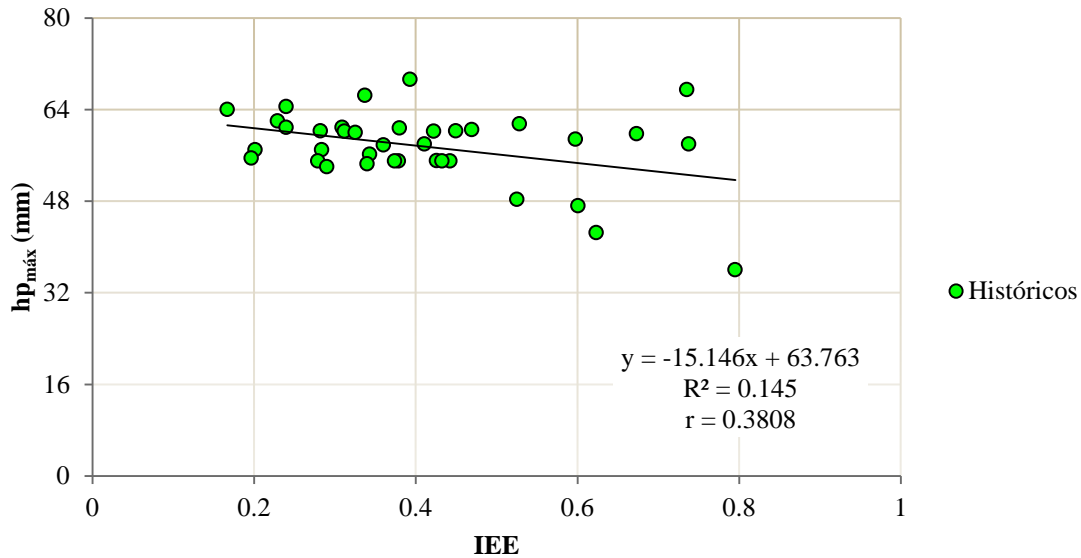


Figura 54. Relación entre el IEE y precipitación máxima segundo grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

El procedimiento de generación de las tormentas sintéticas se modifica entonces, de tal manera que si el valor máximo generado, $PSMÁX_k$ obtenido en el paso 4 de la metodología es mayor o igual que el umbral correspondiente a las 30 primeras tormentas de los máximos históricos, se selecciona aleatoriamente una de las tormentas del primer grupo (tormentas con valor máximo grande) y en caso contrario, se selecciona una tormenta del segundo grupo (tormentas cuyo valor máximo es chico).

Se generaron 100 números aleatorios con distribución uniforme [0,1] que se tomaron como el valor de la probabilidad de no excedencia de la función de distribución Gumbel de ajuste de los datos históricos Ecuación 6 y con ella se generaron 100 datos de la precipitación máxima sintética $PSMÁX_k$; $k = 1, 2, \dots, 100$.

Para la selección de las tormentas que deberían escalarse, se consideró que si la precipitación máxima sintética $PSMÁX_k$ era mayor o igual que la el umbral correspondiente a las 30 primeras tormentas de los máximos históricos, se seleccionaba aleatoriamente una tormenta del grupo de las tormentas grandes y en caso contrario, del grupo de las tormentas chicas. Al igual que en el primer procedimiento de generación la tormenta seleccionada se escaló multiplicando el valor medido en cada estación por la relación entre el valor máximo generado y el valor máximo correspondiente a la tormenta histórica seleccionada Ecuación 1.

U_k	$F(p_m)$	Tormenta histórica seleccionada
0.424	61.522	58
0.121	51.559	48
0.330	58.703	40
0.420	61.399	38
0.288	57.401	51
0.035	46.494	48
0.296	57.649	46
0.967	97.428	19
0.886	83.153	17
0.950	92.640	12
0.527	64.745	44
0.249	56.188	37
0.484	63.375	55
0.864	81.125	11
0.758	73.999	6
0.796	76.184	18
0.082	49.706	57
0.779	75.165	11
0.989	109.209	3
0.078	49.485	37
0.946	91.758	14
0.694	70.943	11
0.954	93.594	9
0.360	59.590	41
0.544	65.317	52
0.608	67.550	46
0.185	54.045	43
0.907	85.571	1
0.142	52.446	54
0.523	64.612	46
0.416	61.276	40
0.189	54.187	40
0.740	73.114	19
0.437	61.926	46
0.381	60.232	47
0.736	72.915	21
0.338	58.947	58
0.352	59.346	46
0.612	67.698	44
0.018	44.467	40

0.202	54.647	51
0.266	56.736	45
0.843	79.373	6
0.565	66.039	58
0.800	76.433	16
0.181	53.901	45
0.074	49.256	39
0.847	79.687	4
0.399	60.753	55
0.095	50.389	45
0.039	46.858	46
0.394	60.631	57
0.997	122.894	20
0.010	42.939	44
0.270	56.863	43
0.676	70.204	3
0.860	80.775	13
0.924	87.957	8
0.501	63.923	40
0.224	55.364	57
0.459	62.582	52
0.839	79.065	8
0.732	72.717	3
0.505	64.053	38
0.057	48.179	54
0.754	73.787	8
0.698	71.120	9
0.053	47.898	56
0.655	69.333	56
0.403	60.875	53
0.929	88.589	6
0.334	58.825	37
0.253	56.317	58
0.317	58.301	52
0.159	53.117	39
0.882	82.743	19
0.117	51.383	51
0.232	55.630	52
0.125	51.733	46
0.164	53.269	37
0.715	71.900	16
0.146	52.606	52
0.356	59.468	43

0.711	71.714	18
0.313	58.178	55
0.061	48.448	51
0.587	66.783	41
0.993	114.069	1
0.911	86.088	20
0.975	100.607	15
0.818	77.550	3
0.274	56.989	41
0.775	74.937	13
0.890	83.576	15
0.783	75.397	9
0.822	77.824	1
0.373	59.988	51
0.804	76.686	14
0.014	43.789	42
0.103	50.779	40

Fecha	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	Est6
06/07/1986	45.3	61.5	56.9	47.9	47.9	34.2
10/05/1991	51.6	2.8	0.0	2.2	9.0	51.6
29/05/1986	58.7	30.4	39.1	36.6	43.5	51.6
07/06/2006	48.3	61.4	17.8	44.6	41.1	34.9
07/07/1991	7.3	57.4	0.0	10.4	13.6	7.3
10/05/1991	46.5	2.5	0.0	2.0	8.1	46.5
18/09/2006	9.3	0.0	1.0	57.6	0.0	0.0
08/06/1991	50.1	0.0	24.8	97.4	5.6	50.1
06/10/2003	62.4	83.2	45.8	18.5	47.7	21.5
27/09/1986	5.1	0.0	0.6	1.2	23.3	92.6
17/09/1991	22.7	0.0	0.0	64.7	0.0	22.7
20/08/1986	0.0	14.5	0.0	0.0	38.9	56.2
08/06/2003	63.4	14.4	6.2	24.9	52.5	38.3
04/09/2003	18.8	81.1	0.0	0.0	25.1	0.0
13/05/2006	0.0	18.3	0.0	0.0	0.0	74.0
05/10/2003	65.9	45.4	62.2	70.2	0.0	76.2
01/07/1986	28.1	46.8	4.1	22.2	49.7	35.1
04/09/2003	17.4	75.2	0.0	0.0	23.3	0.0
19/08/2003	6.0	109.2	0.0	3.6	12.1	41.1
20/08/1986	0.0	12.8	0.0	0.0	34.2	49.5
28/05/2006	8.5	91.8	56.5	4.9	12.8	0.0
04/09/2003	16.4	70.9	0.0	0.0	22.0	0.0

25/06/2003	24.5	43.9	25.2	22.0	93.6	86.1
04/10/1991	6.2	32.9	59.6	30.8	11.2	6.2
02/09/1991	7.1	47.5	65.3	23.8	18.6	7.1
18/09/2006	11.0	0.0	1.2	67.5	0.0	0.0
01/10/1986	0.0	0.0	9.5	1.7	0.0	54.0
30/08/2003	6.2	67.1	22.5	85.6	29.8	0.0
05/05/1991	19.4	0.0	0.0	52.4	0.0	19.4
18/09/2006	10.5	0.0	1.2	64.6	0.0	0.0
29/05/1986	61.3	31.7	40.8	38.2	45.4	53.9
29/05/1986	54.2	28.0	36.1	33.8	40.2	47.6
08/06/1991	37.6	0.0	18.6	73.1	4.2	37.6
18/09/2006	10.0	0.0	1.1	61.9	0.0	0.0
06/09/2003	14.8	11.9	60.2	7.0	35.5	24.5
05/07/2003	0.0	72.9	1.8	0.7	10.4	17.2
06/07/1986	43.4	58.9	54.5	45.8	45.8	32.7
18/09/2006	9.6	0.0	1.1	59.3	0.0	0.0
17/09/1991	23.8	0.0	0.0	67.7	0.0	23.8
29/05/1986	44.5	23.0	29.6	27.8	33.0	39.1
07/07/1991	7.0	54.6	0.0	9.9	12.9	7.0
20/05/2006	0.0	56.7	0.0	12.1	10.6	37.4
13/05/2006	0.0	19.7	0.0	0.0	0.0	79.4
06/07/1986	48.6	66.0	61.1	51.4	51.4	36.7
29/08/2003	11.7	76.4	25.7	20.2	10.6	14.9
20/05/2006	0.0	53.9	0.0	11.5	10.1	35.5
30/05/2006	4.2	44.1	49.3	33.1	33.9	12.1
28/06/2003	0.0	79.7	0.0	0.0	8.9	0.0
08/06/2003	60.8	13.8	5.9	23.9	50.3	36.7
20/05/2006	0.0	50.4	0.0	10.8	9.4	33.2
18/09/2006	7.6	0.0	0.8	46.9	0.0	0.0
01/07/1986	34.2	57.1	5.0	27.1	60.6	42.8
17/06/1991	73.7	8.8	3.5	13.2	122.9	73.7
17/09/1991	15.1	0.0	0.0	42.9	0.0	15.1
01/10/1986	0.0	0.0	10.0	1.8	0.0	56.9
19/08/2003	3.9	70.2	0.0	2.3	7.8	26.4
18/06/2003	42.8	27.8	18.6	18.5	11.2	80.8
28/08/1986	0.0	46.8	9.7	88.0	12.7	3.1
29/05/1986	63.9	33.1	42.5	39.9	47.4	56.2
01/07/1986	31.3	52.1	4.6	24.8	55.4	39.1
02/09/1991	6.8	45.5	62.6	22.8	17.9	6.8
28/08/1986	0.0	42.0	8.7	79.1	11.4	2.7
19/08/2003	4.0	72.7	0.0	2.4	8.1	27.4
07/06/2006	50.3	64.1	18.5	46.5	42.8	36.4
05/05/1991	17.8	0.0	0.0	48.2	0.0	17.8

28/08/1986	0.0	39.2	8.1	73.8	10.7	2.6
25/06/2003	18.6	33.4	19.1	16.7	71.1	65.4
04/08/1986	13.0	31.5	31.0	27.0	47.9	22.3
04/08/1986	18.8	45.5	44.8	39.1	69.3	32.3
01/05/2006	22.3	9.8	7.0	24.0	0.0	60.9
13/05/2006	0.0	21.9	0.0	0.0	0.0	88.6
20/08/1986	0.0	15.2	0.0	0.0	40.7	58.8
06/07/1986	41.5	56.3	52.1	43.8	43.8	31.3
02/09/1991	6.4	42.4	58.3	21.2	16.6	6.4
30/05/2006	4.5	47.5	53.1	35.7	36.6	13.1
08/06/1991	42.6	0.0	21.0	82.7	4.7	42.6
07/07/1991	6.5	51.4	0.0	9.3	12.1	6.5
02/09/1991	6.1	40.5	55.6	20.2	15.9	6.1
18/09/2006	8.4	0.0	0.9	51.7	0.0	0.0
20/08/1986	0.0	13.8	0.0	0.0	36.8	53.3
29/08/2003	11.0	71.9	24.2	19.0	10.0	14.0
02/09/1991	5.7	38.3	52.6	19.1	15.0	5.7
01/10/1986	0.0	0.0	10.4	1.9	0.0	59.5
05/10/2003	62.1	42.7	58.6	66.1	0.0	71.7
08/06/2003	58.2	13.2	5.7	22.9	48.2	35.2
07/07/1991	6.2	48.4	0.0	8.8	11.5	6.2
04/10/1991	6.9	36.8	66.8	34.5	12.6	6.9
30/08/2003	8.2	89.5	30.0	114.1	39.7	0.0
17/06/1991	51.7	6.1	2.5	9.2	86.1	51.7
11/09/2006	27.0	100.6	15.6	55.4	27.0	5.4
19/08/2003	4.3	77.5	0.0	2.6	8.6	29.2
04/10/1991	5.9	31.4	57.0	29.5	10.7	5.9
18/06/2003	39.7	25.8	17.3	17.2	10.4	74.9
11/09/2006	22.5	83.6	12.9	46.1	22.5	4.5
25/06/2003	19.7	35.4	20.3	17.7	75.4	69.3
30/08/2003	5.6	61.0	20.4	77.8	27.1	0.0
07/07/1991	7.6	60.0	0.0	10.9	14.2	7.6
28/05/2006	7.1	76.7	47.2	4.1	10.7	0.0
04/10/1986	6.1	0.0	27.3	43.8	0.0	17.4
29/05/1986	50.8	26.3	33.8	31.7	37.6	44.7

En la Figura 55 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada con el segundo procedimiento, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 64.7 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 17/09/1991 en este caso la misma tormenta utilizada en el primer procedimiento, cuyo máximo registrado fue de 57 mm.

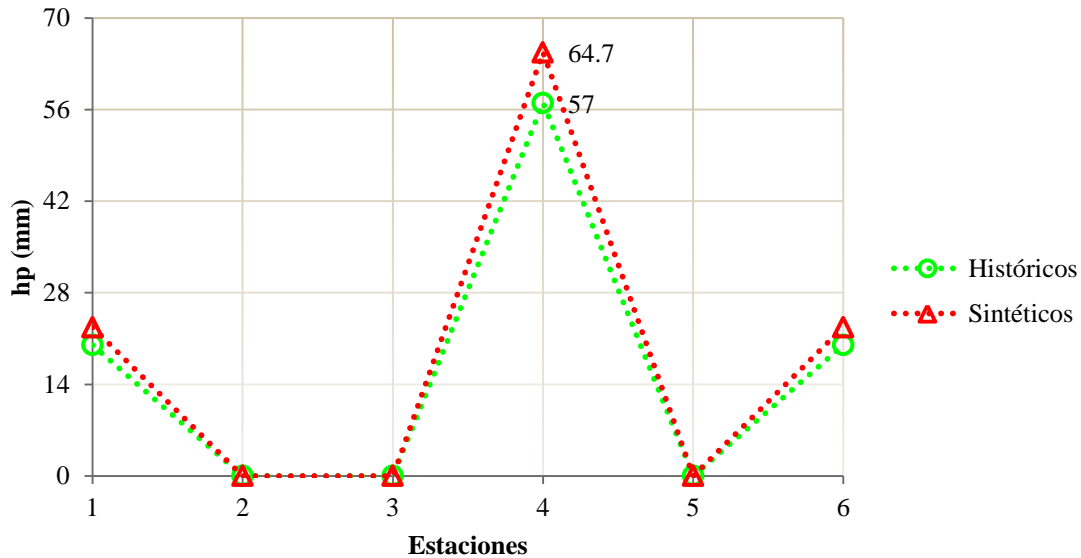


Figura 55. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

4.5.3. *Umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Las tormentas históricas se ordenaron de mayor a menor de acuerdo con su precipitación máxima, y se dividieron en dos grupos, las primeras 40 formaron el grupo de tormentas grandes mayores a 60 mm y las 40 restantes formaron el grupo de tormentas pequeñas menores a 60 mm.

En el primero grupo se consideraron las 40 tormentas con mayor valor máximo y en el segundo grupo las restantes 40 tormentas. Al relacionar estos dos grupos por separado con los valores correspondientes del índice de extensión espacial se obtiene la Figura 56 y la Figura 57, que muestran una menor correlación entre la precipitación máxima y el índice de extensión espacial, particularmente para el grupo de las tormentas con mayor precipitación máxima.

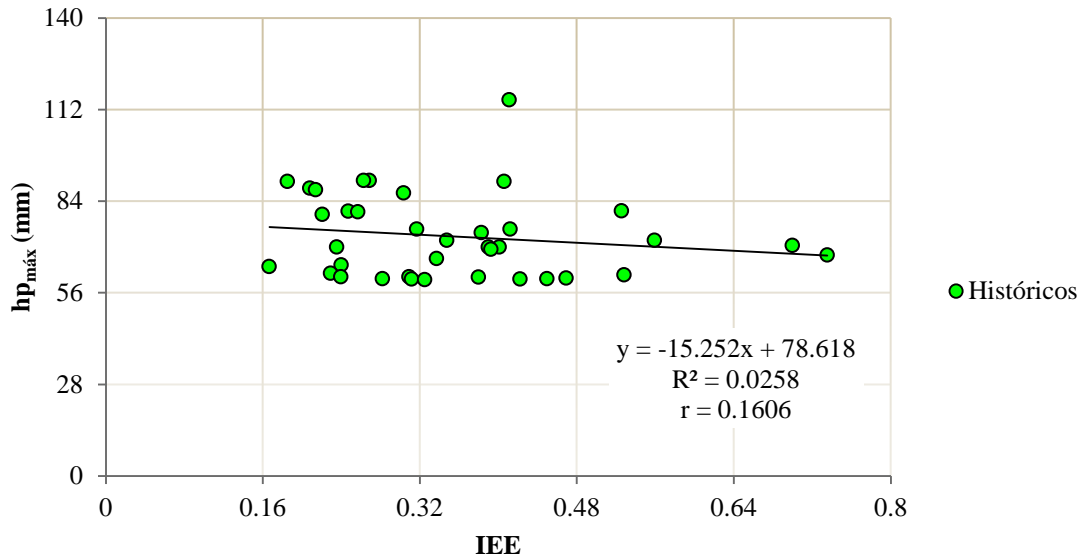


Figura 56. Relación entre el IEE y precipitación máxima primer grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

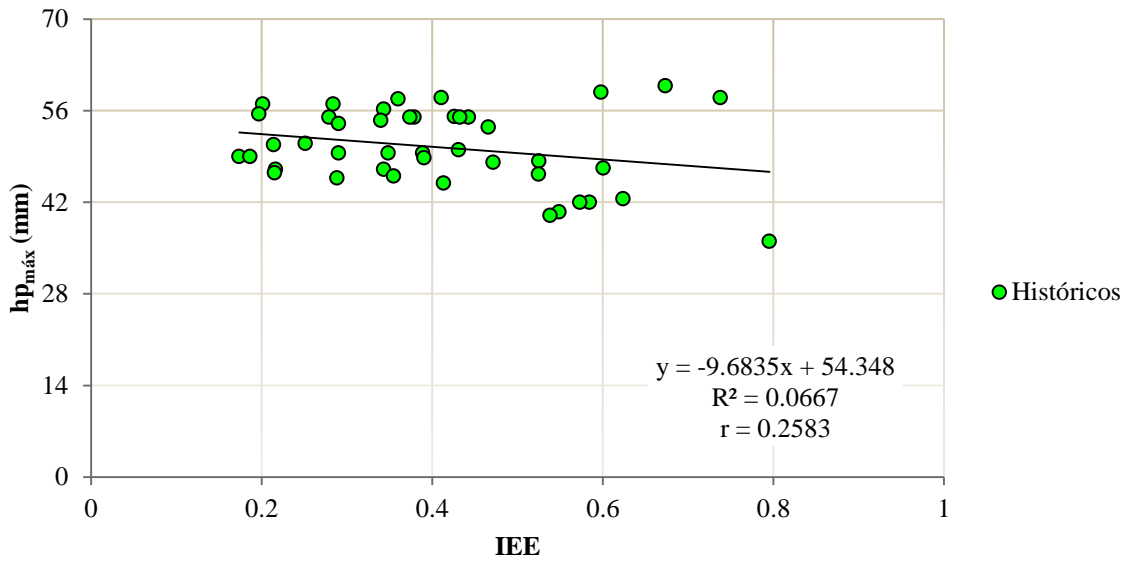


Figura 57. Relación entre el IEE y precipitación máxima segundo grupo, datos históricos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

El procedimiento de generación de las tormentas sintéticas se modifica entonces, de tal manera que si el valor máximo generado, $PSM\acute{A}X_k$ obtenido en el paso 4 de la metodología es mayor o igual que el umbral correspondiente a las 40 primeras tormentas de los máximos históricos, se selecciona aleatoriamente una de las tormentas del primer grupo (tormentas

con valor máximo grande) y en caso contrario, se selecciona una tormenta del segundo grupo (tormentas cuyo valor máximo es chico).

Se generaron 100 números aleatorios con distribución uniforme [0,1] que se tomaron como el valor de la probabilidad de no excedencia de la función de distribución Gumbel de ajuste de los datos históricos Ecuación 7 y con ella se generaron 100 datos de la precipitación máxima sintética $PSMÁX_k$; $k = 1,2,\dots, 100$.

Para la selección de las tormentas que deberían escalarse, se consideró que si la precipitación máxima sintética $PSMÁX_k$ era mayor o igual que la el umbral correspondiente a las 40 primeras tormentas de los máximos históricos, se seleccionaba aleatoriamente una tormenta del grupo de las tormentas grandes y en caso contrario, del grupo de las tormentas chicas. Al igual que en el primer procedimiento de generación la tormenta seleccionada se escaló multiplicando el valor medido en cada estación por la relación entre el valor máximo generado y el valor máximo correspondiente a la tormenta histórica seleccionada Ecuación 1.

U_k	$F(p_m)$	Tormenta histórica seleccionada
0.640	63.628	5
0.337	53.277	68
0.546	60.107	12
0.636	63.464	9
0.504	58.639	73
0.251	50.511	68
0.512	58.912	65
0.183	48.117	42
0.102	44.665	77
0.166	47.457	67
0.743	68.343	19
0.465	57.359	49
0.700	66.233	37
0.081	43.526	67
0.974	96.369	15
0.012	37.075	80
0.298	52.043	45
0.995	115.968	24
0.205	48.897	52
0.294	51.913	48
0.162	47.298	71

0.910	81.631	24
0.170	47.613	63
0.576	61.163	14
0.760	69.280	32
0.824	73.342	23
0.401	55.303	59
0.123	45.676	48
0.358	53.953	78
0.739	68.132	23
0.632	63.301	13
0.405	55.431	55
0.956	90.385	2
0.653	64.175	22
0.597	61.956	24
0.952	89.330	5
0.555	60.393	5
0.568	60.869	22
0.828	73.640	19
0.234	49.926	54
0.418	55.853	73
0.482	57.928	63
0.059	42.185	57
0.781	70.517	4
0.016	37.847	76
0.397	55.175	63
0.290	51.782	52
0.063	42.460	53
0.615	62.619	37
0.311	52.469	62
0.255	50.646	64
0.611	62.462	3
0.213	49.184	44
0.226	49.648	62
0.486	58.061	59
0.892	79.485	10
0.076	43.291	71
0.141	46.429	61
0.717	67.058	13
0.440	56.537	44
0.675	65.087	31
0.055	41.898	61
0.948	88.359	9

0.721	67.256	9
0.273	51.218	78
0.970	94.682	18
0.914	82.189	20
0.269	51.085	43
0.871	77.246	1
0.619	62.776	33
0.145	46.598	57
0.551	60.250	9
0.469	57.491	46
0.533	59.644	75
0.376	54.499	53
0.098	44.461	42
0.333	53.149	72
0.448	56.797	75
0.341	53.405	64
0.380	54.627	49
0.931	84.897	33
0.362	54.080	74
0.572	61.015	18
0.927	84.210	37
0.529	59.504	79
0.277	51.351	74
0.803	71.863	14
0.209	49.041	48
0.127	45.856	44
0.191	48.416	73
0.034	40.083	51
0.490	58.196	55
0.991	108.968	28
0.106	44.865	73
0.999	136.116	20
0.038	40.477	47
0.589	61.653	31
0.020	38.486	72
0.230	49.787	58
0.320	52.727	54

Fecha	Est1	Est2	Est3	Est4	Est5	Est6
06/07/2003	34.2	63.6	9.8	6.6	13.8	26.9
28/06/1986	0.0	43.6	0.0	0.1	12.6	53.3
27/09/1986	3.3	0.0	0.4	0.8	15.1	60.1
25/06/2003	16.6	29.8	17.1	14.9	63.5	58.4
04/06/2006	0.0	33.1	58.6	0.0	0.0	9.6
28/06/1986	0.0	41.4	0.0	0.1	11.9	50.5
08/06/2003	58.9	13.4	5.7	23.2	48.8	35.6
04/10/1986	6.7	0.0	30.0	48.1	0.0	19.1
02/09/2006	20.2	18.5	44.7	27.6	21.3	21.3
04/08/1986	12.9	31.2	30.7	26.7	47.5	22.1
08/06/1991	35.1	0.0	17.4	68.3	3.9	35.1
27/05/1991	44.8	57.4	0.0	0.0	5.2	44.8
20/08/1986	0.0	17.1	0.0	0.0	45.8	66.2
04/08/1986	11.8	28.6	28.1	24.5	43.5	20.3
11/09/2006	25.9	96.4	14.9	53.1	25.9	5.2
06/07/1986	27.3	37.1	34.3	28.8	28.8	20.6
20/05/2006	0.0	52.0	0.0	11.1	9.7	34.3
25/08/2006	0.0	0.0	27.9	116.0	69.8	20.9
02/09/1991	5.3	35.6	48.9	17.8	14.0	5.3
10/05/1991	51.9	2.8	0.0	2.3	9.1	51.9
14/09/2003	47.3	32.7	25.4	29.1	0.0	14.3
25/08/2006	0.0	0.0	19.6	81.6	49.1	14.7
15/09/2006	0.0	5.5	47.6	0.0	0.0	0.0
28/05/2006	5.7	61.2	37.7	3.2	8.5	0.0
14/06/2006	6.9	56.5	0.6	16.0	69.3	45.8
30/05/1986	31.5	43.5	65.0	73.3	73.3	36.9
15/08/1986	0.0	55.3	2.8	36.9	1.7	19.0
10/05/1991	45.7	2.5	0.0	2.0	8.0	45.7
24/05/2006	42.6	30.4	17.3	6.7	54.0	26.6
30/05/1986	29.3	40.4	60.4	68.1	68.1	34.3
18/06/2003	33.5	21.8	14.6	14.5	8.8	63.3
26/06/1986	3.6	35.2	1.6	55.4	41.4	17.6
07/08/2003	0.2	90.4	1.5	8.5	20.0	25.0
19/07/2006	9.3	10.6	0.0	64.2	56.0	11.1
25/08/2006	0.0	0.0	14.9	62.0	37.3	11.2
06/07/2003	48.0	89.3	13.8	9.3	19.4	37.7
06/07/2003	32.5	60.4	9.3	6.3	13.1	25.5
19/07/2006	8.8	10.1	0.0	60.9	53.1	10.5
08/06/1991	37.9	0.0	18.7	73.6	4.2	37.9
05/05/1991	18.5	0.0	0.0	49.9	0.0	18.5

04/06/2006	0.0	31.5	55.9	0.0	0.0	9.2
15/09/2006	0.0	6.7	57.9	0.0	0.0	0.0
24/08/2003	3.3	42.2	2.0	6.6	0.0	0.0
28/06/2003	0.0	70.5	0.0	0.0	7.8	0.0
25/06/1991	37.8	1.8	25.7	16.9	12.6	37.8
15/09/2006	0.0	6.4	55.2	0.0	0.0	0.0
02/09/1991	5.6	37.7	51.8	18.8	14.8	5.6
01/05/2006	15.6	6.9	4.9	16.8	0.0	42.5
20/08/1986	0.0	16.2	0.0	0.0	43.3	62.6
24/09/1986	0.0	52.5	0.0	0.0	0.0	2.1
03/09/2006	10.4	50.6	14.5	12.5	20.8	9.9
19/08/2003	3.5	62.5	0.0	2.1	6.9	23.5
17/09/1991	17.3	0.0	0.0	49.2	0.0	17.3
24/09/1986	0.0	49.6	0.0	0.0	0.0	2.0
15/08/1986	0.0	58.1	2.9	38.7	1.8	19.9
26/07/2003	0.0	79.5	0.0	0.0	10.3	28.0
14/09/2003	43.3	29.9	23.3	26.6	0.0	13.1
25/07/2003	2.8	10.1	19.4	2.1	0.0	46.4
18/06/2003	35.5	23.1	15.5	15.4	9.3	67.1
17/09/1991	19.8	0.0	0.0	56.5	0.0	19.8
13/09/2003	8.6	65.1	33.0	13.9	10.7	17.1
25/07/2003	2.5	9.1	17.5	1.9	0.0	41.9
25/06/2003	23.1	41.5	23.8	20.7	88.4	81.3
25/06/2003	17.6	31.6	18.1	15.8	67.3	61.9
24/05/2006	40.5	28.8	16.4	6.3	51.2	25.3
05/10/2003	81.9	56.4	77.4	87.3	0.0	94.7
17/06/1991	49.3	5.9	2.3	8.8	82.2	49.3
01/10/1986	0.0	0.0	9.0	1.6	0.0	51.1
30/08/2003	5.6	60.6	20.3	77.2	26.9	0.0
26/06/2003	1.8	62.8	1.5	1.7	32.8	5.7
24/08/2003	3.7	46.6	2.2	7.3	0.0	0.0
25/06/2003	15.8	28.3	16.2	14.1	60.2	55.4
18/09/2006	9.3	0.0	1.0	57.5	0.0	0.0
01/07/1986	33.7	56.1	4.9	26.7	59.6	42.1
01/05/2006	20.0	8.8	6.3	21.5	0.0	54.5
04/10/1986	6.2	0.0	27.7	44.5	0.0	17.7
19/06/2003	7.2	27.7	13.5	11.6	0.0	53.1
01/07/1986	32.1	53.5	4.7	25.4	56.8	40.1
03/09/2006	10.9	53.4	15.3	13.1	21.9	10.4
27/05/1991	42.7	54.6	0.0	0.0	5.0	42.7
26/06/2003	2.4	84.9	2.0	2.3	44.3	7.7
24/06/1991	6.0	2.4	54.1	35.4	30.1	6.0
05/10/2003	52.8	36.3	49.9	56.3	0.0	61.0

20/08/1986	0.0	21.8	0.0	0.0	58.2	84.2
22/08/1991	32.7	59.5	4.8	11.6	50.9	32.7
24/06/1991	5.7	2.3	51.4	33.6	28.6	5.7
28/05/2006	6.7	71.9	44.3	3.8	10.0	0.0
10/05/1991	49.0	2.7	0.0	2.1	8.6	49.0
17/09/1991	16.1	0.0	0.0	45.9	0.0	16.1
04/06/2006	0.0	27.3	48.4	0.0	0.0	7.9
07/07/1991	5.1	40.1	0.0	7.3	9.5	5.1
26/06/1986	3.8	37.0	1.6	58.2	43.5	18.5
16/09/2003	64.7	54.9	16.1	42.5	58.1	109.0
04/06/2006	0.0	25.3	44.9	0.0	0.0	7.4
17/06/1991	81.7	9.7	3.9	14.6	136.1	81.7
06/09/2003	9.9	8.0	40.5	4.7	23.9	16.5
13/09/2003	8.1	61.7	31.2	13.2	10.1	16.2
19/06/2003	5.2	20.1	9.8	8.4	0.0	38.5
16/08/1986	6.5	39.3	2.0	4.7	26.4	49.8
05/05/1991	19.5	0.0	0.0	52.7	0.0	19.5

En la Figura 58 se presenta un ejemplo del escalamiento de una tormenta generada con el segundo procedimiento, para la cual el máximo sintético obtenido fue de 53.1 mm y la fecha de la tormenta histórica seleccionada 19/06/2003 en este caso la misma tormenta utilizada en el primer procedimiento, cuyo máximo registrado fue de 46 mm.

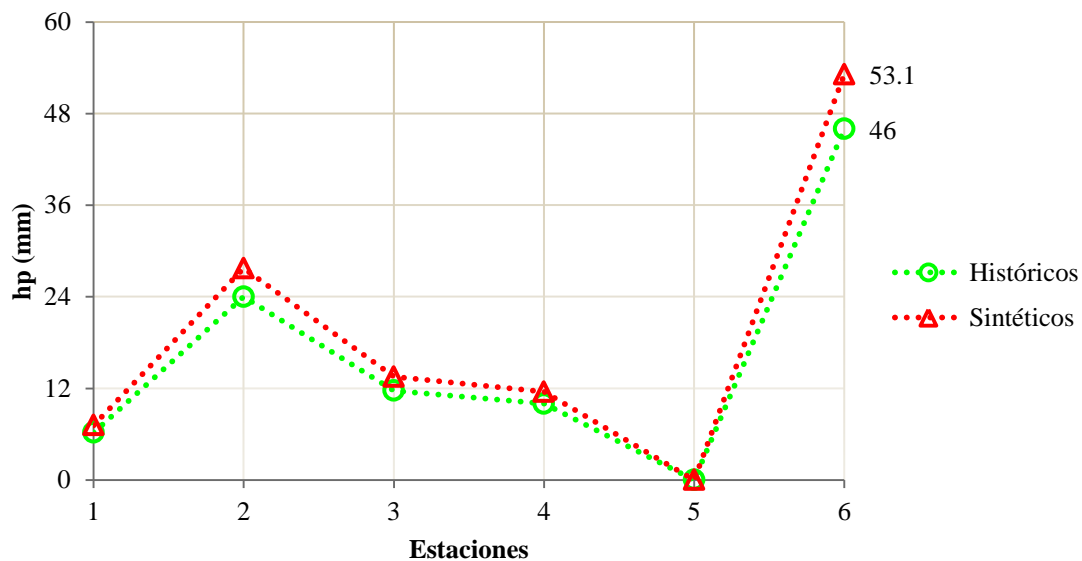


Figura 58. Ejemplo de escalamiento de una tormenta.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

4.6. Validación del segundo procedimiento

4.6.1. Umbral mayor a 62.9 mm o umbral promedio mayor a 29.3 mm

Como ya fue expuesto, en primera instancia se verifica la eficacia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas ahora con el segundo procedimiento. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 59 y la Figura 60 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

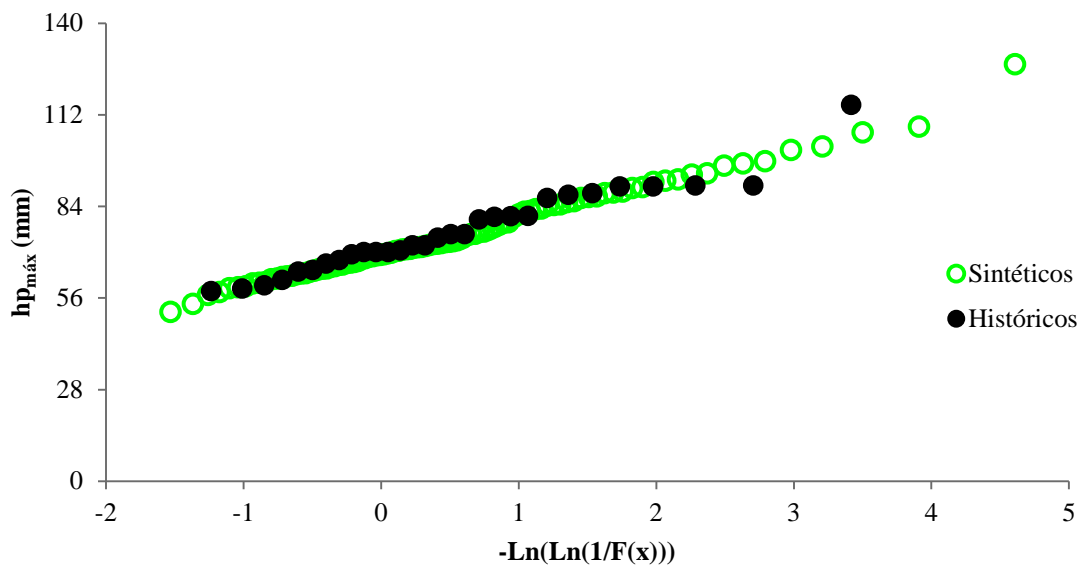


Figura 59. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

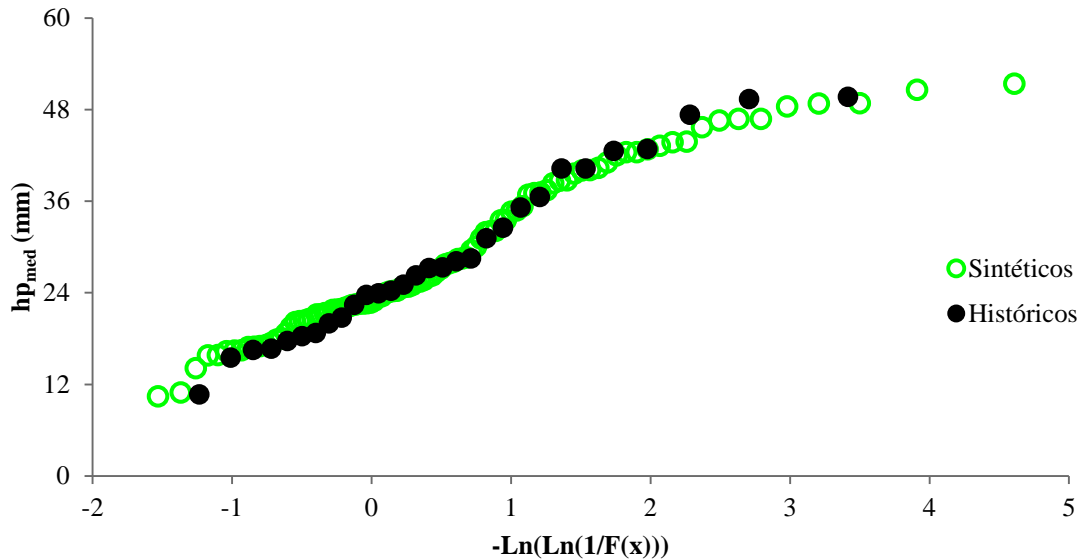


Figura 60. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

En la Figura 60 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones medias se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones máximas Figura 59, los valores correspondientes a las tormentas generadas resulta menor o mayor que los de los históricos en una zona de la figura.

Para identificar las causas que motivan las diferencias encontradas entre las precipitaciones máximas sintéticas y las históricas, se construyen dos figuras a comparar, una es la Figura 16 (anteriormente generada) que es para las tormentas históricas y la Figura 61 que es para las tormentas sintéticas generadas con el segundo procedimiento, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos y adicionalmente produce una mayor correlación que las tormentas generadas con el primer procedimiento, esto no necesariamente es un primer indicio que se mejoraron los datos sintéticos con el segundo procedimiento con respecto del primero.

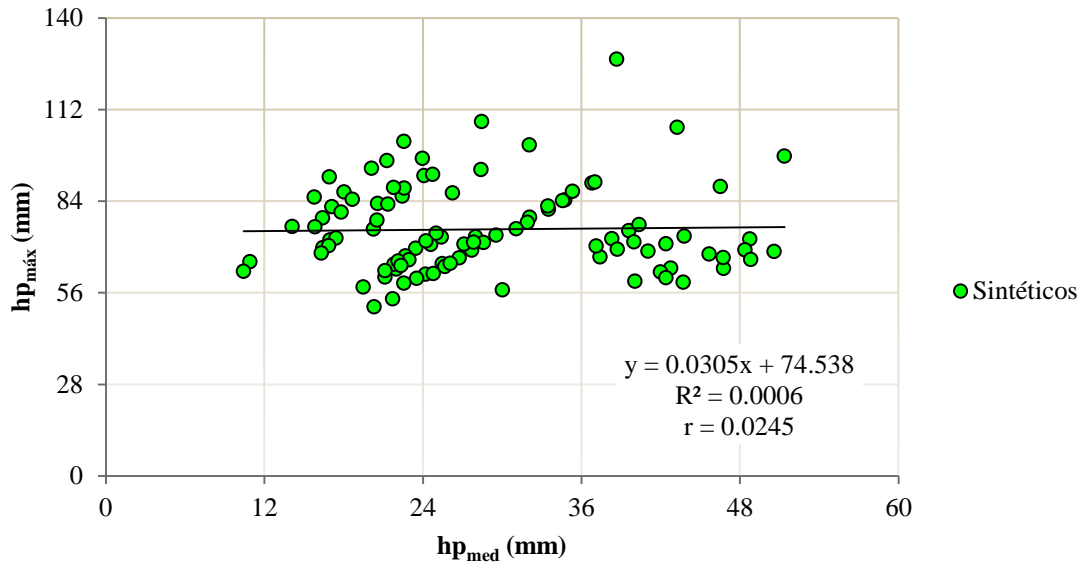


Figura 61. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

Realizando un análisis más a fondo se descubre que la correlación tan pequeña que se observa en la Figura 61 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo, en otras palabras, la correlación que se obtiene puede considerarse espuria por lo que mantiene parte de las propiedades estadísticas de las tormentas históricas.

Anteriormente en la Figura 18 se relacionó la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, de dicha figura, se consigue mostrar una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas, este mismo comportamiento se replica en la Figura 62 para las tormentas generadas con el segundo procedimiento y se señala nuevamente que se mejora esta propiedad con respecto a las tormentas generadas en el primer procedimiento.

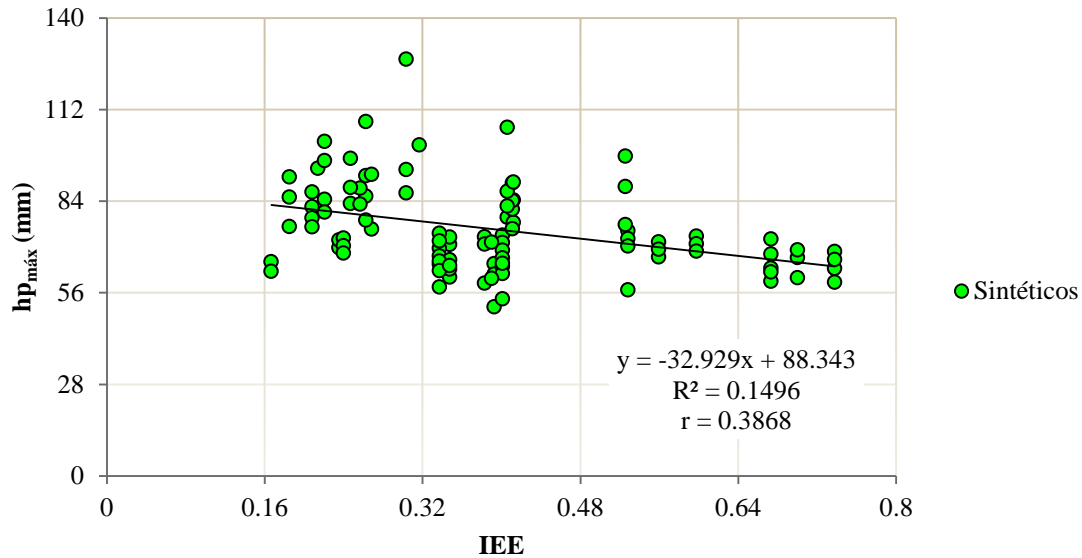


Figura 62. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

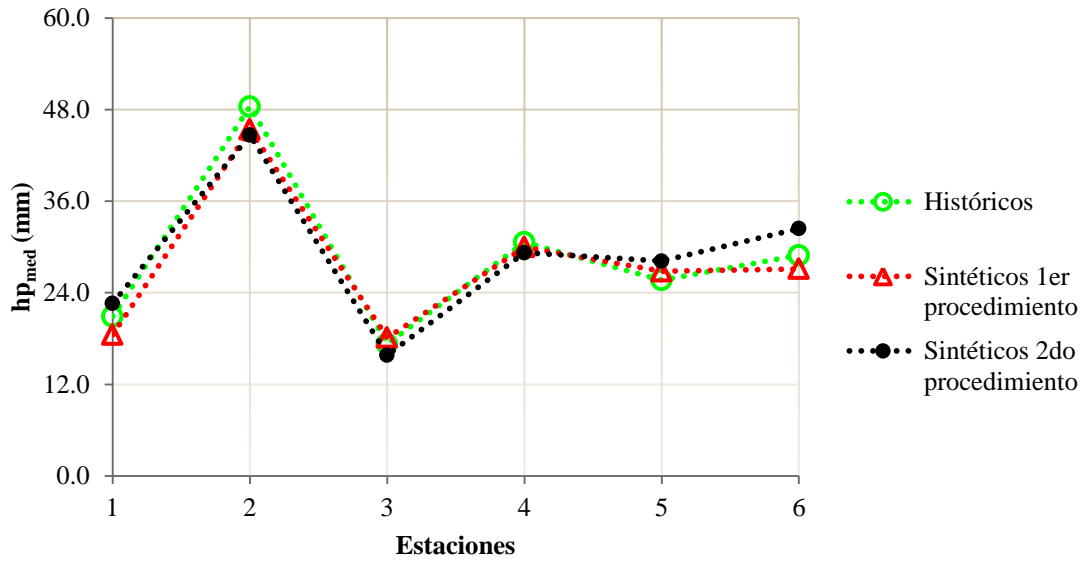


Figura 63. Comportamiento de la media para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

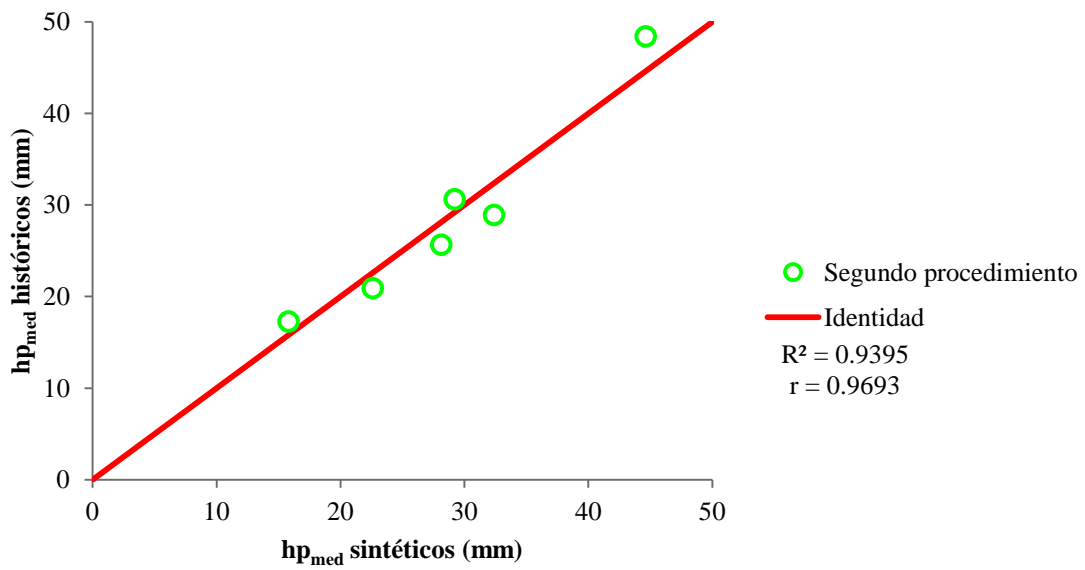


Figura 64. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

En la Figura 63 se muestra la representación lograda de los valores medios, estación por estación entre los históricos y los sintéticos para ambos procedimientos, adicionalmente muestra que para ambos procedimientos hay similitud estación por estación de las tormentas generadas, finalmente para las estaciones la representación se considera adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 64, la cual muestra una función identidad y por lo tanto es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados y es ligeramente igual a la del primer procedimiento.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría.

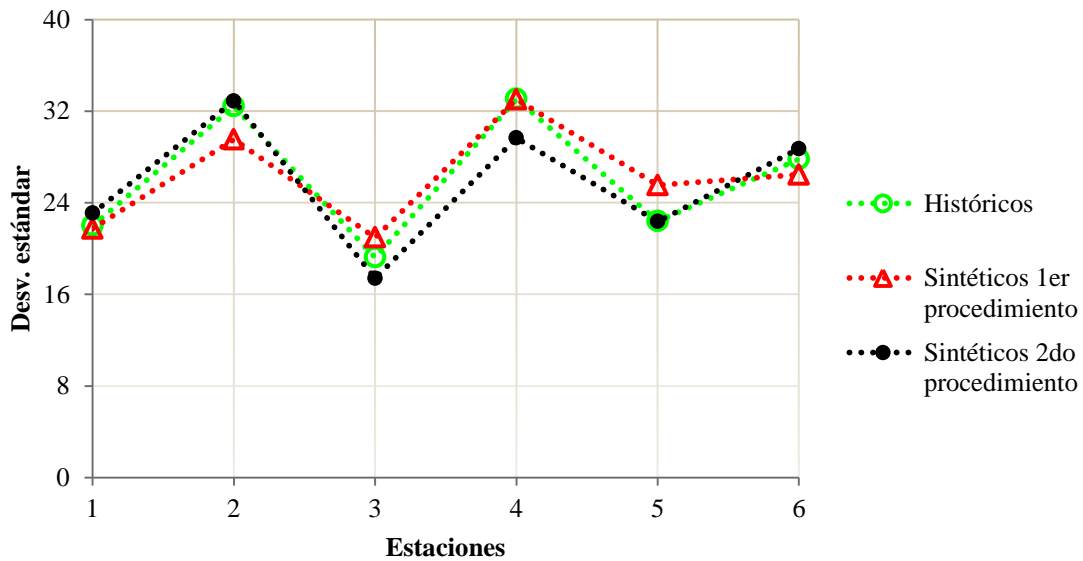


Figura 65. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

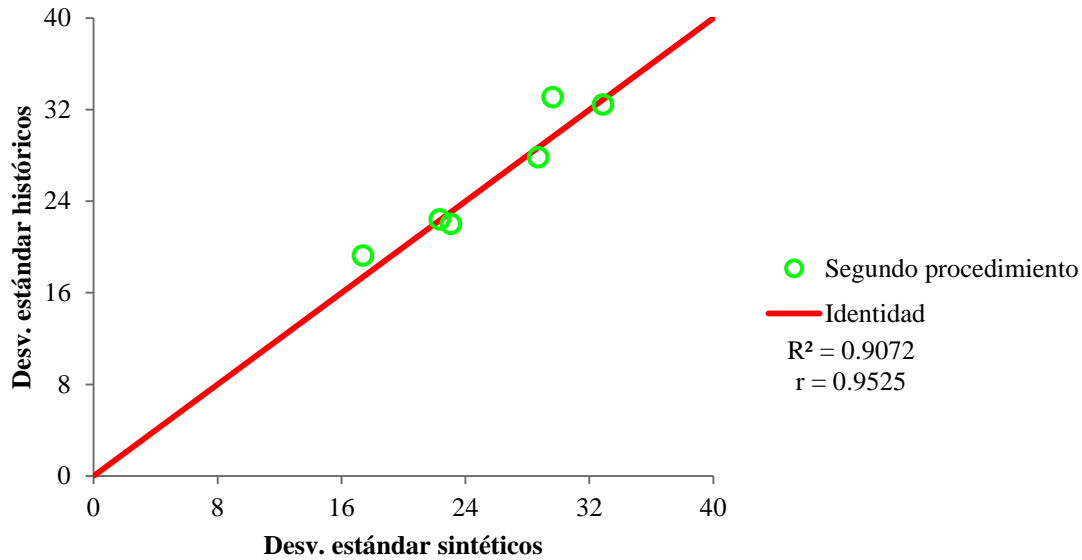


Figura 66. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

El análisis de la Figura 65 presenta que para ambos procedimientos, hay similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 66 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados y son mejorados con respecto al primer procedimiento.

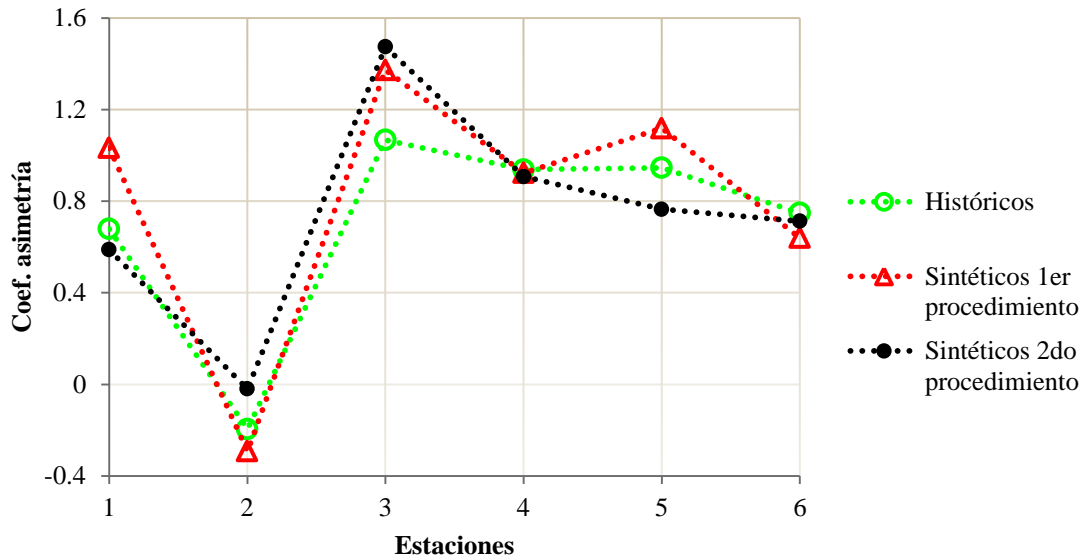


Figura 67. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

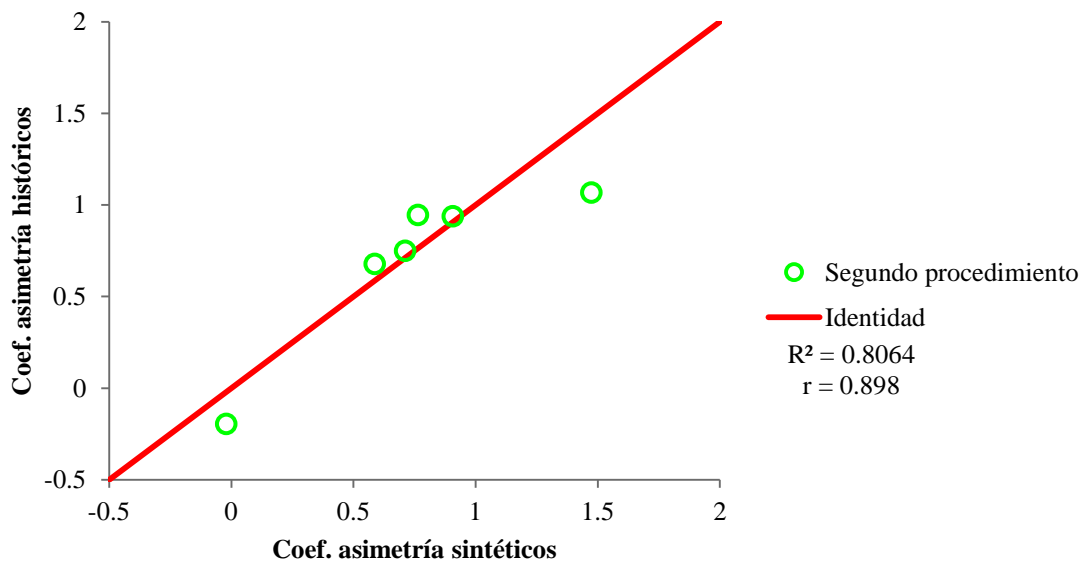


Figura 68. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 62.9 mm o *umbral promedio* mayor a 29.3 mm

El análisis de la Figura 67 presenta que para ambos procedimientos, hay cierta similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 68 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados y son muy parecidos con respecto al primer procedimiento.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

	Var_i	Var_ε	C_{det}
Media	118.399	7.863	0.9336
Desv. estándar	33.844	3.170	0.9063
Coef. asimetría	0.211	0.046	0.7826

4.6.2. Umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Como ya fue expuesto, en primera instancia se verifica la eficacia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas ahora con el segundo procedimiento. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 69 y la Figura 70 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

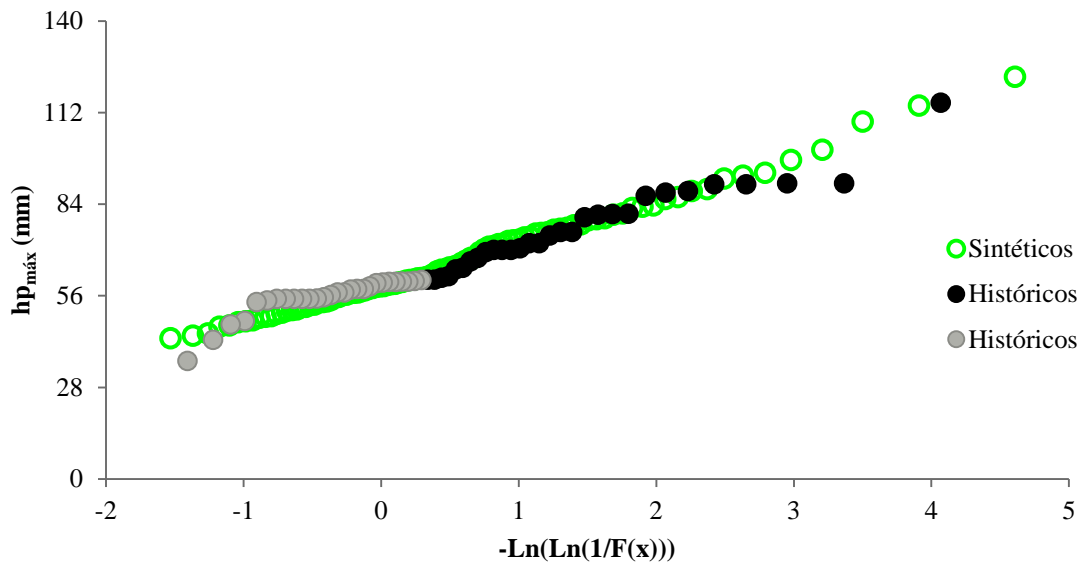


Figura 69. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

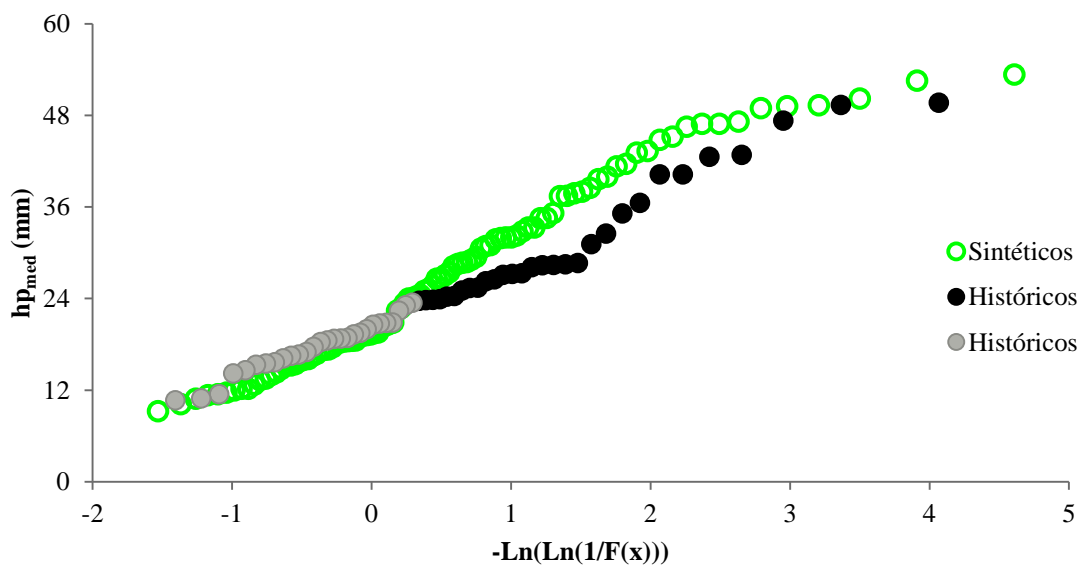


Figura 70. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

En la Figura 69 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones máximas se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones medias Figura 70, los valores correspondientes a las tormentas generadas resulta menor o mayor que los de los históricos en una zona de la figura.

Para identificar las causas que motivan las diferencias encontradas entre las precipitaciones máximas sintéticas y las históricas, se construyen dos figuras a comparar, una es la Figura 28 (anteriormente generada) que es para las tormentas históricas y la Figura 71 que es para las tormentas sintéticas generadas con el segundo procedimiento, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos y adicionalmente produce una menor correlación que las tormentas generadas con el primer procedimiento, esto no necesariamente es un indicador de una mejora en los datos sintéticos con el segundo procedimiento respecto del primer procedimiento.

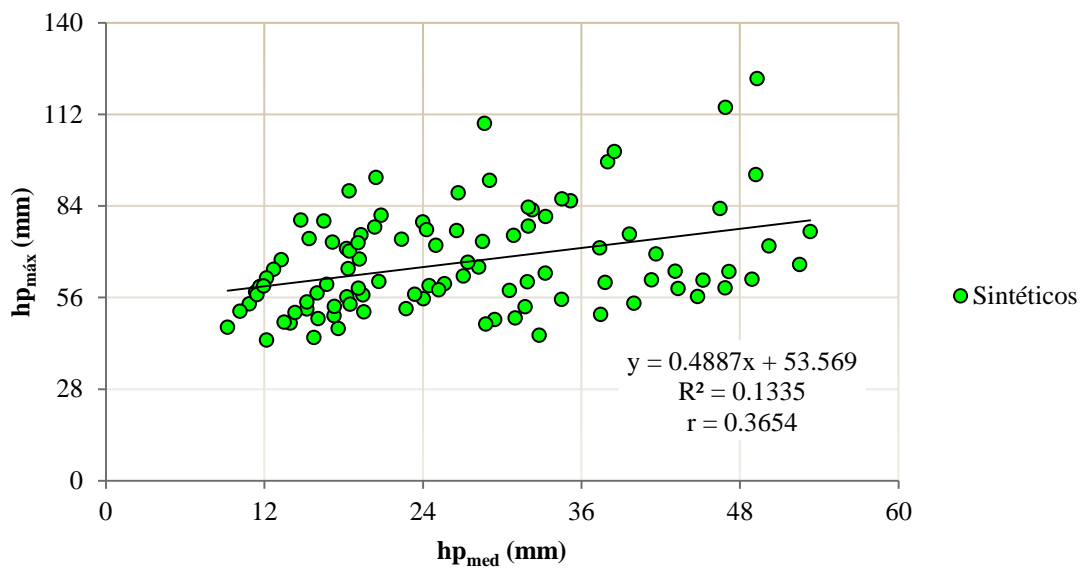


Figura 71. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Segundo procedimiento de generación, umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm

Realizando un análisis más a fondo se descubre que la correlación que se observa en la Figura 71 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo, en otras palabras, la correlación que se obtiene puede considerarse espuria por lo que mantiene parte de las propiedades estadísticas de las tormentas históricas.

Anteriormente en la Figura 30 se relacionó la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, de dicha figura, se consigue mostrar una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas, este mismo comportamiento se replica en la Figura 72 para las tormentas generadas con el segundo procedimiento y se señala nuevamente que se mejora esta propiedad con respecto a las tormentas generadas en el primer procedimiento.

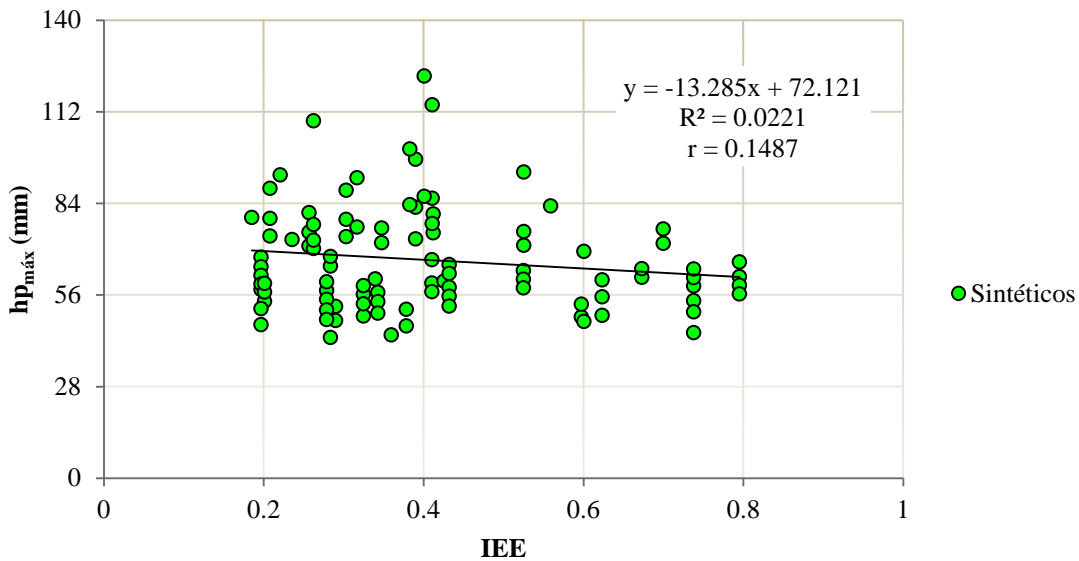


Figura 72. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

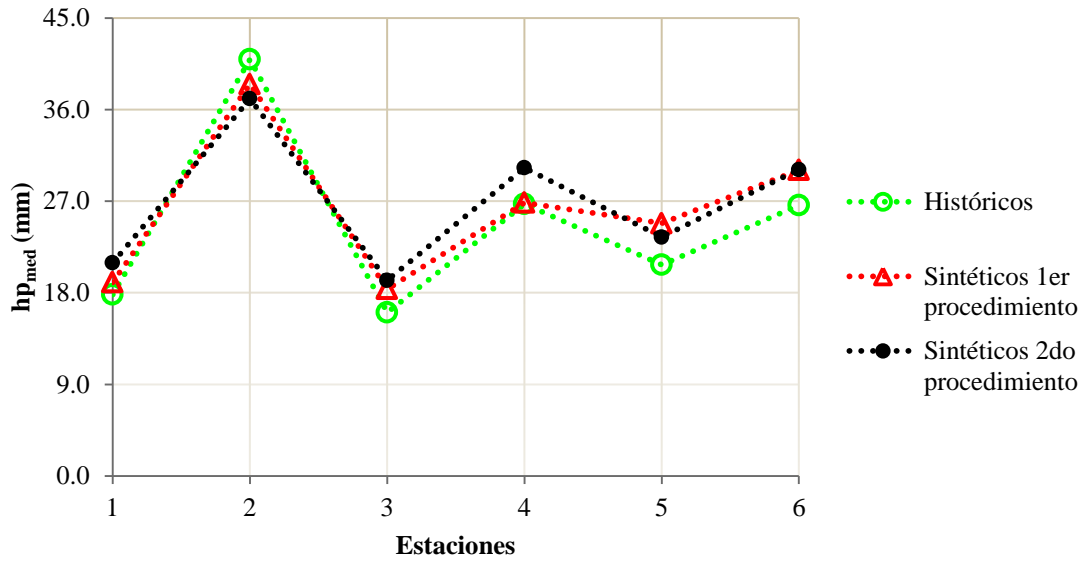


Figura 73. Comportamiento de la media para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

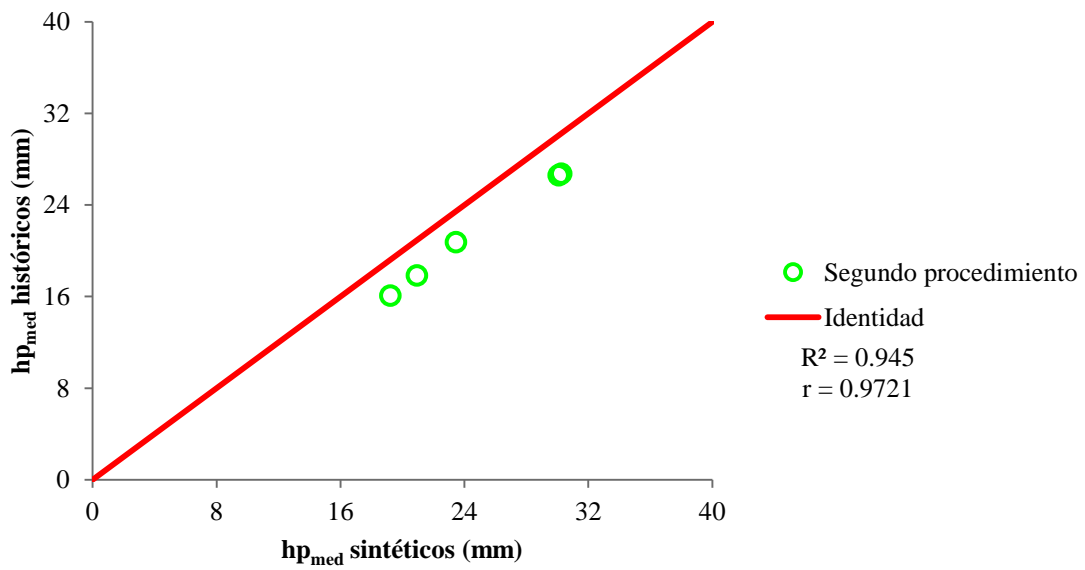


Figura 74. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

En la Figura 73 se muestra la representación lograda de los valores medios, estación por estación entre los históricos y los sintéticos para ambos procedimientos, adicionalmente muestra que para ambos procedimientos hay similitud estación por estación de las tormentas generadas, finalmente para las estaciones la representación se considera adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 74, la cual muestra una función identidad y por lo tanto es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados y es ligeramente igual a la del primer procedimiento.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría

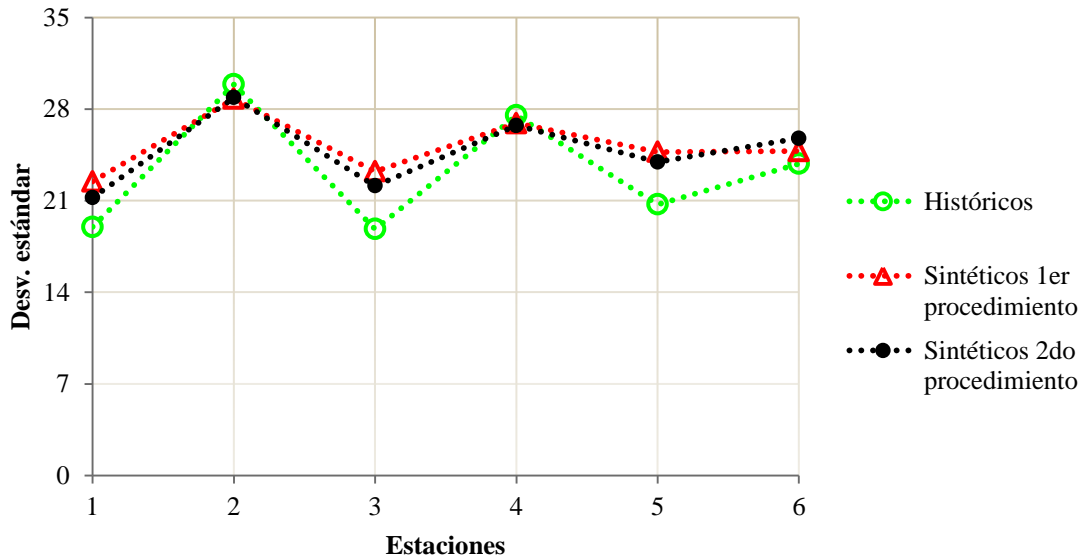


Figura 75. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

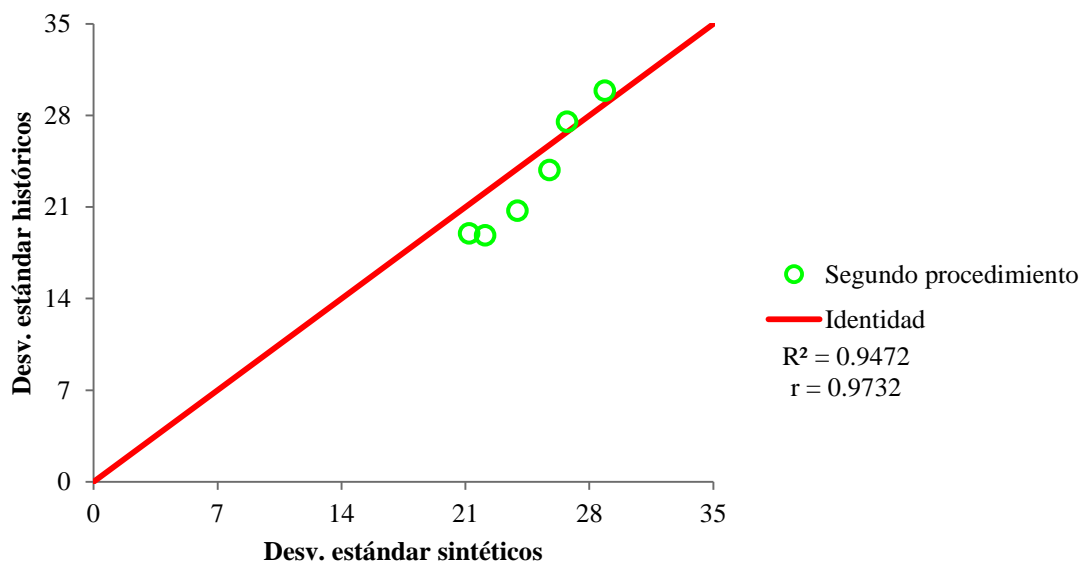


Figura 76. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral mayor a 53.9 mm o umbral promedio mayor a 25.1 mm*

El análisis de la Figura 75 presenta que para ambos procedimientos, hay similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 76 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados sin embargo son mejorados con respecto al primer procedimiento.

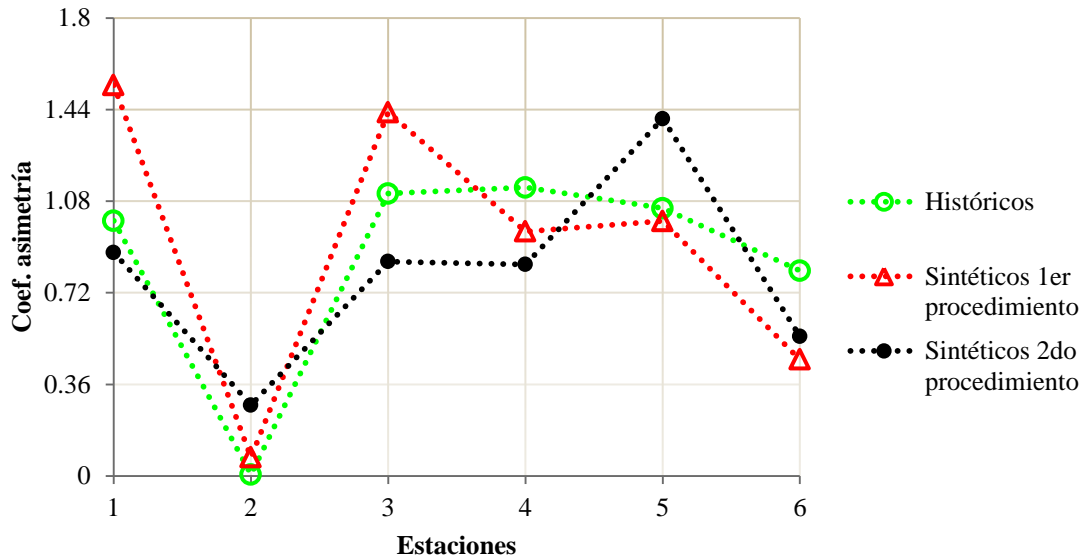


Figura 77. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

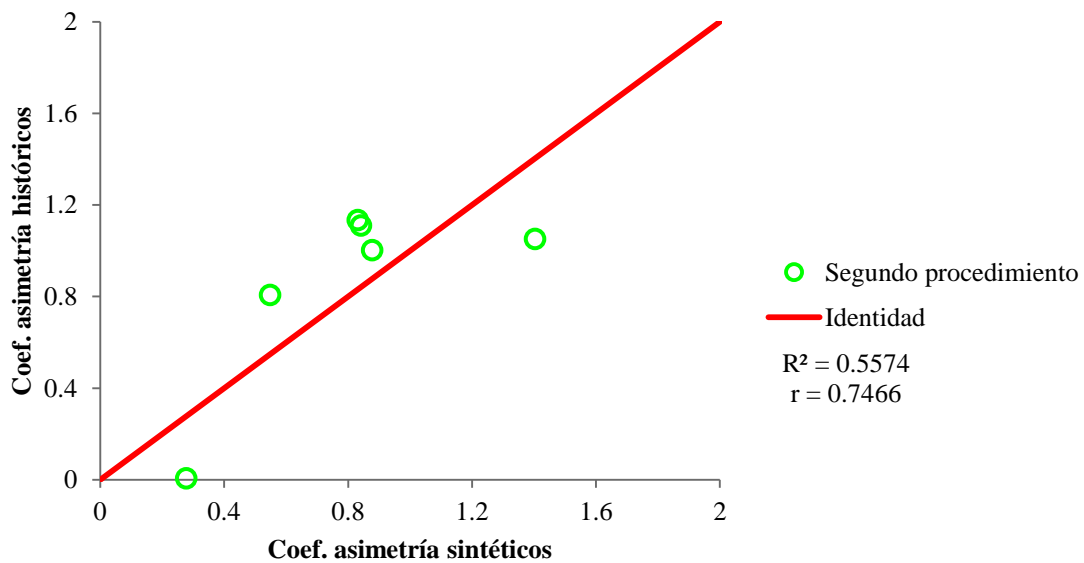


Figura 78. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 53.9 mm o *umbral promedio* mayor a 25.1 mm

El análisis de la Figura 77 presenta que para ambos procedimientos, hay cierta similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 78 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados y son ligeramente parecidos con respecto al primer procedimiento.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

	Var_i	Var_ϵ	C_{det}
Media	81.678	8.444	0.8966
Desv. estándar	21.351	3.684	0.8274
Coef. asimetría	0.185	0.085	0.5411

4.6.3. Umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Como ya fue expuesto, en primera instancia se verifica la eficacia del procedimiento propuesto comparando las funciones de distribución de los máximos y las medias de las tormentas históricas con las de las tormentas generadas ahora con el segundo procedimiento. De acuerdo con la propuesta, se obtuvieron los valores empíricos de las probabilidades de no excedencia para las precipitaciones máximas y medias; en la Figura 79 y la Figura 80 se muestra la comparación entre los valores obtenidos para las tormentas históricas y para las sintéticas.

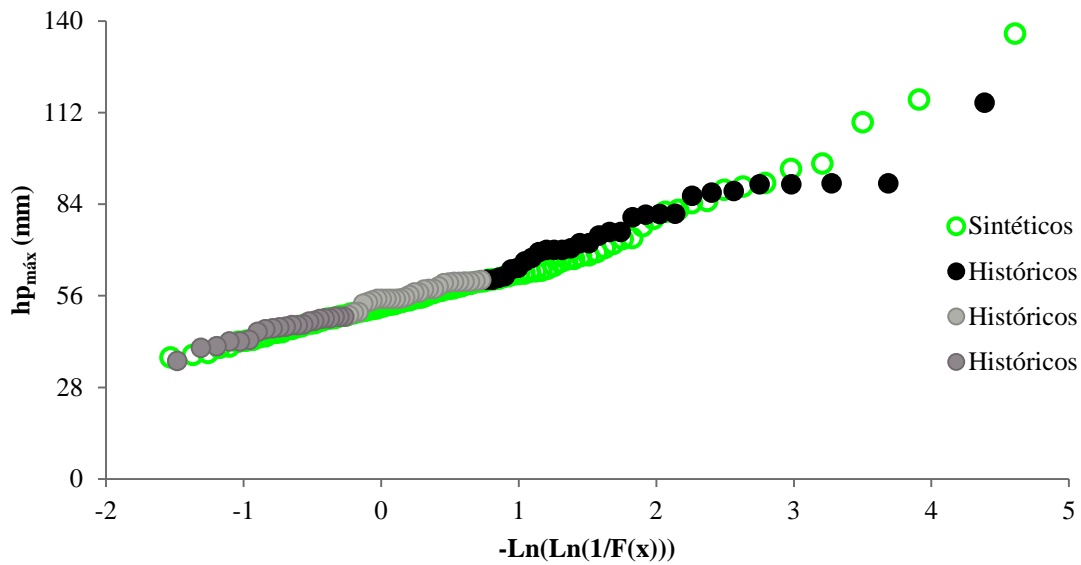


Figura 79. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones máximas.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

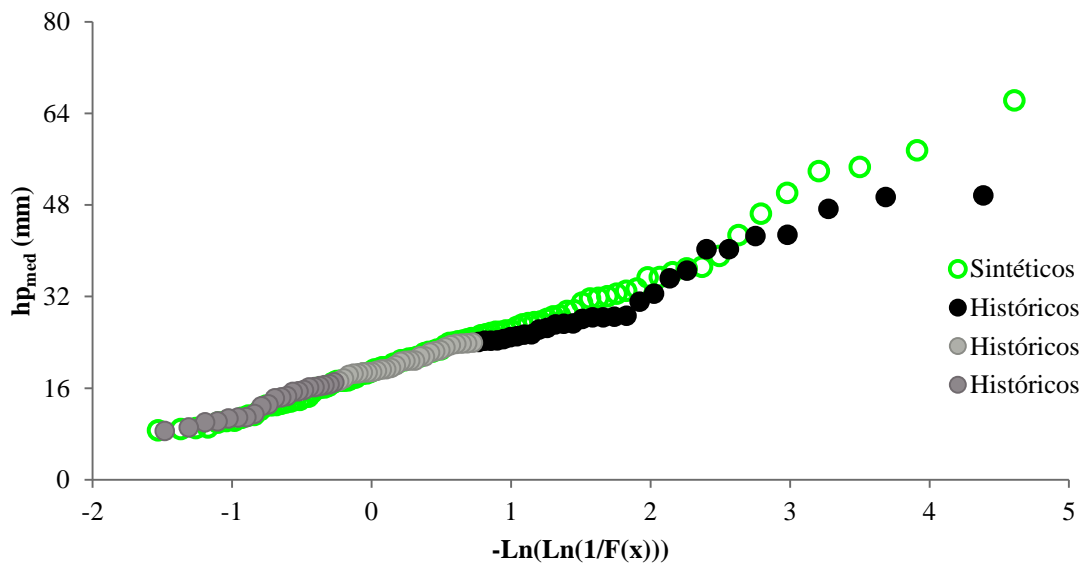


Figura 80. Distribuciones de probabilidad empírica de las precipitaciones medias.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

En la Figura 79 se aprecia que la función de distribución de las precipitaciones máximas se logra reproducir adecuadamente, mientras que en el caso de las precipitaciones medias Figura 80, los valores correspondientes a las tormentas generadas resulta menor o mayor que los de los históricos en una zona de la figura.

Para identificar las causas que motivan las diferencias encontradas entre las precipitaciones máximas sintéticas y las históricas, se construyen dos figuras a comparar, una es la Figura 40 (anteriormente generada) que es para las tormentas históricas y la Figura 81 que es para las tormentas sintéticas generadas con el segundo procedimiento, en las que se relacionan las precipitaciones máximas con las medias respectivamente. Al comparar las gráficas se observa que la muestra sintética produce una mayor correlación entre medias y máximos que la correspondiente a los valores históricos y adicionalmente produce una mayor correlación que las tormentas generadas con el primer procedimiento, esto no necesariamente es un indicador de una mejora en los datos sintéticos con el segundo procedimiento respecto del primer procedimiento.

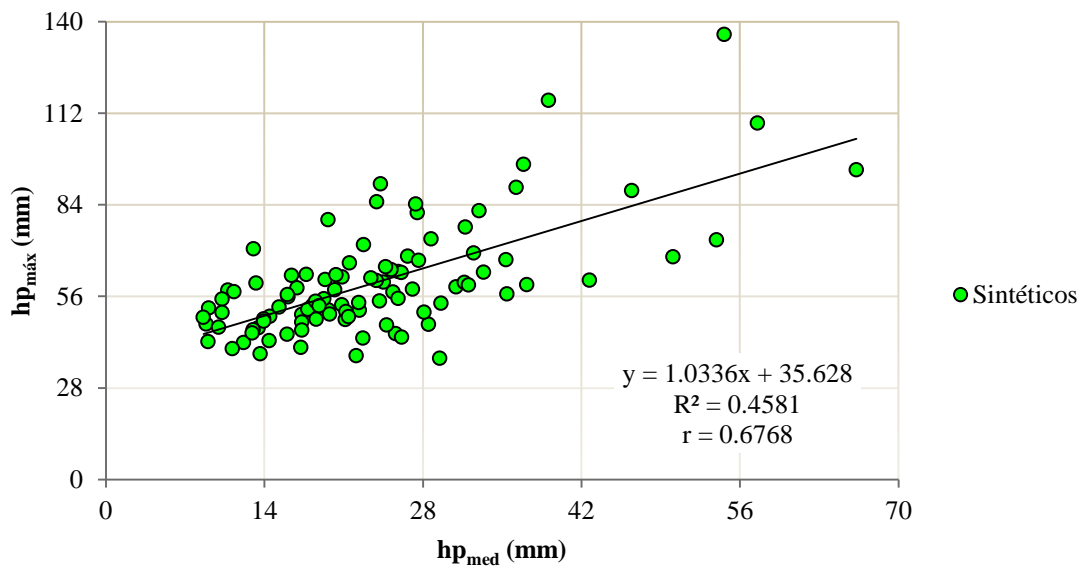


Figura 81. Relación entre la precipitación media y máxima datos sintéticos

Segundo procedimiento de generación, umbral mayor a 44.9 mm o umbral promedio mayor a 20.9 mm

Realizando un análisis más a fondo se descubre que la correlación que se observa en la Figura 81 se debe a que los valores medios están determinados en parte por el máximo, en otras palabras, la correlación que se obtiene puede considerarse espuria por lo que mantiene parte de las propiedades estadísticas de las tormentas históricas.

Anteriormente en la Figura 42 se relacionó la precipitación máxima anual de las tormentas históricas con su índice de extensión espacial, de dicha figura, se consigue mostrar una tendencia a que la amplitud espacial de las tormentas, medida mediante el índice de extensión espacial, disminuya conforme la magnitud del valor máximo aumenta, es decir, que las tormentas con mayor precipitación máxima tienden a ser menos extensas, este comportamiento no se replica rotundamente en la Figura 82 para las tormentas generadas con el segundo procedimiento y se señala nuevamente que se mejora esta propiedad con respecto a las tormentas generadas en el primer procedimiento.

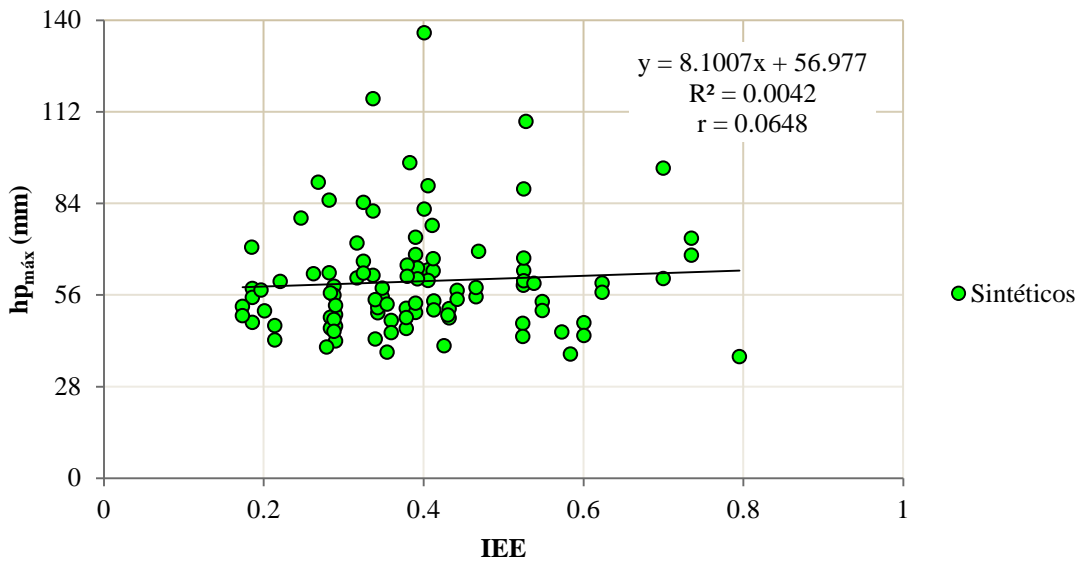


Figura 82. Relación entre el índice de la extensión espacial (IEE) y precipitación máxima datos sintéticos.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

Una vez que se consiguen representar adecuadamente las funciones de distribución de los valores máximos y medios de las tormentas históricas, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos de las lluvias registradas en cada una de las estaciones climatológicas.

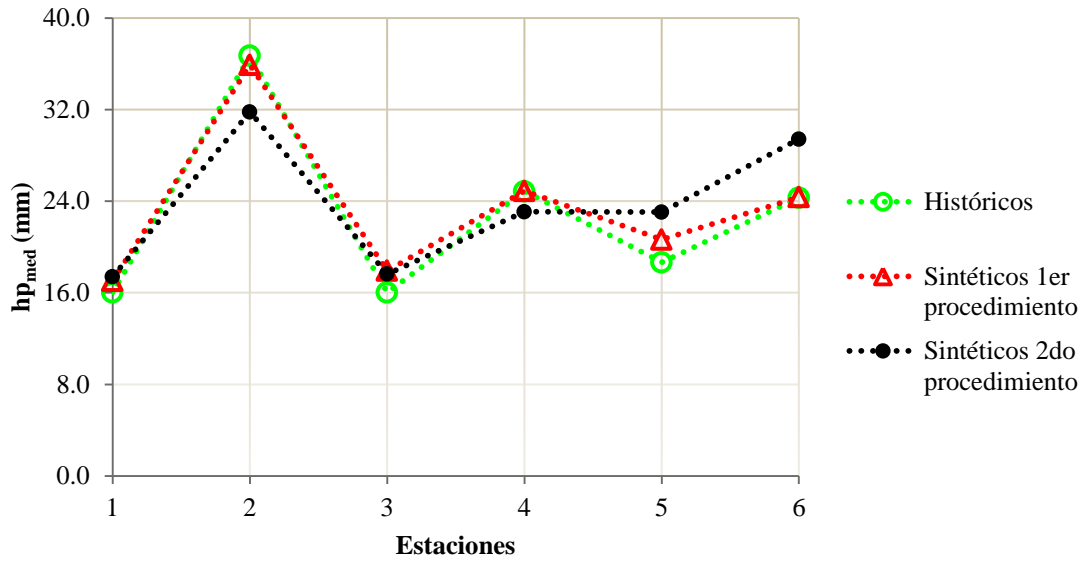


Figura 83. Comportamiento de la media para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

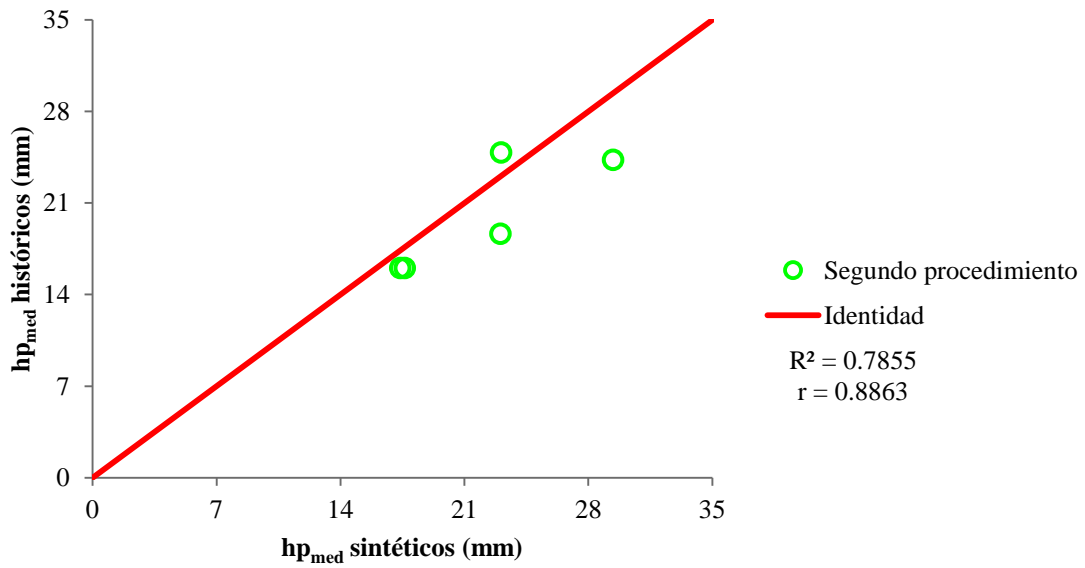


Figura 84. Comportamiento de la media para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

En la Figura 83 se muestra la representación lograda de los valores medios, estación por estación entre los históricos y los sintéticos para ambos procedimientos, adicionalmente muestra que para ambos procedimientos hay similitud estación por estación de las tormentas generadas, finalmente para las estaciones la representación se considera adecuada.

De lo anterior, se decide construir la Figura 84, la cual muestra una función identidad y por lo tanto es quien indica el grado de representación que se logra entre los datos históricos y los datos sintéticos, considerándose nuevamente bien representados y no mejora a la del primer procedimiento.

Así mismo, se prueba, si también se consiguen representar adecuadamente, los parámetros estadísticos restantes, es decir, para la desviación estándar y para el coeficiente de asimetría.

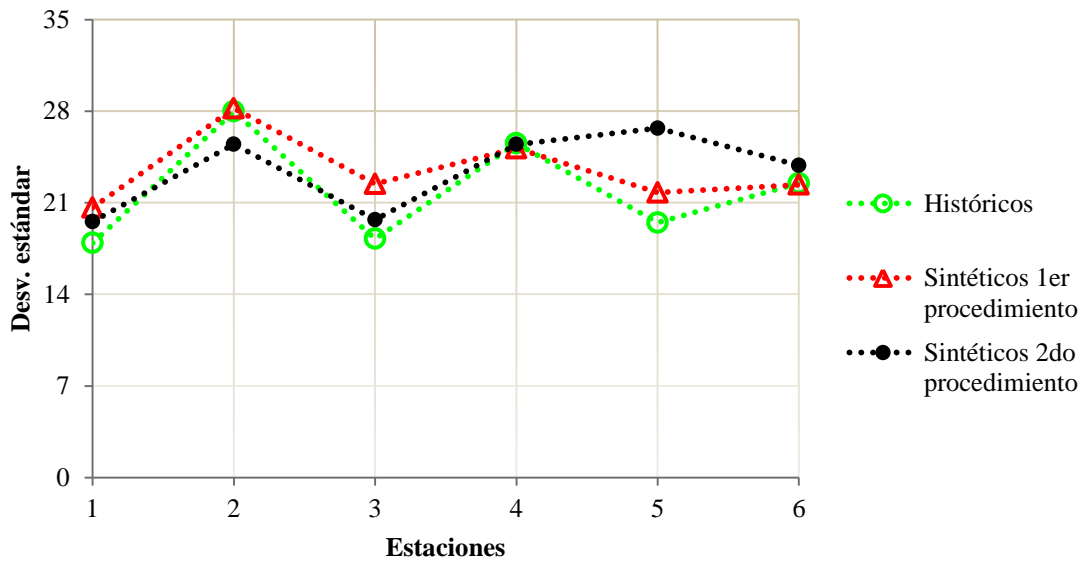


Figura 85. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

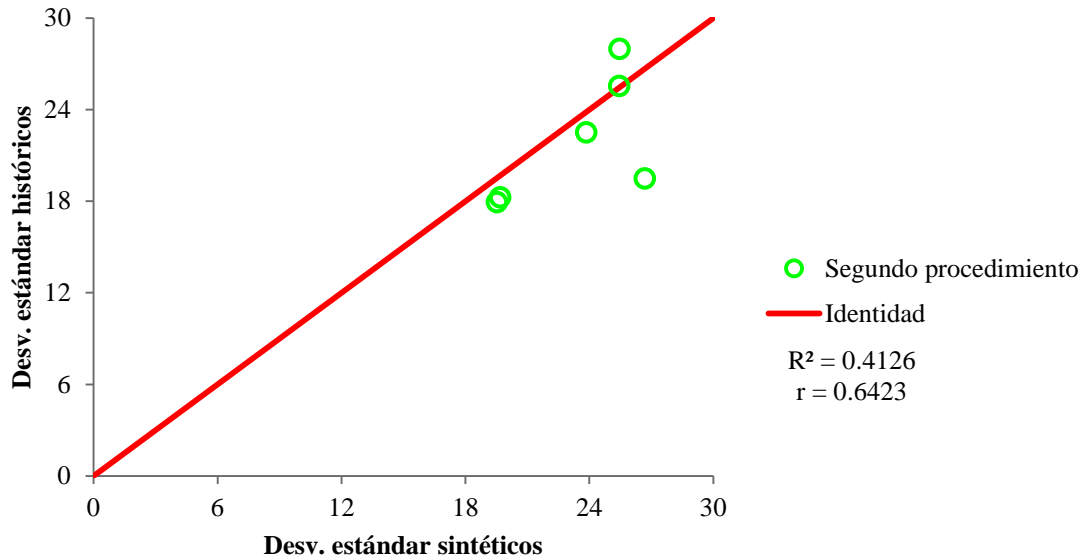


Figura 86. Comportamiento de la desviación estándar para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

El análisis de la Figura 85 presenta que para ambos procedimientos, hay similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 86 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados sin embargo no son mejorados con respecto al primer procedimiento.

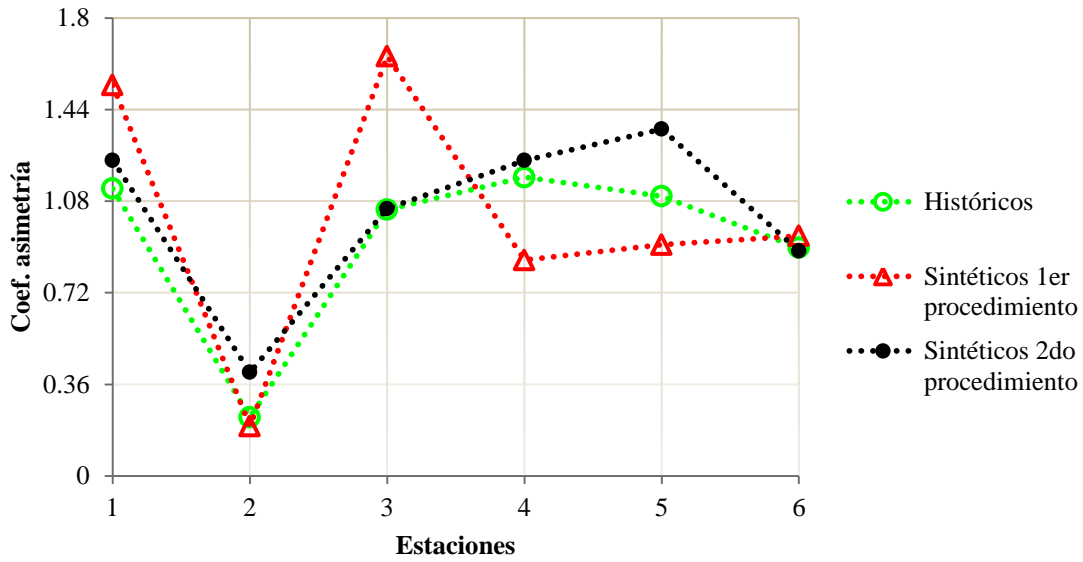


Figura 87. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

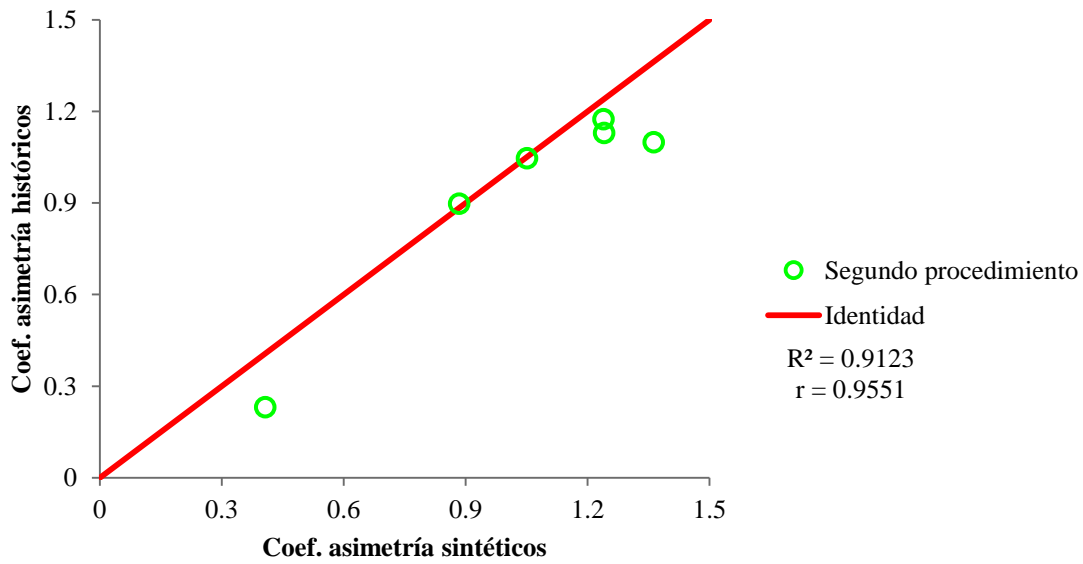


Figura 88. Comportamiento del coeficiente de asimetría para cada estación, identidad.

Segundo procedimiento de generación, *umbral* mayor a 44.9 mm o *umbral promedio* mayor a 20.9 mm

El análisis de la Figura 87 presenta que para ambos procedimientos, hay cierta similitud estación por estación del parámetro estadístico calculado mediante el modelo generador de las tormentas y por lo tanto se puede aceptar la representación de este parámetro estadístico, igualmente en la Figura 88 presenta, como los puntos son cercanos a la función identidad, por lo que este estadístico, calculado con los valores generados en el segundo procedimiento, son considerados nuevamente bien representados y son mejorados considerablemente con respecto al primer procedimiento.

Con el fin de estimar la correlación entre los valores de los parámetros correspondientes a las tormentas históricas y los parámetros obtenidos de las tormentas sintéticas, se calcula el coeficiente de determinación para cada parámetro estadístico con la Ecuación 3, los coeficientes de determinación obtenidos para este caso son:

	Var_i	Var_ϵ	C_{det}
Media	61.763	14.337	0.7679
Desv. estándar	17.127	10.256	0.4012
Coef. asimetría	0.126	0.011	0.9115

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación del primer procedimiento para generar sintéticamente tormentas en la cuenca de Chicoasén en el estado de Chiapas, México, no logró reproducir adecuadamente la función de distribución de los máximos y de las medias de las tormentas históricas. Además la correlación entre la máxima precipitación registrada en la región para una tormenta dada y la extensión espacial de la misma tormenta fue débil.

Los resultados anteriores hicieron necesario realizar cambios importantes en las características de los eventos generados sintéticamente, por lo que se modificó la metodología de generación sintética y se propuso un segundo procedimiento de generación que preserve las características estadísticas generales de las series históricas, es decir, que las funciones de distribución de los máximos y de las medias así como la correlación entre las precipitaciones máximas y medias generadas sintéticamente se aproximen más a su correspondiente tormenta histórica.

Al aplicar el primer procedimiento para generar 100 tormentas sintéticas, a partir de 30, 58 y 80 tormentas registradas en 6 estaciones pluviométricas en la cuenca de Chicoasén, la tabla siguiente presenta si se reprodujo adecuadamente la función de distribución de las medias espaciales de las tormentas históricas máximas y medias.

Primer Procedimiento			
Reproducción Tormentas Históricas	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3
Máximas	Buena	Regular	Buena
Medias	Buena	Regular	Buena

Como se muestra claramente en la Figura 14, Figura 15, Figura 26, Figura 27, Figura 38 y Figura 39.

La tabla siguiente presenta si se reprodujo adecuadamente la correlación entre los valores máximos y los medios.

Primer Procedimiento				
Reproducción	Correlación Máx vs Med	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3
Históricos	Baja	0.0024	0.0551	0.1342
	Alta	0.1896	0.3319	0.3734
Sintéticos		Regular	Mala	Regular

Para las tormentas históricas resultó baja y para los sintéticos resultó alta como se muestra en la Figura 16, Figura 17, Figura 28, Figura 29, Figura 40, y Figura 41 respectivamente.

La baja correlación que se observa en la Figura 16, Figura 28 y Figura 40 se debe a que en el cálculo de la precipitación media está considerado el máximo; es decir, que la correlación que se obtiene es espuria, como se ha mencionado reiteradamente en este trabajo.

Debido a la baja correlación que se observa, se define el índice de extensión espacial, con lo que se demuestra que la magnitud de las precipitaciones máximas está correlacionada con la extensión espacial de las tormentas, de tal manera que las tormentas con precipitaciones máximas grandes tienden a ser menos extensas.

La tabla siguiente presenta si se reprodujeron adecuadamente los estadísticos de la generación sintética.

Reproducción de estadísticos	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3
Media	Muy buena	Muy buena	Muy buena
Desv. Estándar	Muy buena	Muy buena	Muy buena
Coef. Asimetría	Muy buena	Regular	Regular

En el caso de las asimetrías, se logró una buena correspondencia entre los valores generados y los históricos, aunque en este caso la correlación entre ambos fue menor, lo que parece lógico si se considera que se trata de un estadístico que depende del tercer momento de la función de distribución de probabilidades, usualmente difícil de reproducir.

Esto indica que el primer procedimiento puede reproducir adecuadamente las distribuciones de probabilidad de las tormentas históricas, las correlaciones de precipitaciones y los estadísticos, siempre que se utilicen umbrales con extremos en los valores mayor y promedio.

Se concluye que el método en su primer procedimiento se puede aplicar, para cada uno de los casos estudiados y se obtendrán valores generados sintéticamente que representarán de manera adecuada a los históricos.

Por lo anterior, se propone la modificación del procedimiento de generación de tormentas sintéticas, de manera que la selección de la tormenta que debía escalarse dependiera del valor máximo que se generara aleatoriamente. Al utilizar este segundo procedimiento de generación se buscó lograr la mejora respecto del primer procedimiento.

Al igual que en el anterior procedimiento, se estudian las precipitaciones obtenidas para cada una de las 6 estaciones en la muestra generada sintéticamente, la tabla siguiente presenta si se reprodujo adecuadamente la función de distribución de las medias espaciales de las tormentas históricas máximas y medias.

Segundo Procedimiento

Reproducción Tormentas Históricas	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3
Máximas	Muy buena	Buena	Muy buena
Medias	Muy buena	Regular	Muy buena

Como se muestra claramente en la Figura 59, Figura 60, Figura 69, Figura 70, Figura 79, Figura 80.

La tabla siguiente presenta si se reprodujo adecuadamente la correlación entre los valores máximos y los medios.

Segundo Procedimiento

Reproducción Correlación Máx vs Med	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3	
Históricos	Baja	0.0024	0.0551	0.1342
Sintéticos	Baja	0.0006	0.1335	0.4581
	Buena	Regular	Mala	

Para las tormentas históricas y para los sintéticos resultó baja como se muestra en la Figura 16, Figura 61, Figura 28, Figura 71, Figura 40, y Figura 81 respectivamente.

De acuerdo con la tabla anterior y la definición de índice de extensión espacial, se afirma que la magnitud de las precipitaciones máximas está correlacionada con la extensión espacial de las tormentas, ya que para cada uno de los umbrales el comportamiento es similar, en la generación de datos sintéticos y los históricos y por lo tanto, el segundo procedimiento lo mejora con respecto del primer procedimiento.

La tabla siguiente presenta si se reprodujeron adecuadamente los estadísticos de la generación sintética en el segundo procedimiento.

Segundo Procedimiento

Reproducción de estadísticos	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3
Media	Muy buena	Muy buena	Buena
Desv. Estándar	Muy buena	Muy buena	Regular
Coef. Asimetría	Muy buena	Regular	Muy buena

Se concluye que el método en su segundo procedimiento se puede aplicar, para cada uno de los casos estudiados y se obtendrán valores generados sintéticamente que representarán de manera adecuada a los históricos.

Finalmente para dejar claro que procedimiento generador de datos sintéticos representan mejor a los datos históricos, se hace la comparación mediante los coeficientes de determinación calculados para cada uno de los casos, mostrándose los resultados a continuación:

C_{det}				
Procedimiento	Estadístico	Umbral 1	Umbral 2	Umbral 3
1er	Media	0.9753	0.9303	0.9798
	Desv. Estándar	0.8627	0.7247	0.7999
	Coef. Asimetría	0.8031	0.433	-0.001
2do	Media	0.9336	0.8966	0.7679
	Desv. Estándar	0.9063	0.8274	0.4012
	Coef. Asimetría	0.7826	0.5411	0.9115

Por lo anterior, se afirma que el segundo procedimiento mejora la generación de datos sintéticos, sin lugar a dudas.

Como consecuencia no esperada se puede señalar que cuando se considera dividir la serie histórica de tormentas máximas en dos grupos se identifica una correlación relativamente alta en el segundo grupo para todos los casos, lo cual no se contemplaba y ello motiva a que en la segunda etapa se sugiera hacer una separación de las tormentas máximas en tres grupos para observar si con ello mejora el proceso de generación sintética.

Se observa reiteradamente la importancia de la correlación entre la forma de la tormenta, expresada por el índice de extensión espacial, y la magnitud de la precipitación máxima.

La propuesta de relacionar las precipitaciones máximas (en el centro de cada tormenta) con su extensión usando un índice de extensión espacial en lugar del promedio permitió ver que las tormentas con mayores valores máximos son menos extensas.

En este trabajo se demuestra que los resultados se optimizaron al pasar de 1 a 2 subconjuntos, por lo tanto una línea de trabajo a continuar es la definición del número de subconjuntos óptimo en los que se debería dividir a las tormentas históricas, para incrementar la similitud estadística de los datos sintéticos e históricos.

Igualmente el trabajo consigue perfeccionar adicionalmente si las tormentas sintéticas generadas se consiguieran agrupar por años relacionando su tiempo de ocurrencia a un proceso de Poisson. De esta forma es posible construir series de máximos anuales de cualquier evento. Al ajustar funciones de distribución de probabilidades a dichas series es posible hacer extrapolaciones para distintos eventos de diseño que suelen usarse en obras hidráulicas.

El método propuesto es sencillo de implementar, y los resultados obtenidos son adecuados, dado que se cumple con el requisito básico de reproducir adecuadamente los estadísticos de las tormentas históricas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arganis-Juárez M. L., R Domínguez- Mora, H. L. Cisneros-Iturbe and G. E. Fuentes-Mariles, 2008. Génération d'échantillons synthétiques des volumes mensuels écoulés de deux barrages utilisant la Méthode de Svanidze Modifiée. *J. Hydrological Sciences*. 53, 130-141.
2. Arnaud P., J. Lavabre. Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls. *Hydrological Sciences-Journal~des Sciences Hydrologiques*, 44(3) June (1999) 433-443
3. Arnaud, P., J. Lavabre and M. Masson, 1999. Amélioration des performances d'un modèle stochastique de génération de hyétoigrammes horaires : application au pourtour méditerranéen français. *Revue des sciences de l'eau / J. of Water Science*. 12, 251-271.
4. Arnaud P., J.A. Fine, J. Lavabre, 2007. A hourly rainfall generation model applicable to all types of climate. *Atmosphere Research* 85 230-242
5. Bouvier C., L. Cisneros, R. Domínguez, J-P. Labord and T Lebel, 2003. Generating Rainfall fields using principal components (PC) decomposition of the covariance matrix: a case study in Mexico City. *J. of Hydrology*. 8, 107-120.
6. Bogárdi J. J., L. Duckstein and O. H. Rubambo, 1988. Practical generation of synthetic rainfall time series event in a semi-arid climatic zone. *J. of Hydrology*. 103, 357-373.
7. Cernesson F., J. Lavabre, J.M., Masson, 1996. Stochastic model for generating hourly hyetographs. *Atmospheric Research* 42 149-161
8. Cisneros L., C. Bouvier and R Domínguez-Mora, 1998. Aplicación del método Kriging en la construcción de campos de tormenta en la Ciudad de México. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Asociación Mexicana de Hidráulica e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Oaxaca, México, Octubre.
9. Cole, J.A., J. D. F. Sherriff, Some single- and multi-site models of rainfall, within discrete time increments *Journal of hidrology* 17 (1972) 97-113
10. Delleur J. W. and M. L. Kavvas, 1978. Stochastic models for monthly rainfall forecasting and synthetic generation. *J. of Applied Meteorology*. 17, 1528-1536.
11. Domínguez-Mora R., M. L. Arganis Juárez¹, A. Mendoza R., E. Carrizosa Elizondo, B. Echavarría S. Storm generator method that preserves their historical statistical characteristics. Application to Mexico City basin daily rainfall fields. Aceptado. *Atmósfera* (2012)

12. Echávez-Aldape G., R. Arrijoa-Jiménez R., 2006. Aplicaciones de la Correlación Espuria a la Ingeniería Hidráulica. Memorias del XIX Congreso Nacional de Hidráulica, Cuernavaca, Mor., México. Octubre.
13. Cernesson F., Jacques Lavabre, Jean-Marie Masson. Stochastic model for generating hourly hyetographs. *Atmospheric Research* 42 (1996) 149-161
14. Fowler H. J., C. G. Kilsby, P. E. O'Connell, A. Burton, 2005. A Weather type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of scenarios of climatic variability and change. *J. of Hydrology*. 308, 50-66.
15. Frost A.J., S.P. Charles, B. Timbal, F. Chiew, R. Mehrotra, K.C. Nguyen, R.E. Chandler, J. McGregor, G. Fu, D. Kirono, E. Fernandez. D.M. Kent. A comparison of multi-site daily rainfall downscaling techniques under Australian conditions. *Journal of Hydrology*. 408 (2011) 1-18
16. Geng S., F. W. T. Penning de Vries, I. Supit, 1986. A Simple method for generating rainfall data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 36, 363-373.
17. Guichard-Romero. D., R. Domínguez-Mora, F. Francés-García, R. García-Bartual, 2009. Análisis de la densidad de estaciones en zonas de lluvias convectivas. Caso del mediterráneo español. *Ingeniería Hidráulica en México*. 24, 35-49.
18. Jiménez E. M., 1996. Programa AX. Área de Riesgos Hidrometeorológicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.
19. Koutsoyiannis D., C. Onof, Rainfall disaggregation using adjusting procedures on a Poisson cluster model, *Journal of Hidrology* 246 (2001) 109-122
20. Licznar C., J. Lomotosky D.E. Rupp. Random cascade driven rainfall disaggregation for urban hydrology: An evaluation of six models and a new generator. *Atmospheric Research*. 99 (2011) 563-578
21. Mehrotra R., A. Sharma, 2006. Conditional Resampling of hydrologic time series using multiple predictor variables: A K-nearest neighbour approach. *Advances in Water Resources*. 29, 987-999
22. Mehrotra R., R. Srikanthan, A. Sharma, 2006. A comparison of three stochastic multi-site precipitation occurrence generators. *Journal of Hydrology* 331, 280-292
23. Molnar P., P. Bourlando, 2005. Preservation of rainfall properties in stochastic disaggregation by simple random cascade model. *Atmospheric Research* 77, 137-151

24. Rodríguez-Iturbe, I., P.S. Eagleson, 1987. Water Resources research, vol. 23, NO. 1, 181-190 January 1987. Mathematical models of rainstorm events in space and time. Water Resources research, vol. 23, NO. 1, 181-190 January
25. Salsón S., García-Bartual, R., (2003) "A space-time rainfall generator for highly convective Mediterranean rainstorms". Natural Hazards and Heart System Sciences, 3:103-114.
26. Schertzer D., S. Lovejoy, 1987. Physical Modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes. Journal of geophysical research Vol. 92, No D8 9693-9714, Aug 20
27. Schertzer D., S. Lovejoy, 2009. Physical Modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes. Journal of Hydrology 375 273-286
28. Srikanthan R., T. A. Mc Mahon, 2001. Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. Hydrology and Earth System Sciences. 5, 653-670.
29. Svanidze G.G., 1980. Mathematical modeling of hydrologic Series. Water Resources Publications, USA, 314 pp. SE ENCUENTRA EN LA LIBRERÍA DEL POSGRADO
30. Vischel T., T. Lebel, S. Massuel, B. Cappelaere. Conditional simulation schemes of rain fields and their application to modeling studies in the Sahel. Journal of Hydrology. 375 (2009) 273-286
31. Waymire E., V.K. Gupta. The mathematical structure of rainfall representations 1. A review of the state of the stochastic rainfall models (1981) Water Resources Research. Vol 17, No 5. pp. 1261-1272
32. Wilks D. S., 1998. Multisite generalization of daily stochastic precipitation generation model. J. of Hydrology. 210, 178-191
33. Zimmermann E. Modificaciones en los procesos hidrológicos provocados por el riego complementario en un área de llanura. (1998). XVII Congreso Nacional del Agua. Santa Fe. Argentina. Vol 2. Pp. 278-289