



**Universidad  
Tecnológica  
de Bolívar**

CARTAGENA DE INDIAS



**ACREDITADA  
INSTITUCIONALMENTE**

Resolución MEN 1166 de 2011

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS  
INTENSIDAD- DURACIÓN –FRECUENCIA, UTILIZANDO DISTRIBUCIONES  
MIXTAS DE PROBABILIDAD. CASO DE ESTUDIO, ESTACIÓN SINÓPTICA  
PRINCIPAL AEROPUERTO RAFAEL NÚÑEZ.**

**SINDY L. PUELLO LÓPEZ**

**ELIANA P. ROMERO VALIENTE**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS D.T y C**

**2012**



**Universidad  
Tecnológica  
de Bolívar**

CARTAGENA DE INDIAS



**ACREDITADA  
INSTITUCIONALMENTE**  
Resolución MEN 1166 de 2011

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS  
INTENSIDAD- DURACIÓN –FRECUENCIA, UTILIZANDO DISTRIBUCIONES  
MIXTAS DE PROBABILIDAD. CASO DE ESTUDIO, ESTACIÓN SINÓPTICA  
PRINCIPAL AEROPUERTO RAFAEL NÚÑEZ.**

**SINDY L. PUELLO LÓPEZ**

**COD: T00019684**

**ELIANA P. ROMERO VALIENTE**

**COD: T00018799**

Proyecto como requisito para obtener el título de

Ingeniero civil

**Director**

Oscar coronado

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS D.T y C**

**2012**

Cartagena de Indias D.T. y C. 2012

Señores

**COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

Cordial saludo.

Por medio de la presente estoy haciéndoles entrega del Informe Final del proyecto de grado titulado: **“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD- DURACIÓN –FRECUENCIA, UTILIZANDO DISTRIBUCIONES MIXTAS DE PROBABILIDAD. CASO DE ESTUDIO, ESTACIÓN SINÓPTICA PRINCIPAL AEROPUERTO RAFAEL NÚÑEZ.”**, como requisito reglamentario para optar al título de ingeniería civil.

Atentamente,

**SINDY L. PUELLO LÓPEZ**

Código: T00019684

CC. 1.051.668.288 Mompox

**ELIANA P. ROMERO VALIENTE**

Código: T00018799

CC.1.143.353.892 Cartagena

## Modelo carta cesión de derechos patrimoniales

Cartagena de Indias, D.T.y C., 2013

Yo, **SINDY L. PUELLO LÓPEZ**, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado **“PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD- DURACIÓN –FRECUENCIA, UTILIZANDO DISTRIBUCIONES MIXTAS DE PROBABILIDAD. CASO DE ESTUDIO, ESTACIÓN SINÓPTICA PRINCIPAL AEROPUERTO RAFAEL NÚÑEZ”**, producto de mi actividad académica para optar el título de INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la ley 23 de 1982. En consecuencia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

---

**SINDY L. PUELLO LÓPEZ**



CC. 1.051.668.288 Mompox.

## Modelo carta cesión de derechos patrimoniales

Cartagena de Indias, D.T.y C., 2013

Yo, **ELIANA P. ROMERO VALIENTE**, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado “**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN –FRECUENCIA, UTILIZANDO DISTRIBUCIONES MIXTAS DE PROBABILIDAD. CASO DE ESTUDIO, ESTACIÓN SINÓPTICA PRINCIPAL AEROPUERTO RAFAEL NÚÑEZ**”, producto de mi actividad académica para optar el título de **INGENIERÍA CIVIL** de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la ley 23 de 1982. En consecuencia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

---

**ELIANA P. ROMERO VALIENTE**

CC. 1.143.353.892 Cartagena.

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma de presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Cartagena de Indias D.T. y C. 2012

## AGRADECIMIENTOS

A Dios primeramente creador del universo y dueño de mi vida, que me dio la sabiduría necesaria para alcanzar finalizar esta etapa de mi vida.

A mis padres, Jorge Romero Silva y Etil Valiente Gómez, por el apoyo incondicional que me dieron a lo largo de mi carrera, sin ellos este sueño no sería real.

A mis hermanos, abuelos, tíos y primos por su ayuda y apoyo absoluto.

A mis amigos, los que llegaron conmigo y a los que encontré durante el camino recorrido porque sentí su compañía y su respaldo durante todo este proceso, porque con ellos también crecí tanto como persona como profesional.

A todos ellos doy gracias por que hicieron parte de este proceso, porque me acompañaron con su respaldo y cariño porque hoy mi sueño se hizo realidad.

**Eliana Romero Valiente**

Primeramente agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad, amor y por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio. A mis padres, Gloria y Eduardo, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor. A mis hermanos y sobrinas, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo. A los amigos que siempre están presentes en los buenos y malos momentos y a todas y cada una de aquellas personas que influyeron de manera positiva, para que hoy finalice esta etapa en mi vida.

**Sindy Puello López**

Agradecemos a nuestro profesor el Ingeniero Oscar Coronado por el soporte, asesoría y dirección en el trabajo de investigación.

A todas las directivas y profesores de la Universidad tecnológica de Bolívar, a través de cada uno de ellos aprendimos a tener pasión por nuestra carrera y hoy ingresamos al mundo laboral para aportar conocimiento a la sociedad.



## Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN .....	12
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	15
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	16
1.3. DELIMITACIÓN DEL TEMA.....	16
2. JUSTIFICACIÓN.....	17
3. OBJETIVOS.....	19
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	19
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	19
4. MARCO REFERENCIAL.....	20
4.1. MARCO TEORICO .....	20
4.1.1. Curvas de Intensidad- Duración-Frecuencia (IDF) .....	20
4.2. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD.....	22
4.2.1. Distribución Normal .....	22
4.2.2. Distribución Log-normal.....	26
4.2.3. Distribución Gumbel .....	28
4.2.4. Distribución Pearson III o Gamma de tres parámetros .....	30
4.2.5. Distribución de Gev .....	31
4.3. PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE, CHI CUADRADO.....	32
4.4. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN MIXTAS DE PROBABILIDAD.....	33
4.5. ESTADO ACTUAL DE LAS CURVAS IDF.....	36
4.6. FENÓMENOS ENSO: NIÑO Y NIÑA.....	38
4.7. HURACANES.....	41
4.7.1. Fenómenos Tropicales en Colombia .....	46
5. METODOLOGÍA .....	51
5.1. TIPO DE ESTUDIO .....	51
5.2. FUENTES Y TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	53
5.2.1. Fuente primaria: .....	53
5.2.2. Fuentes secundarias: .....	53
5.2.3. Tratamiento de la información .....	53
6. CASO DE ESTUDIO.....	55
6.1. Época Seca .....	55
6.2. Época Húmeda .....	55
6.3. Época de Transición.....	56
6.4. Curva de Intensidad Duración Frecuencia IDF de la Ciudad de Cartagena.....	56
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57



Universidad  
Tecnológica  
de Bolívar



ACREDITADA  
INSTITUCIONALMENTE

CARTAGENA DE INDIAS

Resolución MEN 1166 de 2011

7.1. Cálculo de curva IDF (período 1970-2010).....	57
7.1.1. Diseño de ecuación para obtención de curvas IDF una población. ..	78
7.2. Elaboración de las curvas IDF con la distribución mixta de probabilidad Gumbel-Gumbel.....	85
7.2.1. Ecuación de diseño de las curvas IDF para dos poblaciones.....	120
7.2.2. Ecuación de Diseño Curva IDF-Envolvente superior.....	125
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	130
9. BIBLIOGRAFIA .....	133

## Tabla de Ilustraciones.

<i>Ilustración 1. Distribución Normal. Fuente Fundamentos de Hidrología de Superficie. Página 254.</i>	23
<i>Ilustración 2. .Distribución Normal. Fuente Fundamentos de Hidrología de Superficie. Página 284.</i>	25
<i>Ilustración 3. Función de distribución Log-normal. Fuente Fundamentos de Hidrología de Superficie. Página 258.</i>	27
<i>Ilustración 4. Recorrido Tormenta Tropical Bret.</i>	46
<i>Ilustración 5. Recorrido Huracán Cesar - Douglas.</i>	47
<i>Ilustración 6. Recorrido Huracán Joan - Miriam.</i>	48
<i>Ilustración 7. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 10 minutos.</i>	70
<i>Ilustración 8. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 20 minutos.</i>	71
<i>Ilustración 9. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 30 minutos.</i>	72
<i>Ilustración 10. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 60 minutos.</i>	73
<i>Ilustración 11. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 120 minutos.</i>	74
<i>Ilustración 12. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 180 minutos.</i>	75
<i>Ilustración 13. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 240 minutos.</i>	76
<i>Ilustración 14. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 360 minutos.</i>	77
<i>Ilustración 15. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 360 minutos.</i>	79
<i>Ilustración 16. Valores de las Intensidades, para cada una de las ecuaciones (UTB y UDC).</i>	84
<i>Ilustración 17. R2 Vs C.</i>	121
<i>Ilustración 18. Comparación dos poblaciones Vs una población.</i>	124
<i>Ilustración 19. Curva Intensidad- Duración- Frecuencia- Envolverte Superior.</i>	129

## INTRODUCCIÓN

Los extremos hidrológicos y, en particular, las precipitaciones causantes de inundaciones son eventos naturales que han existido desde la antigüedad. En el presente siglo, han sido muchos los eventos de este tipo en todo el mundo. En los últimos años, los daños producidos por los extremos hidrológicos se han incrementado. Estos han producido mayores daños debido al crecimiento poblacional y la urbanización en sitios de potencial peligro.<sup>1</sup>

Los fenómenos asociados a los eventos El Niño y La Niña (ENSO) y los huracanes influyen en el clima del mundo entero con consecuencias que pueden llegar a ser dramáticas en lo que se refiere a los excesos o déficit de agua (inundaciones, sequías, ciclones o incendios). Existen evidencias sobre el incremento de eventos extremos y cambios abruptos del clima, altamente inusuales que hacen padecer grandes inundaciones y fuertes sequías sin dar tiempo a una posible adaptación a dicha variabilidad.<sup>2</sup> En los últimos años el incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos, se ha hecho más evidente, afectando altamente, no solo a la infraestructura urbana, sino a diferentes actividades económicas.<sup>3</sup> Por esto se hace necesario desarrollar metodologías capaces de estimar de una manera más eficiente y que responda a las necesidades de los cambios que se están presentando a nivel hidrológico, permitiendo así una mejor planificación para enfrentar dichos eventos. Por lo anterior, el enfoque más confiable y eficiente para la estimación

---

<sup>1</sup> Edison Heredia Calderón (1998). Una Metodología de Análisis Regional de Frecuencia de Lluvias Intensas Adecuadas para Zonas Bajo los Efectos de “El Niño”. *Bulletin de l’Institut Francais d’Études Andines*, Tomo 27, número 3. Página 667-673.

<sup>2</sup> Olga Umpiérrez (ponencia). Análisis de Impactos Hidrológicos de “El Niño” – Compilación, Estudios de Investigación.

<sup>3</sup> Olga Umpiérrez (ponencia). Análisis de Impactos Hidrológicos de “El Niño” – Compilación, Estudios de Investigación.

de estos eventos hidrológicos es la aplicación de métodos que tomen en cuenta las condiciones físicas actuales y/o futuras de las áreas o cuencas. La aplicación de estos métodos comienza con el establecimiento de las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), las cuales representan las características relevantes de los eventos que ocurren en la zona.<sup>4</sup>

Las Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia pueden definirse como la curva resultante de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno.<sup>5</sup> Donde la duración es el tiempo comprendido entre el comienzo y el final del evento; la intensidad se puede definir como el volumen de precipitación o altura equivalente de precipitación por unidad de tiempo (mm/hora) y la frecuencia se considera como una medida de la probabilidad de ocurrencia de que un evento sea igualado o excedido por lo menos una vez al año.

La utilización de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), son de gran importancia en el diseño de obras de ingeniería. Hoy día siguen siendo una de las herramientas más utilizadas en la estimación de caudales de diseño, y de tormentas de diseño en sitios donde, debido a la falta de información de caudales, es necesario recurrir a los modelos Lluvia-escorrentía para el cálculo de los caudales máximos, lo que lleva a la utilización de metodologías que no son propias de la zona de estudio, causando así la subestimación o sobrestimación de los resultados<sup>6</sup>. Además, estas nos proporcionan información sobre el comportamiento hidrológico de cuencas, ya que algunas

---

<sup>4</sup> Campos – Aranda (2008). Rainfall Maximun Intensities for Urban Hydrological Design in Mexican Republic. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.

<sup>5</sup> Roberto Pizarro; Juan Flores; Claudia Sangüesa; Enzo Martínez ( ). Modulo 2 Curvas de Intensidad Duración Frecuencia IDF. Sociedad estándares de ingeniería para aguas y suelos.

<sup>6</sup> Jaime Vélez; German Poveda; Oscar Mesa; Carlos Hoyos; Fredy Mejía, Diana Quevedo; Luis Salazar; Sara Vieira. Aplicación de Diferentes Metodologías Para Estimación de Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

suelen ser afectadas por la incidencia de ciclones tropicales y como consecuencia de esto, las precipitaciones que se registran en las estaciones de medición, están constituidas por dos eventos diferentes: el primero correspondiente a los valores ordinarios de la época de lluvia, mientras que el segundo está asociado con los eventos que producen la incidencia de ciclones o eventos macroclimáticos. Lo que principalmente puede presentarse en las zonas costeras, ya que estas están muchos más expuestas, en relación con otras zonas, a la incidencia de ciclones tropicales.<sup>7</sup>

En la presente propuesta metodológica se plantearán los lineamientos para la elaboración de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia, utilizando información hidrológica de una serie de eventos desarrollados los últimos años en la ciudad de Cartagena, en la cual se tendrán en cuenta la ocurrencia de dos eventos mencionados con anterioridad, dichos lineamientos se basarán en la utilización de distribuciones mixtas de probabilidad, las cuales son el resultado de la sumatoria de la función de distribución de probabilidad de cada muestra, para nuestro caso de cada una de las poblaciones a analizar, la población afectada o época en que se presentan los eventos ciclónicos y la que es afectada por los eventos no ciclónicos. Para el modelamiento matemático se utilizó las distribuciones mixtas de probabilidad desarrolladas por Emil Julius Gumbel en 1958, las cuales tiene en cuenta eventos ciclónicos y no ciclónicos en una misma población.

---

<sup>7</sup> Campos – Aranda (2008). Rainfall Maximun Intensities for Urban Hydrological Design in Mexican Republic. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ingeniería civil, es la encargada de la construcción de infraestructura, tales como vías, acueductos y alcantarillados, vivienda, etc. Una de las ramas de esta es la parte encargada de aspectos hidráulicos e hidrológicos, los cuales se han convertido en una de las temáticas de más notada importancia, ya que dependiendo de algunos estudios, que se relacionan con estos, se puede llevar a cabo una planificación adecuada de las obras de infraestructura que se van a ejecutar, por lo que se hace necesario conocer, con la mayor certeza, los resultados de estas investigaciones.

Los estudios hidrológicos que en la actualidad se han realizado en lo que tiene que ver con las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia IDF, abarcan las intensidades de las lluvias y no se tiene en cuenta otro tipo de eventos, es decir, se tiene en cuenta un único comportamiento. Otros eventos como lo es la actividad que ejercen los vientos, deberían ser tomados en cuenta para la modelación de dichas curvas. Por este comportamiento se ven influenciadas, en su mayoría, ciudades costeras, como la ciudad de Cartagena.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, en esta investigación se realizará una propuesta para la construcción de curvas IDF teniendo en cuenta fenómenos ciclónicos que se presentan en la ciudad, escogiendo la distribución de probabilidad que más se ajuste a las condiciones hidrológicas de la misma, ya sea Gumbel, Normal, Log – normal, Pearson, Gev u otras.

## 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Se escogerán las cartas pluviográficas que registren las precipitaciones más altas para la ciudad de Cartagena, en la estación del IDEAM, Sinóptica Principal aeropuerto Rafael Núñez, para establecer la construcción de las curvas de intensidad duración frecuencia, teniendo en cuenta los eventos extremos presentes en la ciudad. ¿De qué manera se puede lograr la construcción de la Curva IDF de la ciudad de Cartagena teniendo en cuenta los fenómenos ENSO (niño y niña) y los huracanes?

## 1.3. DELIMITACIÓN DEL TEMA

Este trabajo será desarrollado en la Universidad Tecnológica de Bolívar a partir de los datos, de cartas pluviográficas, suministrados por el IDEAM (instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia) y de artículos que tengan relación con el tema a tratar, Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia, que se recopilen.



## 2. JUSTIFICACIÓN

El clima de Colombia, en general está determinado por su situación geográfica (en la zona ecuatorial) y por la influencia de algunos factores como la circulación atmosférica, el relieve, la influencia de los procesos del Océano Pacífico y del Océano Atlántico. El Océano Atlántico influye en el clima nacional a través de los centros permanentes de alta presión. Esta influencia se pone de manifiesto principalmente en la distribución estacional de los vientos y la precipitación. De la misma manera, el clima nacional, particularmente el de las áreas marítimas e insulares del Caribe colombiano y del Norte del territorio continental, se ve frecuentemente influenciado por los ciclones tropicales que nacen sobre el Atlántico tropical.<sup>8</sup> Algunos eventos presentes en esta zona del país, como lo es la afectación de ciclones tropicales no es tenido en cuenta, ya que solo suelen presentarse o acentuarse de manera significativa en determinadas épocas, o en presencia de fenómenos como los son el Niño o la Niña. Se ha identificado que en la variabilidad climática interanual del territorio colombiano, los procesos del Pacífico como El Niño-La Niña-Oscilación del Sur juegan un papel importante.<sup>9</sup>

Los recientes fenómenos naturales que han afectado el país, han dejado al descubierto el deficiente estudio en cuanto a la ocurrencia de eventos y fenómenos hidrológicos que han causado grandes daños en todo el territorio nacional<sup>10</sup>, afectando no solo su infraestructura sino también su economía, dejando incluso, vidas humanas comprometidas.

---

<sup>8</sup> CIOH. Características Climáticas y Oceanográficas del Fenómeno del Niño en Colombia. Capítulo 1. Páginas 19 – 27.

<sup>9</sup> CIOH. Características Climáticas y Oceanográficas del Fenómeno del Niño en Colombia. Capítulo 1. Páginas 19 – 27.

<sup>10</sup> Jaime Vélez; German Poveda; Oscar Mesa; Carlos Hoyos; Fredy Mejía, Diana Quevedo; Luis Salazar; Sara Vieira. Aplicación de Diferentes Metodologías Para Estimación de Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

La región Caribe, como ya se dijo es una zona del país que se ve afectada por la influencia del océano Atlántico, y por tanto por la ocurrencia de ciertos fenómenos hidrológicos, ya sean eventos de precipitaciones, o eventos que tengan que ver con la incidencia de ciclones. En esta zona del país, según informes del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), se presentan eventos de carácter ciclónico, durante ciertos meses del año, lo cual denota la importancia de un estudio más detallado de la hidrología de esta región, debido a la gran cantidad de actividades productivas desarrolladas, las cuales se pueden ver gravemente afectadas y pueden sufrir grandes pérdidas, en caso de no prever la ocurrencia de un evento de tales características.

La ciudad de Cartagena está ubicada en la costa Caribe colombiana, y por ser una ciudad costera, está expuesta a los eventos mencionados con anterioridad, afectando especialmente, zonas marginales en la cuales, las inundaciones que en ocasiones se presentan han dejado resultados fatales. Observando los eventos ocurridos en los últimos años, consideramos que es un tema de mucha importancia que no solo interviene en la economía de un país, sino también en la parte social y sabiendo que esto no se tiene en cuenta en la ciudad, se procedió a la elaboración de una propuesta, en la cual se tiene en cuenta el modelamiento matemático de eventos ciclónicos y no ciclónicos, desarrollando las curvas IDF, mediante herramientas estadísticas que proveen este tipo de comportamiento, como lo es el que se presenta en la ciudad.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

- Elaborar una propuesta metodológica para estimar curvas intensidad-duración –frecuencia empleando distribuciones mixtas de probabilidad que tengan en cuenta los fenómenos de la Niña y huracanes.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar registros pluviograficos de la estación sinóptica principal Aeropuerto Rafael Núñez para la elaboración de curvas IDF, considerando el efecto de eventos ciclónicos, eventos macroclimáticos y cambio climático.
- Validar la curva IDF existente en la ciudad de Cartagena, con la calculada a partir de los datos suministrados por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- Utilizar distintas distribuciones de probabilidad (simples y mixtas) para evaluar su bondad de ajuste.
- Comparar la tendencia de los datos de curvas IDF determinados a partir de distribuciones hidrológicas sencillas y mixtas.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1. MARCO TEORICO

#### 4.1.1. Curvas de Intensidad- Duración-Frecuencia (IDF)

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o periodo de retorno. Junto con estas, surgen otros elementos a considerar, como son la intensidad de precipitación, la frecuencia o la probabilidad de excedencia de un determinado evento.<sup>11</sup>

Para la construcción de estas curvas, muchos autores han propuesto distintas formas, entre las que se encuentra:

1. Se obtienen los registros pluviográficos de la estación más cerca de la zona. Mínimo se recomienda 10 años de período de registro.
2. Se identifican las alturas máximas en 24 horas anuales. Se obtienen profundidades para duraciones de 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360 minutos. Es importante tener en cuenta que no necesariamente los eventos máximos coinciden con el mismo evento histórico.
3. Se generan las series anuales de precipitación para cada una de las duraciones anteriores.
4. Tomar los valores de cada una de las series y dividirlos por su duración (en horas), obteniéndose así las intensidades en mm/h.
5. Ajustar, para cada duración, los valores de intensidad de precipitación a una función de distribución de probabilidad (Gumbel, log normal, normal, log Pearson, etc.)

---

<sup>11</sup> Roberto Pizarro; Juan Flores; Claudia Sangüesa; Enzo Martínez ( ). Modulo 2 Curvas de Intensidad Duración Frecuencia IDF. Sociedad estándares de ingeniería para aguas y suelos.

6. Seleccionada la distribución probabilística de mejor ajuste, proceder a estimar, para cada duración, los valores de las intensidades máximas correspondientes a diferentes períodos de retorno ( $T= 2, 5, 10, 25, 50, 100$  y  $200$  años).
7. Se procede a graficar las intensidades obtenidas en el paso anterior versus las duraciones y periodos de retorno correspondientes.
8. Las distintas curvas IDF pueden quedar descritas estadísticamente mediante la siguiente ecuación compacta que relaciona simultáneamente a las tres variables involucradas:

$$I = \frac{k*(T)^m}{(d+c)^n} \quad (4.1)$$

Dónde:

$I$ : Intensidad de lluvia asociada a un periodo de retorno, en mm/h.

$T$ : Periodo de retorno, en años.

$d$ : Duración, en horas.

$K, m, n$  y  $c$ : Constante de regresión.

La intensidad puede relacionarse también de la siguiente forma

$$I = c(t + d)^e \quad (4.2)$$

Dónde:

$I$ : Intensidad de lluvia asociada a un periodo de retorno, en mm/h.

$t$ : Duración, en horas.

$c, d, e$ : constantes de regresión.

Una vez que se asigna un periodo de retorno al caudal de diseño de la obra en cuestión, generalmente es necesario, para conocer dicho caudal de diseño, hacer extrapolaciones a partir de los caudales máximos anuales registrados, pues rara vez este periodo es menor al periodo de. Aunque este método puede dar muy buenos resultados si se aplica por una persona con experiencia, tiene la desventaja de la subjetividad. Para eliminar esta subjetividad se debe buscar entre las distintas funciones de distribución de probabilidad teóricas la que se ajuste mejor a los datos medidos, y usar esta función para la extrapolación.

## 4.2. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

Entre las funciones de probabilidad utilizadas en hidrología, se destacan las siguientes:

### 4.2.1. Distribución Normal

La distribución normal fue reconocida por primera vez por el francés Abraham de Moivre (1667-1754). Posteriormente, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) elaboró desarrollos más profundos y formuló la ecuación de la curva; de ahí que también se la conozca, más comúnmente, como la "campana de Gauss".

La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, denotadas generalmente por  $\mu$  y  $\sigma$ , estos parámetros determinan la forma de la función  $f(x)$  y su posición en el eje  $x$ . Por lo que la función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.3)$$

La forma de la campana de Gauss depende de los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ . La media indica la posición de la campana, de modo que para diferentes valores

de  $\mu$  la gráfica es desplazada a lo largo del eje horizontal. Por otra parte, la desviación estándar determina el grado de apuntamiento de la curva. Cuanto mayor sea el valor de  $\sigma$ , más se dispersarán los datos en torno a la media y la curva será más plana. Un valor pequeño de este parámetro indica, por tanto, una gran probabilidad de obtener datos cercanos al valor medio de la distribución.

Como se deduce de este último apartado, no existe una única distribución normal, sino una familia de distribuciones con una forma común, diferenciadas por los valores de su media y su varianza. De entre todas ellas, la más utilizada es la distribución normal estándar, que corresponde a una distribución de media 0 y varianza 1. Así, la función de distribución de probabilidad es:

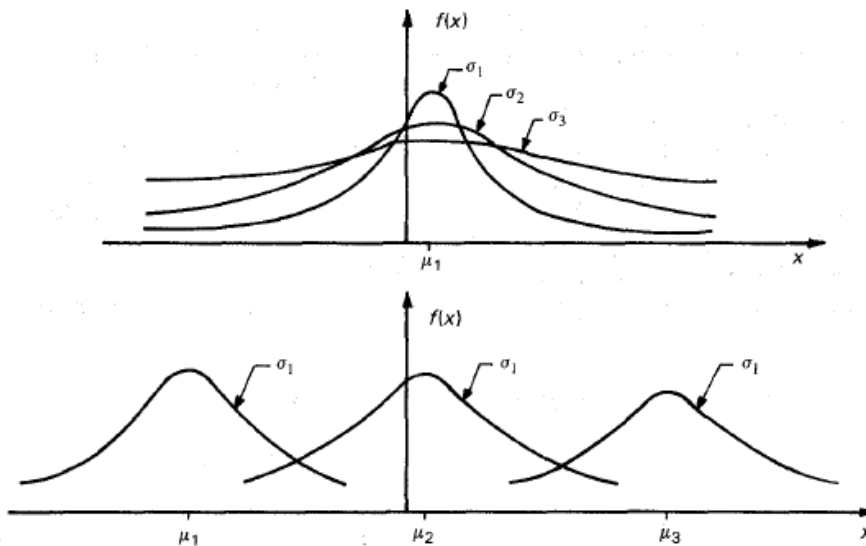


Ilustración 1. Distribución Normal. Fuente Fundamentos de Hidrología de Superficie. Página 254.

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} = F(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (4.4)$$

Donde

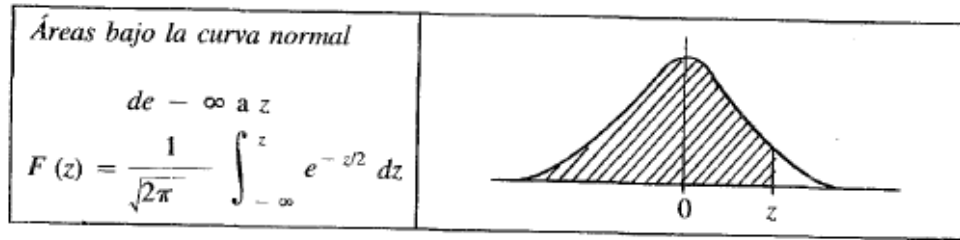
$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4.5)$$

La función  $F(z)$  se ha calculado numéricamente y se han publicado tablas de ella. Debido a que la función es simétrica, en la siguiente tabla se encuentran únicamente los valores de:

$$\int_0^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

Con lo que es posible calcular  $F(z)$  para cualquier valor de  $z$ .





z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5754
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7258	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7518	0.7549
0.7	0.7580	0.7612	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7996	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3.0	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
3.1	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
3.2	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
3.3	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
3.4	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
3.5	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
3.6	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.7	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.8	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
3.9	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Ilustración 2. Distribución Normal. Fuente Fundamentos de Hidrología de Superficie. Página 284.

#### 4.2.2. Distribución Log-normal

La distribución Log normal es una distribución asimétrica, que comienza a partir de cero, aumenta hasta llegar a un máximo y luego va disminuyendo lentamente hacia el infinito.

La Función Densidad de Probabilidad de la distribución log normal está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} \quad (4.6)$$

Donde los parámetros de la función son  $\alpha$  y  $\beta$ , que son la media y la desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria, y están definidos como sigue:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n} \quad (4.7)$$

$$\beta = \left[ \sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

Luego la función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} dx \quad (4.9)$$

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

$$z = \frac{\ln x - \alpha}{\beta} \quad (4.10)$$

La función de distribución de probabilidad entonces, sigue la siguiente tendencia:

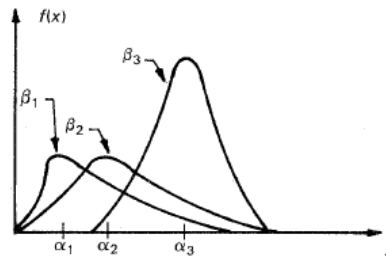


Ilustración 3. Función de distribución Log-normal. Fuente Fundamentos de Hidrología de Superficie. Página 258.

#### 4.2.2.1. Características de la Distribución Log normal

La distribución log normal se obtiene cuando los logaritmos de una Variable se describen mediante una distribución normal. Es la distribución natural a utilizar cuando las desviaciones a partir del valor del modelo están formadas por factores, proporciones o porcentajes más que por valores absolutos como es el caso de la distribución normal.

La distribución log normal tiene dos parámetros:  $m^*$  (media aritmética del logaritmo de los datos o tasa de fallos) y  $s$  (desviación estándar del logaritmo de los datos o tasa de fallos)<sup>12</sup>.

#### 4.2.2.2. Propiedades

Esta distribución se caracteriza por:

- Asigna a valores de la variable  $< 0$  la probabilidad 0 y de este modo se ajusta a las tasas y probabilidades de fallo que de esta forma sólo pueden ser positivas.
- Como depende de dos parámetros, se ajusta bien a un gran número de distribuciones empíricas.
- Es idónea para parámetros que son a su vez producto de numerosas cantidades aleatorias.
- 

<sup>12</sup> Fiabilidad de la Distribución Log normal. José María Tamborero Ing. Industrial.

### 4.2.3. Distribución Gumbel

La distribución Gumbel (1958) se ha utilizado ampliamente en la hidrología para evaluar la frecuencia de valores extremos (máximos y mínimos) y para el caso específico de eventos hidrológicos asociados con valores mínimos la forma explícita de la función de distribución es:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (4.11)$$

La función de densidad de probabilidad es entonces:

$$f(x) = \alpha e^{[-\alpha(x-\beta) - e^{-\alpha(x-\beta)}]} \quad (4.12)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la función.

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se estiman como:

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{s} \quad (4.13)$$

$$\beta = \bar{x} - \frac{\mu_y}{\alpha} \quad (4.14)$$

$\sigma_y, \mu_y$  Se pueden consultar según el número de datos en la tabla 4.2.

$\sigma_y, \mu_y$  Son, respectivamente, la media y la desviación típica de una serie de valores  $y_i (i = 1 \text{ a } N; N = n^\circ \text{ de datos de la muestra})$  que depende solamente del número de datos, y que corresponden a la siguiente expresión.

$$y_i = -\ln \left[ \ln \left[ \frac{N+1}{i} \right] \right]$$



Wanielista (1997) utiliza,  $\mu_y 0,5772$ ;  $\sigma_y = 1,2825$  sin considerar el número de datos.

Tabla 4.2. Valores de  $Y_n$  y  $S_n$  Según número de Observaciones.

Nºdatos	$y_n$	$S_n$	Nºdatos	$y_n$	$S_n$	Nºdatos	$y_n$	$S_n$
1	0,36651	0,00000	35	0,54034	1,12847	69	0,55453	1,18440
2	0,40434	0,49838	36	0,54105	1,13126	70	0,55477	1,18535
3	0,42859	0,64348	37	0,54174	1,13394	71	0,55500	1,18629
4	0,44580	0,73147	38	0,54239	1,13650	72	0,55523	1,18720
5	0,45879	0,79278	39	0,54302	1,13896	73	0,55546	1,18809
6	0,46903	0,83877	40	0,54362	1,14131	74	0,55567	1,18896
7	0,47735	0,87493	41	0,54420	1,14358	75	0,55589	1,18982
8	0,48428	0,90432	42	0,54475	1,14576	76	0,55610	1,19065
9	0,49015	0,92882	43	0,54529	1,14787	77	0,55630	1,19147
10	0,49521	0,94963	44	0,54580	1,14989	78	0,55650	1,19227
11	0,49961	0,96758	45	0,54630	1,15184	79	0,55669	1,19306
12	0,50350	0,98327	46	0,54678	1,15373	80	0,55689	1,19382
13	0,50695	0,99713	47	0,54724	1,15555	81	0,55707	1,19458
14	0,51004	1,00948	48	0,54769	1,15731	82	0,55726	1,19531
15	0,51284	1,02057	49	0,54812	1,15901	83	0,55744	1,19604
16	0,51537	1,03060	50	0,54854	1,16066	84	0,55761	1,19675
17	0,51768	1,03973	51	0,54895	1,16226	85	0,55779	1,19744
18	0,51980	1,04808	52	0,54934	1,16380	86	0,55796	1,19813
19	0,52175	1,05575	53	0,54972	1,16530	87	0,55812	1,19880
20	0,52355	1,06282	54	0,55009	1,16676	88	0,55828	1,19945
21	0,52522	1,06938	55	0,55044	1,16817	89	0,55844	1,20010
22	0,52678	1,07547	56	0,55079	1,16955	90	0,55860	1,20073
23	0,52823	1,08115	57	0,55113	1,17088	91	0,55876	1,20135
24	0,52959	1,08646	58	0,55146	1,17218	92	0,55891	1,20196
25	0,53086	1,09145	59	0,55177	1,17344	93	0,55905	1,20256
26	0,53206	1,09613	60	0,55208	1,17467	94	0,55920	1,20315
27	0,53319	1,10054	61	0,55238	1,17586	95	0,55934	1,20373
28	0,53426	1,10470	62	0,55268	1,17702	96	0,55948	1,20430
29	0,53527	1,10864	63	0,55296	1,17816	97	0,55962	1,20486
30	0,53622	1,11237	64	0,55324	1,17926	98	0,55976	1,20541
31	0,53713	1,11592	65	0,55351	1,18034	99	0,55989	1,20596
32	0,53799	1,11929	66	0,55378	1,18139	100	0,56002	1,20649
33	0,53881	1,12249	67	0,55403	1,18242	101	0,56015	1,20701



#### 4.2.4. Distribución Pearson III o Gamma de tres parámetros

Esta distribución es muy utilizada porque permite obtener resultados de aceptable confiabilidad cuando se efectúan predicciones con grandes periodos de retorno.

La expresión de su función de densidad de probabilidad es la siguiente:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left\{ \frac{x-\delta}{\delta} \right\}^{\beta-1} e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}} \quad (4.15)$$

Donde  $\alpha, \beta$  y  $\delta$  son los parámetros de la función y  $\Gamma(\beta)$  es la función Gamma. Los parámetros  $\alpha, \beta$  y  $\delta$  se evalúan a partir de  $n$  datos medidos. Asimismo los parámetros de la distribución pueden ser estimados en función del promedio  $\bar{x}$ , de la desviación estándar  $S$  de la muestra y el coeficiente de sesgo  $\gamma$ , por medio de las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}} \quad (4.16)$$

$$\beta = \left( \frac{2}{\gamma} \right)^2 \quad (4.17)$$

$$\delta = \bar{x} - \alpha\beta \quad (4.18)$$

El coeficiente de sesgo, se define como,

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3 / n}{s^3} \quad (4.19)$$

La función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\frac{x-\delta_1}{\delta_1}} \left(\frac{x-\delta_1}{\delta_1}\right)^{\beta-1} dx \quad (4.20)$$

#### 4.2.5. Distribución de Gev

La distribución General de Valores Extremos, GEV, es una generalización de la distribución de Gumbel, al añadirse un parámetro de forma,  $\kappa$ . Así, Gumbel se obtiene a partir de GEV cuando  $\kappa$  vale 0. La función de probabilidad de GEV es:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - k \left( \frac{x-\beta}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{k}-1} \cdot e^{\left[ 1 - k \left( \frac{x-\beta}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{k}}} \quad (4.21)$$

Aunque  $\kappa$  puede tomar cualquier valor, GEV sólo puede utilizarse para máximos de variables climáticas cuando  $\kappa$  es negativo, pudiendo tomar  $x$  valores en el rango  $\beta + \alpha/\kappa \leq x \leq \infty$ . Para valores positivos de  $k$  la distribución tiene una asíntota (límite superior) en  $x = \beta + \alpha/\kappa$ , por lo que se suele utilizar entonces la

distribución de Gumbel<sup>13</sup>. La función de distribución o de probabilidad acumulada es:

$$F(x \leq X) = e^{-\left[1 - k \left(\frac{x \cdot \beta}{\alpha}\right)^k\right]^{\frac{1}{k}}} \quad (4.22)$$

### 4.3. PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE, CHI CUADRADO

La bondad del ajuste de una distribución de probabilidad puede probarse comparando los valores teóricos y muestrales de las funciones de frecuencia relativa o de frecuencia acumulada. Para la función de frecuencia relativa se utiliza la prueba chi-cuadrado ( $X^2$ ). La prueba  $X^2$  está dada por la siguiente expresión<sup>14</sup>:

$$x_c^2 = \sum_{i=1}^n \frac{n[f_s(x_i) - p(x_i)]^2}{p(x_i)} \quad (4.23)$$

Donde

$n$ : Número de intervalos

$nf_s(x_i)$ : Número de ocurrencias observadas en el intervalo  $i$ .

$np(x_i)$ : Número esperado de ocurrencias en el intervalo  $i$ .

<sup>13</sup>Santiago Beguería. Revisión de métodos para estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en climatología e hidrología: el uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales. Instituto Pirenaico de Ecología. España.2002.

<sup>14</sup> Chow, Maidment, & Mays, Hidrología aplicada, 1994



El procedimiento de la prueba implica el cálculo de una distribución esperada ( $F_e$ ) en el grupo estudiado, usando como punto de partida a la distribución de la variable en el grupo de referencia. El propósito de la prueba es averiguar si existen diferencias estadísticamente significativas entre la distribución observada ( $F_o$ ) y la distribución esperada ( $F_e$ ). En la prueba se plantean las siguientes hipótesis estadísticas:

Hipótesis estadísticas nula:  $H_o:F_o=F_e$

Hipótesis estadística alterna  $H_a:F_o \neq F_e$

El procedimiento de la prueba incluye el cálculo de la medida de resumen llamada chi cuadrada. El rechazo de la  $H_o$  ocurre cuando el valor calculado con los datos resulta mayor que el valor crítico de dicha medida contenido en una tabla llamada valores críticos de Chi cuadrada.

En el caso de que el valor de Chi cuadrada calculada sea igual o menor al de Chi cuadrada crítica se dice que no rechaza a la  $H_o$  y, por tanto, se concluye que la  $F_o$  es semejante a la  $F_e$ . En otras palabras, se dice que ambas distribuciones se ajustan bien; de ahí el nombre de la prueba bondad de ajuste.

#### **4.4. FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN MIXTAS DE PROBABILIDAD**

En muchos lugares, especialmente en las zonas costeras, las intensidades máximas anuales pertenecen a dos poblaciones diferentes: la primera es la de las intensidades producidas por precipitaciones relacionadas con los fenómenos meteorológicos dominantes en la región en estudio, y la segunda es la de las intensidades producidas por precipitaciones ciclónicas, normalmente mayores que los primeros.

En adelante se hablará de intensidades producidas por tormentas ciclónicas o no ciclónicas por ser el caso más común.

Fernando J. González Villarreal, investigador mexicano, ha demostrado que, en estos casos, la función de distribución de probabilidad se puede expresar como sigue:

$$F(x) = F_1(x)[p + (1 - p)F_2(x)] \quad (4.24)$$

Donde  $F_1(x)$  y  $F_2(x)$  son, respectivamente, las funciones de distribución de probabilidad de los caudales máximos anuales no producidos por tormentas ciclónicas y de los producidos por ellas, y  $p$  es la probabilidad de que en un año cualquiera el caudal máximo no sea producido por una tormenta ciclónica.

El número de parámetros de la función de distribución de probabilidad es:

$$n = n_1 + n_2 + 1 \quad (4.25)$$

Dónde:

$n_1$  = número de parámetros de  $F_1(x)$ ,  $n_2$  = número de parámetros de  $F_2(x)$

y el parámetro restante es  $p$ .

Para calcular los valores de los parámetros utilizaremos información meteorológica, en las que se nos proporcionen los caudales máximos anuales.

Con este criterio estimaremos  $p$ , la probabilidad de que un año cualquiera sea no ciclónico.

El valor de  $p$  será entonces:

$$p = \frac{N_n}{N_T} \quad (4.26)$$

Dónde:

$N_n$  Es el número de años de registro en que el gasto máximo no se produjo por una tormenta ciclónica y  $N_T$  es el número total de años de registro.

Una vez estimado el valor de  $p$ , el resto de parámetros se evalúan mediante las fórmulas de función de distribución de probabilidad vistas anteriormente.

Los parámetros  $F_1(x)$  y  $F_2(x)$  de la ecuación 4.24 los calcularemos con las fórmulas de función de distribución de probabilidad, mediante las combinaciones entre estas.

En la tabla 4.3 se presentan las diferentes combinaciones de las distribuciones mixtas de probabilidad, utilizando la ecuación:

Tabla 4.3. Combinación Distribuciones de probabilidad.

<b><i>Combinación Gumbel-Gumbel</i></b>
$F(x) = e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \left[ p + (1-p)e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \right]$
<b><i>Combinación Gumbel- Pearson III</i></b>
$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \left[ p + (1-p) \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}} \left(\frac{x-\delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} dx \right]$
<b><i>Combinación Pearson III- Log normal</i></b>
$F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}} \left(\frac{x-\delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} dx \left[ p + (1-p) \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - a}{\beta}\right)^2} dx \right]$
<b><i>Combinación Normal -Pearson III</i></b>



$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \left[ p + (1-p) \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}} \left(\frac{x-\delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} dx \right]$
<b>Combinación Log normal- Normal</b>
$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - a}{\beta}\right)^2} dx \left[ p + (1-p) \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \right]$
<b>Combinación Gumbel- Gev</b>
$F(x) = e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \left[ p + (1-p) e^{-\left[1-k\left(\frac{x-\beta_1}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{k}}} \right]$

#### 4.5. ESTADO ACTUAL DE LAS CURVAS IDF

Colombia se encuentra entre los cuatro países con mayor oferta hídrica a nivel mundial, además de estar ubicada entre dos de los más grandes océanos; el Pacífico, que baña al país por el oeste y el Atlántico, que forma el mar Caribe o de las Antillas; razón por la cual es necesario que se lleven a cabo estudios que tengan en cuenta los fenómenos hidrológicos que se presentan en el país, con los cuales se pueda describir satisfactoriamente el comportamiento hidrológico de las distintas zonas que conforman todo su territorio.

En Colombia se han llevado a cabo varios estudios que tienen en cuenta la realización de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF), entre los que cabe destacar los realizados en la ciudad de Cúcuta, donde se ha llevado a cabo la Elaboración Curvas IDF de las estaciones: Cinera Villa Olga y Santa

Isabel; en convenio con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la universidad de pamplona, obteniéndose como producto final la elaboración de las Curvas características de dichas estaciones.

En países como Chile donde Las características geográficas, permiten que en el país exista una gran diferencia en cuanto a cantidad y distribución de las precipitaciones<sup>15</sup>, por lo que se hacia necesario la utilización de un modelo hidrológico que definiera las características de esta parte del país, por lo que procedio a la elaboración de las Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, construidas para 40 estaciones, pertenecientes a la red de estaciones pluviográficas de la Dirección General de Aguas (DGA), del país en mención.

México, es uno de los países en América latina en la utilización de las curvas IDF, en dicho país se han adelantado varios estudios en cuanto al manejo de este modelo hidrológico, ya que se han llevado a cabo estudios de curvas IDF con distribuciones mixtas de probabilidad. En las regiones tropicales, las lluvias torrenciales pueden ocurrir en cualquier mes del año, pero las más intensas y prolongadas están siempre asociadas al paso de tormentas tropicales<sup>16</sup>.

Otros de los países de Centroamérica en el cual se han llevado a cabo estudios de este tipo es en el Salvador con la determinación de curvas de Intensidad – Frecuencia – Duración, para las estaciones de Güija, Izalco, Galera, El Papalón, Santa Cruz Porrillo y Aeropuerto de Ilopango.<sup>17</sup>

---

<sup>15</sup> Curvas Intensidad Duración Frecuencia para la zona sur de Chile. Universidad de Talca.

<sup>16</sup> Análisis Regional de las Lluvias Torrenciales y Su influencia Sobre el Régimen Hidrológico. Eduardo Plano Gutierrez.

<sup>17</sup> Validación de metodologías para el cálculo de caudales máximos en el Salvador.

#### 4.6. FENÓMENOS ENSO: NIÑO Y NIÑA

El Niño y La Niña constituyen las fases extremas del fenómeno océano-atmosférico conocido como El Niño-Oscilación del Sur, ENSO. Ambas fases se encuentran asociadas a las anomalías hidrológicas que ocurren en el trópico sudamericano, entre otras regiones, básicamente en escalas de tiempo que van desde la mensual hasta la interanual. En general puede decirse que El Niño produce periodos secos más fuertes y prolongados, en cambio La Niña amplifica las lluvias y por tanto se producen intensidades mucho más altas.<sup>18</sup>

Los fenómenos involucrados se transforman en amenazas por incremento de las lluvias y en consecuencia generan inundaciones y movimientos en masa; déficit de lluvias que conducen a sequías e incendios forestales, cielos despejados y heladas.

Durante El Niño se ha observado mayor pérdida de los glaciares que en parte es compensada durante los eventos de La Niña. El aumento del nivel del mar en conjunción con vientos perpendiculares a la costa genera series de olas altas (marejadas), que causan inundaciones, erosión costera y hundimiento de pequeñas embarcaciones. Los cambios en las condiciones climáticas regionales se traducen en amenazas, según el tipo de fenómeno, para la agricultura y ganadería industrializadas y de supervivencia (seguridad alimentaria), la infraestructura vial, la disposición de agua potable y la capacidad de generación de energía hidroeléctrica, además que proliferan vectores de enfermedades asociadas con cambios ambientales temporales.

---

<sup>18</sup> Germán Poveda. Óscar J. Mesa. Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia.

Dado que los fenómenos El Niño y La Niña están asociados con el aumento o disminución anómalo de la temperatura superficial del mar, uno de los indicadores más utilizados para hacer seguimiento a estos fenómenos es el Índice del Niño Oceánico (ONI, por sus siglas en inglés), desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Este índice es calculado a partir de mediciones de la temperatura superficial del mar en el sector central del Pacífico tropical frente a las costas de Suramérica. En condiciones El Niño, el ONI debe ser igual o superior a +0,5 grados Celsius de anomalía, mientras que en condiciones La Niña, el ONI debe ser igual o inferior a -0,5 grados Celsius. En la tabla 4.4 Se muestran los valores del indicador ONI, para cada año.



Tabla 4.4. Valor de Indicador ONI. Fuente NOAA

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1970	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2	-0.5	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-1.0
1971	-1.2	-1.3	-1.0	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.9	-0.8
1972	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6	1.9	2.1	2.1
1973	1.8	1.2	0.6	0.0	-0.5	-0.8	-1.0	-1.2	-1.3	-1.6	-1.9	-2.0
1974	-1.9	-1.6	-1.2	-1.0	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.6	-0.8	-0.7
1975	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.2	-1.4	-1.5	-1.6	-1.7
1976	-1.5	-1.1	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8
1977	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8	0.8
1978	0.7	0.5	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	-0.1
1979	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6
1980	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.2	0.0	-0.1	0.0	0.0	-0.1
1981	-0.4	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1
1982	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.5	1.9	2.1	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.2	0.9	0.6	0.2	-0.2	-0.5	-0.8	-0.9	-0.8
1984	-0.5	-0.3	-0.2	-0.4	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1.0	-0.9	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4
1986	-0.5	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.3	1.2	1.1	1.0	1.2	1.4	1.6	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.7	0.5	0.1	-0.2	-0.7	-1.2	-1.3	-1.2	-1.3	-1.6	-1.9	-1.9
1989	-1.7	-1.5	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
1991	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	1.1	1.4
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.2	0.0
1993	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	1.0	1.2
1995	1.0	0.8	0.6	0.3	0.2	0.0	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.2	0.7	1.2	1.5	1.8	2.1	2.3	2.4	2.3
1998	2.2	1.8	1.4	0.9	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.2	-1.2	-1.4	-1.5
1999	-1.5	-1.3	-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7
2001	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.3
2002	-0.2	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	1.2	1.3	1.3
2003	1.1	0.8	0.4	0.0	-0.2	-0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
2004	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8
2006	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.0
2007	0.7	0.3	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.6	-0.9	-1.1	-1.2	-1.4
2008	-1.5	-1.5	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.4	-0.7
2009	-0.9	-0.8	-0.6	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
2010	1.6	1.4	1.1	0.7	0.2	-0.3	-0.8	-1.2	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5



Los impactos de los fenómenos Enso en el territorio andino se traducen en el aumento de pérdidas por el incremento de lluvias, movimientos en masa e inundaciones, y déficit de precipitaciones y sequías en Colombia. En el periodo 2010 – 2011 se presentó, quizás uno de los periodos más críticos en cuanto al fenómeno de la Niña en Colombia, causando fuertes inundaciones en departamentos como Bolívar, Cauca, Cundinamarca, Valle del Cauca y Norte de Santander, debido a incrementos en los niveles de los ríos Magdalena, Cauca, Bogotá, Meta y Arauca, a causa de este fenómeno climático.

#### **4.7. HURACANES**

Se conoce con el nombre de huracán, a ciclones tropicales en el atlántico y otras partes del mundo. Ciclón tropical es un término meteorológico usado para referirse a un sistema de tormentas caracterizado por una circulación cerrada alrededor de un centro de baja presión y que produce fuertes vientos y abundante lluvia. Los ciclones tropicales extraen su energía de la condensación de aire húmedo, produciendo fuertes vientos. Dependiendo de su fuerza y localización, un ciclón tropical puede llamarse depresión tropical, tormenta tropical, huracán, tifón o simplemente ciclón.

Los ciclones tropicales pueden producir vientos, olas extremadamente grandes y extremadamente fuertes, tornados, lluvias torrenciales (que pueden producir inundaciones y corrimientos de tierra) y también pueden provocar marejadas ciclónicas en áreas costeras. Se desarrollan sobre extensas superficies de agua cálida y pierden su fuerza cuando penetran en tierra. Esa es una de las razones por la que las zonas costeras son dañadas de forma significativa por los ciclones tropicales, mientras que las regiones interiores están relativamente a salvo de recibir fuertes vientos. Sin embargo,

las fuertes lluvias pueden producir inundaciones tierra adentro y las marejadas ciclónicas pueden producir inundaciones extensas a más de 40 km hacia el interior en llanuras litorales extensas y de pendiente sumamente escasa.<sup>19</sup>

Todos los ciclones tropicales son áreas de baja presión atmosférica cerca de la superficie de la Tierra. Las presiones registradas en el centro de los ciclones tropicales están entre las más bajas registradas en la superficie terrestre al nivel del mar. Los ciclones tropicales se caracterizan y funcionan por lo que se conoce como núcleo cálido, que consiste en la expulsión de grandes cantidades de calor latente de vaporización que se eleva, lo que provoca la condensación del vapor de agua. Este calor se distribuye verticalmente alrededor del centro de la tormenta. Por ello, a cualquier altitud (excepto cerca de la superficie, donde la temperatura del agua determina la temperatura del aire) el centro del ciclón siempre es más cálido que su alrededor.<sup>20</sup>

La mayoría de los ciclones tropicales se forman en una zona de actividad tormentosa llamada Discontinuidad Intertropical (ITF por su nombre en inglés),<sup>21</sup> Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) o zona de bajas presiones del monzón. Otra fuente importante de inestabilidad atmosférica son las ondas tropicales, que causan sobre el 85% de los ciclones tropicales intensos en el océano Atlántico, y la mayoría en la región del Pacífico este.<sup>22</sup> A nivel mundial, los picos de actividad ciclónica tienen lugar hacia finales de verano, cuando la temperatura del agua es mayor. Sin embargo, cada región particular tiene su propio patrón de temporada. En una escala mundial, mayo es el mes menos activo, mientras que el más activo es septiembre. En el Atlántico Norte, la

---

<sup>19</sup> <http://www.nhc.noaa.gov/prepare/hazards.php>. National Hurricane Center. NOAA. 20 de Febrero 2008.

<sup>20</sup> Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory. 24 de febrero de 2008.

<sup>21</sup> <http://www.knmi.nl/~koek/glossary.html#I>. Marine Knowledge Centre.

<sup>22</sup> <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/A4.html>. Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, Hurricane Research Division. 18 de marzo de 2008.

temporada es diferente, teniendo lugar desde el 1 de junio al 30 de noviembre, alcanzando su mayor intensidad a finales de agosto y en septiembre. Estadísticamente, el pico de actividad de la temporada de huracanes en el Atlántico es el 10 de septiembre.

Los ciclones tropicales se clasifican de acuerdo a la fuerza de sus vientos, mediante la escala de huracanes de Saffir-Simpson. Basándose en esta escala, los huracanes Categoría 1 serían los más débiles y los Categoría 5 los más fuertes. Un ciclón tropical maduro puede expulsar calor a razón de hasta  $6 \times 10^{14}$  vatios.<sup>23</sup> Los ciclones tropicales en el mar abierto causan grandes olas, lluvias torrenciales y fuertes vientos, rompiendo la navegación internacional y, en ocasiones, hundiendo barcos. Sin embargo, los efectos más devastadores de un ciclón tropical ocurren cuando cruzan las líneas costeras, haciendo entrada en tierra. Un ciclón tropical moviéndose sobre tierra puede hacer daño directo de cuatro maneras:

- ✓ Fuertes vientos: El viento de fuerza de huracán puede dañar o destruir vehículos, edificios, puentes, etc. También puede convertir desperdicios en proyectiles voladores, haciendo el exterior mucho más peligroso.
- ✓ Marejada ciclónica: Los ciclones tropicales causan un aumento en el nivel del mar, que puede inundar comunidades costeras, éste es el peor efecto, ya que históricamente los ciclones se cobran un 80% de sus víctimas cuando golpean en las costas por primera vez.
- ✓ Lluvias torrenciales: La actividad tormentosa en un ciclón tropical puede causar intensas precipitaciones. Los ríos y corrientes se desbordan, no se puede circular en carretera y pueden ocurrir deslizamientos de tierra. Las áreas en tierra pueden ser particularmente vulnerables a inundaciones de agua dulce, si los residentes no se preparan adecuadamente

---

<sup>23</sup> National Oceanic & Atmospheric Administration. Agosto de 2001.

Si bien el número de tormentas en el Atlántico ha aumentado desde 1995, no parece haber señales de una tendencia a aumentar en el cómputo global; el número anual para todo el mundo, se sitúa en unos 90 ciclones tropicales. Las tormentas atlánticas, se están volviendo más destructivas a nivel financiero, ya que, cinco de las diez tormentas más "caras" en Estados Unidos han ocurrido desde 1990. El número y fuerza de huracanes en el Atlántico puede experimentar un ciclo de 50 a 70 años. Aunque es más común desde 1995, entre 1970 y 1994 ocurrieron algunas temporadas cuya actividad fue superior a la media. Los huracanes más destructivos golpearon de forma frecuente entre 1926-60. En 1933 se registró un récord de 21 tormentas tropicales, que sólo ha sido superado por la temporada de 2005. En las temporadas de 1900 a 1925, la formación de huracanes tropicales fue bastante infrecuente; sin embargo, muchas tormentas intensas se formaron entre 1870-1899. Durante la temporada de 1887, se formaron 19 tormentas tropicales, de las cuales 4 ocurrieron después del 1 de noviembre y 11 se convirtieron en huracanes.

Una pregunta frecuente es si el calentamiento global puede causar ciclones tropicales más frecuentes y violentos. Hasta ahora todos los climatólogos parecen estar de acuerdo en que una sola tormenta, o incluso una sola temporada, no puede ser atribuida a una única causa como el calentamiento global o incluso una variación natural. La pregunta es si existe una tendencia estadística que indique un aumento en la fuerza o frecuencia de los ciclones. La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos dice en su guía de preguntas frecuentes sobre huracanes que "es altamente inverosímil que el calentamiento global pueda (o podrá) contribuir a un cambio drástico en el número o intensidad de los huracanes".

En términos similares, P.J. Webster y otras personas, publicaron un artículo en Science examinando "cambios en el número de ciclones tropicales, duración e intensidad" durante los últimos 35 años, un período para el que se disponen de datos por satélite. El hallazgo principal fue que mientras el número de

ciclones "disminuyó en todas las regiones excepto el Atlántico Norte durante la última década", hubo un "gran incremento en el número y proporción de huracanes alcanzando categorías 4 y 5." Esto significa, que si bien el número general de ciclones había disminuido, el número de tormentas muy fuertes había aumentado.

Kerry Emanuel publicó en un Artículo en Nature, en el que afirmó que el potencial de destrucción de los huracanes, que combina fuerza, duración y frecuencia de los mismos "está altamente correlacionado con la temperatura del mar, reflejando señales climáticas bien documentadas, incluyendo oscilaciones multidecadales en el Atlántico Norte y Pacífico Norte y el calentamiento global".

Mientras Emanuel, analizaba la energía disipada anualmente, Webster y su grupo analizaban el, algo menos importante, porcentaje de huracanes en categorías 4 y 5, y descubrieron que este porcentaje había aumentado en 5 de las 6 regiones: Atlántico Norte, Pacífico Nordeste y Noreste, Pacífico Sur e Índico Norte y Sur. Dado que cada región podría estar sujeta a oscilaciones locales similares a la Oscilación Atlántica Multidecadal (AMO), cualquier estadística individual para una región queda en el aire. Pero si las oscilaciones locales no están sincronizadas por alguna oscilación global no identificada todavía, la independencia de las regiones permite las pruebas estadísticas comunes que son mucho más concretas que cualquier prueba regional. Desgraciadamente, Webster no hizo dicha prueba, lo cual pudo dar incluso mejores evidencias de que se haya detectado el impacto del calentamiento global en la intensidad de los huracanes.

#### **4.7.1. Fenómenos Tropicales en Colombia**

##### **4.7.1.1. Tormenta tropical Bret (1993):**

Fue la segunda tormenta en recibir nombre de la temporada de huracanes en el Atlántico de 1993. Aunque sólo fue una tormenta tropical, causó fuertes daños y cerca de 200 muertes al avanzar a través del mar Caribe durante finales de agosto y septiembre de esa temporada. Impacto áreas como Venezuela, Islas de Barlovento, Colombia y Nicaragua. (Wikipedia, 2008).



Ilustración 4. Recorrido Tormenta Tropical Bret.

##### **4.7.1.2. Huracán Cesar-Douglas (1996):**

El huracán Cesar-Douglas fue la tercera tormenta en recibir nombre de la temporada de huracanes en el Atlántico de 1996. El huracán de categoría uno se formó a finales de junio en el mar Caribe y golpeó a América Central con lluvias, matando a 67 personas y causando que los gobiernos locales declararan el área como de desastre. Después de cruzar por América Central, la tormenta se reforzó en el Pacífico del este como el Huracán Douglas que formó parte de la Temporada de huracanes en el Pacífico de 1996 alcanzando la categoría 4 en mar abierto. Impacto áreas como Curazao, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Colombia, Venezuela (como Cesar) y Sur de México (como Douglas). (Wikipedia, 2008).



Ilustración 5. Recorrido Huracán Cesar - Douglas.

#### **4.7.1.3. Huracán Joan-Miriam (1988):**

La depresión tropical número 17 de la temporada se organizó a partir de una perturbación en la ITCZ. En los siguientes dos días el sistema viajó al noroeste, mientras se fortalecía en la Tormenta Tropical Joan. Después de pasar por el sur de las Antillas Menores, Joan viajó hacia el oeste a lo largo de la costa de América del Sur como una mínima tormenta tropical. Cruzó la península de la Guajira el 17 de octubre y alcanzó rápidamente la fuerza de huracanes a 50 km (31 mi) de la costa. Se fortaleció en un gran huracán el 19 de octubre, mientras viajaba hacia el oeste. El huracán se debilitó rápidamente pero volvió a ganar fuerza mientras viajaba hacia el oeste. Joan llegó a su pico de intensidad justo antes de tomar tierra cerca de Bluefields, Nicaragua, el 22 de octubre como un huracán categoría 4. Joan se mantuvo bien organizado, mientras cruzaba Nicaragua y surgió en la región oriental de la cuenca del océano Pacífico como la tormenta tropical Miriam. Miriam se debilitó gradualmente disipándose el 2 de noviembre. (Wikipedia, 2008).

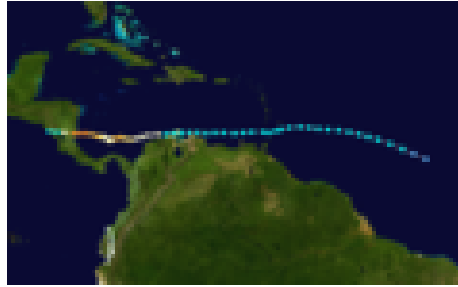

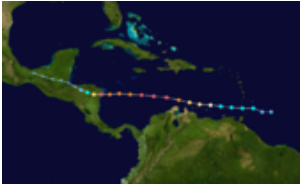



Ilustración 6. Recorrido Huracán Joan - Miriam.

En la tabla 4.5, se muestran algunos de los huracanes o tormentas tropicales que tuvieron cercanía a las costas colombianas y de una u otra forma pudieron haber incidido en el clima de esta región del país.

Tabla 4.5. Huracanes en el Mar Caribe<sup>24</sup>

Año	Nombre	Recorrido
2008	Gustav	
2007	Félix	
2005	Emily	

<sup>24</sup> Imágenes tomadas de: [www.noaa.gov/Archivo:Retired\\_Atlantic\\_hurricane\\_tracks.png](http://www.noaa.gov/Archivo:Retired_Atlantic_hurricane_tracks.png)





Año	Nombre	Recorrido
2001	Iris	
1995	Félix	
1992	Andrew	
1990	Gustav	
1985	Gloria	
1980	Allen	

Además de los huracanes y tormentas tropicales nombradas en la tabla anterior, se conocen que otros huracanes también tuvieron incidencia en el mar caribe, de estos, aunque no se tiene un recorrido precisado, se sabe que

incidieron en la mayoría de los países presentes en esta zona, estos se relacionan en la tabla 4.6:

Tabla 4.6. Huracanes en el Mar Caribe

<b>Año</b>	<b>Nombre</b>
2003	Nicholas
1977	Carmen
1974	Anita
1970	Camille

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. TIPO DE ESTUDIO

El tipo de estudio que se efectuará, en este proyecto de investigación, será de tipo científico y tecnológico, ya que se utilizarán herramientas estadísticas, con el fin de llevar a cabo la construcción de las curvas IDF para dos poblaciones, escogiendo la o las distribuciones mixtas de probabilidad que más se ajusten a los requerimientos para la realización de estas. Para lo cual se elegirán las cartas pluviográficas para cada año que presenten la mayor intensidad. En la tabla se relacionan los años registrados con sus respectivos meses.

Tabla 5.1. Años Registrados.

<b>Año</b>	<b>Mes</b>
2010	Mayo, Octubre y Noviembre
2009	Agosto y Octubre
2008	Mayo y Noviembre
2007	Mayo
2006	Mayo y Octubre
2005	Mayo y Octubre
2004	Mayo y Octubre
2003	Noviembre
2002	Junio y Octubre
2001	Junio y Octubre
2000	Julio y Septiembre
1999	Agosto
1998	Mayo y Septiembre
1997	Junio y Noviembre
1996	Junio y Octubre
1995	Julio y agosto
1994	Agosto y Noviembre



<b>Año</b>	<b>Mes</b>
1993	Mayo y Septiembre
1992	Junio y Julio
1991	Mayo y Septiembre
1990	Septiembre y Diciembre
1989	Septiembre
1988	Mayo y Junio
1987	Septiembre y Octubre
1986	Junio y Octubre
1985	Agosto y Octubre
1984	Julio y agosto
1983	Septiembre y Noviembre
1982	Agosto y Noviembre
1981	Septiembre y Octubre
1980	Julio
1979	Abril y Octubre
1978	Septiembre y Octubre
1977	Agosto y Noviembre
1976	Septiembre y Octubre
1975	Julio y agosto
1974	Septiembre
1973	Mayo y Octubre
1972	Abril y Junio
1971	Enero y Junio
1970	Julio y Diciembre

## **5.2. FUENTES Y TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

### **5.2.1. Fuente primaria:**

Como fuente información primaria se tendrá en cuenta las cartas pluviográficas suministradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), específicamente, las de la estación sinóptica principal ubicada en la ciudad de Cartagena, en el Aeropuerto Rafael Núñez.

### **5.2.2. Fuentes secundarias:**

Se utilizarán documentos de investigación, artículos científicos y técnicos, libros de hidrología relacionados con el tema de construcción de curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF), así como también documentos relacionados con la aplicación de las distribuciones mixtas de probabilidad con aplicaciones a dichas curvas. Además para el procesamiento de los datos se contará con software como el Hyfran y Excel.

### **5.2.3. Tratamiento de la información**

Los análisis que se realizaran en la presente investigación se relacionan a continuación:

- ✓ Recopilación de la información mediante las cartas pluviográficas, seleccionando las dos de mayor intensidad en determinados meses en un periodo de un año.
- ✓ Interpretación de las cartas pluviográficas, señalando las alturas de precipitación de cada uno de los pluviografos, para duraciones de 10, 20, 30, 60, 120, 180 y 360 minutos.

- ✓ Se seleccionan las máximas alturas de precipitación, correspondientes a cada duración.
- ✓ Se calculan las intensidades en mm/h. La cual es obtenida de la división entre la altura de precipitación se y la duración, esta última debe estar en horas, para así proceder a calcular la intensidad.
- ✓ Se ordena la intensidad en forma ascendente en cada una de las duraciones.
- ✓ Se realizan ajustes la serie anual de valores de intensidad con las distribuciones de probabilidad de Gumbel, Weibull, Pearson tipo III y Gev, utilizando el software Hyfran.
- ✓ Se calcula el periodo de retorno asociado a cada una de las intensidades máximas arrojadas por las diferentes distribuciones. Estos se calculan para cada una de las duraciones.
- ✓ Se utiliza como medida de bondad de ajuste la prueba estadística Chi-Cuadrado, con el fin de evaluar si la distribución de probabilidad es la que más se a la ajusta la tendencia de los datos adecuadamente.
- ✓ Grafica de las curvas IDF, intensidad vs duración, para cada periodo de retorno.

## 6. CASO DE ESTUDIO

Nuestro caso de estudio se centra en la ciudad de Cartagena, específicamente la estación Sinóptica principal del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, ubicada en el aeropuerto Rafael Núñez.

El clima en la ciudad presenta principalmente dos temporadas, la temporada húmeda, la cual va desde el mes de abril al de noviembre, incluso en ocasiones se extiende hasta la segunda semana del mes de diciembre, la cuales oscilan entre 29 y 244 mm/mes, constituyéndose este último como el de más altos índices de pluviosidad en el mes de Octubre. El período seco transcurre entre los meses de diciembre hasta marzo, con promedios entre 1.0 y 37 mm/mes. Así mismo, el número de días con precipitación oscila a lo largo del año entre 0.0 y 17.0 días.

### 6.1. Época Seca

Durante esta época, que inicia desde el mes de diciembre hasta el mes de marzo, predomina el flujo de los vientos alisios del noreste, que se producen por el descenso del sistema de altas presiones de las azores, las cuales interactúan con la Zona de Convergencia Intertropical, los vientos oscilan entre 5 y 10 nudos de intensidad y en ocasiones sobrepasan estos valores alcanzando hasta los 30 nudos de intensidad.

### 6.2. Época Húmeda

La época húmeda sobre la ciudad de Cartagena inicia cada año desde el mes de agosto, extendiéndose hasta el mes de noviembre y primeros días del mes de diciembre. Durante este lapso de tiempo las condiciones atmosféricas se ven influenciadas por la disminución de los vientos de manera considerable

oscilando entre 02 y 05 nudos de intensidad y en raras ocasiones sobrepasando los 10 nudos.

### 6.3. Época de Transición

Durante este periodo que inicia a finales del mes de abril hasta el mes de julio, se presenta una variabilidad en la dirección del viento que comienza siendo de dirección norte y luego a finales de esta época mantiene un predominio del sur con intensidades que oscilan entre 6 y 10 nudos.<sup>25</sup>

### 6.4. Curva de Intensidad Duración Frecuencia IDF de la Ciudad de Cartagena

En la ciudad de Cartagena se contaba con una curva IDF resultado de una investigación realizada en la Universidad de Cartagena bajo el nombre de Prediseño del alcantarillado pluvial del sector de San Vicente de Paul Cartagena de Indias la cual se realizó hasta el periodo de 1994. La ecuación de diseño de dicha curva de Intensidad duración y frecuencia es la siguiente:

$$I = \frac{616,97*(Tr)^{0,18}}{(D+10)^{0,561}} \quad 6.1$$

Con base en la ecuación 6.1 en la ciudad se modelaban las curvas de Intensidad Duración y Frecuencia, por medio de las cuales se hacían las estimaciones de los eventos hidrológicos que ocurrían en la misma. Esta ecuación debe ser actualizada, ya que actualmente el comportamiento climático no es igual al reportado hace algunos años, además se deben tener en cuenta otros parámetros para su construcción, por lo que en el siguiente capítulo se actualizará esta ecuación, y se realizará la curva IDF.

---

<sup>25</sup> Climatología del Caribe. Principales Parámetros Meteorológicos Sobre la Ciudad de Cartagena. CIOH



## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se abordará todo lo que concierne al cálculo de las curvas de intensidad, duración y frecuencia aplicando distribuciones mixtas de probabilidad. Se dará a conocer la ecuación de diseño, que modela el comportamiento de las curvas que se calculen y se mostrarán los procedimientos realizados para el cálculo de cada una de estas. Para el desarrollo de la presente metodología se realizarán los siguientes análisis:

- Se calcularán las curvas IDF (1970 – 2010) utilizando funciones de probabilidad.
- Se calcularán las curvas IDF utilizando funciones mixtas de probabilidad.

A continuación se presentan los análisis obtenidos:

### 7.1. Cálculo de curva IDF (período 1970-2010)

Para el cálculo de las curvas IDF, de la estación Aeropuerto Rafael Núñez de la ciudad de Cartagena, se realizó el procedimiento señalado a continuación:

- ✓ Se recopiló información en el Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales (IDEAM).
- ✓ Se seleccionaron las cartas pluviográficas, específicamente, las que presentaban mayores intensidades de cada uno de los años, escogiendo los dos meses que tenían las intensidades máximas en un año.
- ✓ Se interpretó la información contenida en las cartas pluviográficas.
- ✓ Se calcularon las intensidades máximas asociadas a diferentes periodos de retorno.
- ✓ Se ajustaron, los datos, a diferentes distribuciones de probabilidad.

- ✓ Se calculó la ecuación que define el comportamiento de los datos.
- ✓ Se graficaron las curvas intensidad, duración, frecuencia.

En la tabla 7.1 se muestra la interpretación de los registros pluviográficos suministrados por el IDEAM, en los cuales para cada año se tomó la máxima altura de precipitación registrada en cada duración seleccionada; estas alturas de precipitación corresponden solo a los dos eventos máximos del año.

Tabla 7.1. Alturas máximas para cada año.

		Duración (min)							
Fecha		10	20	30	60	120	180	240	360
Año	Mes								
2010	Mayo	19,2	25,8	31,2	60	99,4	104,3	109,5	116
	Octubre	17,5	23,3	34	45,7	46,2	47,2	60,9	63,8
	Noviembre	10	14,5	19,3	24,6	32,3	36,8	42	63,4
2009	Agosto	12,7	21,2	28	30,8	30,8	31,1	31,9	31,9
	Octubre	11	18	22	40	55,6	58,1	59,8	59,9
2008	Mayo	11,1	20,7	24,5	30,5	32,9	32,9	32,9	32,9
	Noviembre	10,6	13,6	15,2	27,2	37,1	41,9	42,6	43,2
2007	Mayo	19,2	33,1	47,8	76,4	104,6	105,6	105,6	105,6
2006	Mayo	10	17	19	34,5	39,6	44,2	45	45,9
	Octubre	14,5	19	22	23,8	26,9	26,9	26,9	26,9
2005	Mayo	9,4	14,2	20,9	30,8	38,8	55,5	63,5	65,7
	Octubre	9,7	18,8	21,3	27,7	43,9	44,9	54,6	57,1
2004	Mayo	5,3	7,8	11,5	14,8	24,5	27,8	33,4	39,1
	Octubre	9,4	18	26,2	29,1	29,1	29,9	29,9	29,9
2003	Noviembre	9,8	19,1	28,3	52,9	89,4	105,2	109	124,2
2002	Octubre	8	12,9	19,8	26,4	27,4	27,4	27,4	27,4
	Junio	0,3	0,5	0,7	1	1,1	1,1	1,1	1,1
2001	Octubre	11,9	21,2	29,9	43,1	50,1	50,8	51,8	52,2
	Junio	9,6	16,9	21,3	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1
2000	Julio	13,1	23,1	28,6	54,8	72,1	72,8	73,1	73,1



Duración (min)									
Fecha		10	20	30	60	120	180	240	360
Año	Mes								
	Septiembre	12,3	25,1	31,1	37,9	39,9	40,7	41,8	43,1
1999	Agosto	14,6	27,3	37	55,2	80,5	87	87	101,8
1998	Septiembre	19	31,8	37	46,2	50,2	57,1	68,8	79,8
	Mayo	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1997	Noviembre	9,7	19,2	28,3	55,5	72,5	75,4	77	77,2
	Junio	24	43,9	58,7	80,3	90,6	91	91	92,4
1996	Octubre	5,5	9,7	12,7	14,7	18,3	19,5	20,7	21,6
	Junio	8	20	21,5	27	27,8	28,2	28,5	29,8
1995	Julio	10,5	16,7	25,6	45,3	64,7	66,9	68	68
	Agosto	11,3	18	24,7	36,3	51,2	76,7	80,9	81
1994	Noviembre	15,14	25,04	28,84	42,44	43,64	44,04	44,34	44,34
	Agosto	3,5	5,4	5,6	6,4	6,6	6,6	6,6	6,6
1993	Mayo	0,3	0,6	1,3	1,3	2,1	2,5	2,5	2,5
	Septiembre	1,6	2	2	2,2	2,8	3,4	3,4	3,4
1992	Junio	16	21,2	25,8	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8
	Julio	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1991	Septiembre	9,5	14,7	19,2	25,2	25,3	25,9	28,3	28,4
	Mayo	8,2	13,6	14,7	16,7	27,6	27,8	27,8	27,8
1990	Septiembre	15,9	24,8	40,7	57,3	68,2	71	71,6	71,6
	Diciembre	14,3	19,3	25,3	30,8	42,5	66,1	72,2	82
1989	Septiembre	9,6	19	27,5	48	53,7	67,2	68,8	68,8
1988	Junio	13,9	23,9	32,9	43,3	56	60,3	60,5	66,1
	Mayo	12,9	25,2	34,9	47	47,7	47,8	47,8	47,8
1987	Septiembre	18	32	44	66,1	72,7	72,7	73,2	73,5
	Octubre	13,7	25,1	32,9	58,2	80,9	84,5	90,4	93,3
1986	Octubre	9,5	16,6	19,6	27	38,8	40	43,7	54,3
	Junio	15,8	21,7	25,2	40,9	53,2	53,2	53,2	53,2
1985	Agosto	10	20	28,2	53,2	69,5	70,1	70,1	70,1
	Octubre	20,3	40,4	50,5	71,4	108,9	134,9	146,1	147,8
1984	Agosto	18,6	34,9	44,2	55,9	61	62,5	64,3	64,3
	Julio	24,5	42	54,5	83,5	92,4	92,4	92,4	92,4



Duración (min)									
Fecha		10	20	30	60	120	180	240	360
Año	Mes								
1983	Noviembre	16,9	23,4	36,2	47,5	49,7	49,7	49,7	49,7
	Septiembre	19,5	29,2	38,6	57,1	58,7	58,7	58,7	61
1982	Agosto	6,8	13,5	18,2	32,3	38,1	38,1	38,1	38,1
	Noviembre	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
1981	Septiembre	2,5	5	6,8	8,5	12	12,4	12,4	12,4
	Octubre	18	24,5	28,5	32,3	42,3	48,8	58,4	70,7
1980	Julio	20	40	56,5	100	127,2	129	129,3	163,5
1979	Octubre	20	40	56,5	100	127,2	129	129,3	163,5
	Abril	9	15,5	19,7	36,9	48,7	74,6	81,8	89,3
1978	Octubre	9,8	16,2	21,5	29	39,4	43,2	46,3	54
	Septiembre	20	38,8	47,3	60,6	62,4	64,3	64,8	66,5
1977	Noviembre	11,3	21	29,4	29,7	29,7	29,7	29,7	43
	Agosto	14,9	20,4	27,1	42,5	62,6	63,1	63,1	63,1
1976	Octubre	8,5	16,5	19,5	35	49,8	50,7	50,7	50,7
	Septiembre	13,6	23,6	29,1	35,3	38,2	39,2	39,2	39,2
1975	Julio	80,2	95,2	115,2	146,3	156,9	158,4	159,6	163,2
	Agosto	30	54	74,4	95,9	98,6	98,6	98,6	98,6
1974	Septiembre	25	38	50	73	74,4	74,4	74,4	74,4
1973	Mayo	30	50	60	75,7	78,5	78,5	89,9	90,1
	Octubre	17	29,5	39,5	50,5	57,1	57,2	58,1	58,1
1972	Junio	20	32,5	48	78,5	101,3	102	102,3	102,3
	Abril	12,5	22	29,5	45,2	54	54	54	54
1971	Enero	17,3	30	40	60,7	63,5	63,5	63,5	63,5
	Junio	20,7	25,1	30,1	45	72,9	84,6	99,5	113,8
1970	Diciembre	10	14,2	15,5	20,3	20,5	20,5	20,5	20,7
	Julio	20	35,5	47,5	69	88,8	143	153,7	153,7

En la tabla 7.2 se muestran las alturas de precipitación de mayor valor entre los dos meses máximos de cada año,

Tabla 7.2. Valores Registrados para cada año.

Duración (min)								
Fecha	10	20	30	60	120	180	240	360
Año	Alturas de Precipitación							
2010	19,2	25,8	34	60	99,4	104,3	109,5	116
2009	12,7	21,2	28	40	55,6	58,1	59,8	59,9
2008	11,1	20,7	24,5	30,5	37,1	41,9	42,6	43,2
2007	19,2	33,1	47,8	76,4	104,6	105,6	105,6	105,6
2006	14,5	19	22	34,5	39,6	44,2	45	45,9
2005	9,7	18,8	21,3	30,8	43,9	55,5	63,5	65,7
2004	9,4	18	26,2	29,1	29,1	29,9	33,4	39,1
2003	9,8	19,1	28,3	52,9	89,4	105,2	109	124,2
2002	8	12,9	19,8	26,4	27,4	27,4	27,4	27,4
2001	11,9	21,2	29,9	43,1	50,1	50,8	51,8	52,2
2000	13,1	25,1	31,1	54,8	72,1	72,8	73,1	73,1
1999	14,6	27,3	37	55,2	80,5	87	87	101,8
1998	19	31,8	37	46,2	50,2	57,1	68,8	79,8
1997	24	43,9	58,7	80,3	90,6	91	91	92,4
1996	8,0	20,0	21,5	27,0	27,8	28,2	28,5	29,8
1995	11,3	18	25,6	45,3	64,7	76,7	80,9	81
1994	15,14	25,04	28,84	42,44	43,64	44,04	44,34	44,34
1993	1,6	2,0	2,0	2,2	2,8	3,4	3,4	3,4
1992	16	21,2	25,8	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8
1991	9,5	14,7	19,2	25,2	27,6	27,8	28,3	28,4
1990	15,9	24,8	40,7	57,3	68,2	71	72,2	82,0
1989	9,6	19,0	27,5	48,0	53,7	67,2	68,8	68,8
1988	13,9	25,2	34,9	47	56	60,3	60,5	66,1



Duración (min)								
Fecha	10	20	30	60	120	180	240	360
Año	Alturas de Precipitación							
1987	18	32	44	66,1	80,9	84,5	90,4	93,3
1986	15,8	21,7	25,2	40,9	53,2	53,2	53,2	53,2
1985	20,3	40,4	50,5	71,4	108,9	134,9	146,1	147,8
1984	24,5	42	54,5	83,5	92,4	92,4	92,4	92,4
1983	19,5	29,2	38,6	57,1	58,7	58,7	58,7	61
1982	6,8	13,5	18,2	32,3	38,1	38,1	38,1	38,1
1981	18	24,5	28,5	32,3	42,3	48,8	58,4	70,7
1980	20	40	56,5	100	127,2	129	129,3	163,5
1979	20,0	30,0	46,7	74,5	100,0	123,0	127,5	131,8
1978	20,0	38,8	47,3	60,6	62,4	64,3	64,8	66,5
1977	14,9	21	29,4	42,5	62,6	63,1	63,1	63,1
1976	13,6	23,6	29,1	35,3	49,8	50,7	50,7	50,7
1975	80,2	95,2	115,2	146,3	156,9	158,4	159,6	163,2
1974	25	38	50	73	74,4	74,3	74,4	74,4
1973	30	50	60	75,7	78,5	78,5	89,9	90,1
1972	20	32,5	48	78,5	101,3	102	102,3	102,3
1971	20,7	30	40	60,7	72,9	84,6	99,5	113,8
1970	20	35,5	47,5	69	88,8	143	153,7	153,7

Una vez obtenidas las alturas máximas de precipitación se transforman a intensidades dividiéndolas entre sus respectivas duraciones, como se muestra en la tabla 7.3.

Tabla 7.3. Intensidades Máximas para cada año.

Fecha	Duración (min)							
	10	20	30	60	120	180	240	360
<b>Año</b>	<b>6,0</b>	<b>3,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>
<b>2010</b>	115	77	68	60	50	35	27	19
<b>2009</b>	76	64	56	40	28	19	15	10
<b>2008</b>	67	62	49	31	19	14	11	7
<b>2007</b>	115	99	96	76	52	35	26	18
<b>2006</b>	87	57	44	35	20	15	11	8
<b>2005</b>	58	56	43	31	22	19	16	11
<b>2004</b>	56	54	52	29	15	10	8	7
<b>2003</b>	59	57	57	53	45	35	27	21
<b>2002</b>	48	39	40	26	14	9	7	5
<b>2001</b>	71	64	60	43	25	17	13	9
<b>2000</b>	79	69	57	55	36	24	18	12
<b>1999</b>	88	82	74	55	40	29	22	17
<b>1998</b>	114	95	74	46	25	19	17	13
<b>1997</b>	144	132	117	80	45	30	23	15
<b>1996</b>	48	60	43	27	14	9	7	5
<b>1995</b>	68	54	49	36	26	26	20	14
<b>1994</b>	91	75	58	42	22	15	11	7
<b>1993</b>	10	6	4	2	1	1	1	1
<b>1992</b>	96	64	52	27	13	9	7	4
<b>1991</b>	57	44	38	25	14	9	7	5
<b>1990</b>	95	74	81	57	34	24	18	14
<b>1989</b>	58	57	55	48	27	22	17	11
<b>1988</b>	83	76	70	47	28	20	15	11



Duración (min)								
Fecha	10	20	30	60	120	180	240	360
Año	6,0	3,0	2,0	1,0	0,5	0,3	0,3	0,2
1987	108	96	88	66	40	28	23	16
1986	95	65	50	41	27	18	13	9
1985	122	121	101	71	54	45	37	25
1984	147	126	109	84	46	31	23	15
1983	117	88	77	57	29	20	15	10
1982	41	41	36	32	19	13	10	6
1981	108	74	57	32	21	16	15	12
1980	120	120	113	100	64	43	32	27
1979	120	120	113	100	64	43	32	27
1978	120	116	95	61	31	21	16	11
1977	89	63	59	43	31	21	16	11
1976	82	71	58	35	25	17	13	8
1975	481	286	230	146	78	53	40	27
1974	150	114	100	73	37	25	19	12
1973	180	150	120	76	39	26	22	15
1972	120	98	96	79	51	34	26	17
1971	124	90	80	61	36	28	25	19
1970	120	107	95	69	44	48	38	26

Obtenidas las intensidades, se realiza el cálculo del período de retorno, para cada una de éstas, lo cual se efectuó a través del software Hyfran; que permitió hacer el ajuste de los datos por medio de la prueba de bondad de ajuste, chi cuadrado. Este ajuste se hizo a través de diferentes distribuciones de probabilidad, con el fin de saber cuál de estas distribuciones se ajustaba mejor los datos. En la tabla 7.4 se muestra los valores de comparación, para cada una de las distribuciones, de esta manera se conoció que distribución se ajustó mejor a los datos.



Tabla 7.4 Resultados de la prueba Chi Cuadrado para cada Distribución.

$\chi^2$ (Prueba Chi-cuadrado)								
	10	20	30	60	120	180	240	360
<b>Gumbel</b>	11.20	4.80	8.00	2.80	4.80	1.20	1.20	3.20
<b>Gev</b>	16.40	4.40	5.60	4.40	1.60	1.20	1.20	3.20
<b>Weibull</b>	15.20	17.60	25.20	9.60	1.60	0.40	3.60	3.20
<b>Person III</b>	76.00	95.20	105.20	-	8.40	1.60	2.00	0.80

Con los valores reportados en la tabla 7.4 se observa que la distribución que mejor se ajusta a la tendencia de los datos es la distribución Gumbel, ya que es la que reporta un menor valor en cuanto a los resultados de la prueba de bondad de ajuste Chi cuadrado. Además los gráficos arrojados por Hyfran, acepta la tendencia de la serie anual de valores a ésta distribución.

Los resultados de la prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado, se muestran de manera más detallada en cada uno de las siguientes tablas, en los cuales se pueden observar los valores de los parámetros de esta prueba.

Tabla 7.5 Resultados de la prueba Chi Cuadrado para cada Distribución, duración 10 minutos.

PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Gumbel	H0:	La muestra proviene de una distribución Weibull
H1:	La muestra no proviene de una distribución Gumbel	H1:	La muestra no proviene de una distribución Weibull
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 11.20$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 15.20$
Valor -p	$p = 0.0476$	Valor -p	$p = 0.0095$
Grados de libertad	5	Grados de libertad	5
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Rechazamos H0 a un nivel significativo del 5% pero Aceptamos H0 a un nivel de significado del 1%	Conclusión	Rechazamos H0 a a un nivel de significado del 1%
PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Pearson tipo III	H0:	La muestra proviene de una distribución Gev
H1:	La muestra no proviene de una distribución Pearson tipo III	H1:	La muestra no proviene de una distribución Gev
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 76.00$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 16.40$
Valor -p	$p = 0.0000$	Valor -p	$p = 0.0025$
Grados de libertad	4	Grados de libertad	4
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Rechazamos H0 a a un nivel de significado del 1%	Conclusión	Rechazamos H0 a a un nivel de significado del 1%

Tabla 7.6 Resultados de la prueba Chi Cuadrado para cada Distribución, duración 20 minutos.

PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Gumbel	H0:	La muestra proviene de una distribución Weibull
H1:	La muestra no proviene de una distribución Gumbel	H1:	La muestra no proviene de una distribución Weibull
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 4.80$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 17.60$
Valor -p	$p = 0.4408$	Valor -p	$p = 0.0035$
Grados de libertad	5	Grados de libertad	5
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Rechazamos H0 a a un nivel de significado del 1%
PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Pearson tipo III	H0:	La muestra proviene de una distribución Gev
H1:	La muestra no proviene de una distribución Pearson tipo III	H1:	La muestra no proviene de una distribución Gev
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 95.20$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 4.40$
Valor -p	$p = 0.0000$	Valor -p	$p = 0.3546$
Grados de libertad	4	Grados de libertad	4
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Rechazamos H0 a a un nivel de significado del 1%	Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%

Tabla 7.7 Resultados de la prueba Chi Cuadrado para cada Distribución, duración 30 minutos.

PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Gumbel	H0:	La muestra proviene de una distribución Weibull
H1:	La muestra no proviene de una distribución Gumbel	H1:	La muestra no proviene de una distribución Weibull
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 8.00$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 25.20$
Valor -p	$p = 0.1562$	Valor -p	$p = 0.0001$
Grados de libertad	5	Grados de libertad	5
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Rechazamos H0 a a un nivel de significado del 1%
PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Pearson tipo III	H0:	La muestra proviene de una distribución Gev
H1:	La muestra no proviene de una distribución Pearson tipo III	H1:	La muestra no proviene de una distribución Gev
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 105.20$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 5.60$
Valor -p		Valor -p	$p = 0.2311$
Grados de libertad	4	Grados de libertad	4
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Rechazamos H0 a a un nivel de significado del 1%	Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%

Tabla 7.8 Resultados de la prueba Chi Cuadrado para cada Distribución, duración 60 minutos.

PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Gumbel	H0:	La muestra proviene de una distribución Weibull
H1:	La muestra no proviene de una distribución Gumbel	H1:	La muestra no proviene de una distribución Weibull
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 2.80$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 9.60$
Valor -p	$p = 0.7308$	Valor -p	$p = 0.0874$
Grados de libertad	5	Grados de libertad	5
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Aceptamos H0 a a un nivel de significado del 5%
<p>Pearson tipo III (Maxima verosimilitud) En la estimacion de parametros. El sistema de ecuacion no tiene solucion</p>		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
		H0:	La muestra proviene de una distribución Gev
		H1:	La muestra no proviene de una distribución Gev
		Resultado de la estadística	$\chi^2 = 4.40$
		Valor -p	$p = 0.3546$
		Grados de libertad	4
		Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a a un nivel de significado del 1%		

Tabla 7.9 Resultados de la prueba Chi Cuadrado para cada Distribución, duración 120 minutos.

PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Gumbel	H0:	La muestra proviene de una distribución Weibull
H1:	La muestra no proviene de una distribución Gumbel	H1:	La muestra no proviene de una distribución Weibull
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 4.80$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 1.60$
Valor -p	$p = 0.4408$	Valor -p	$p = 0.9012$
Grados de libertad	5	Grados de libertad	5
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Aceptamos H0 a a un nivel de significado del 5%
PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Pearson tipo III	H0:	La muestra proviene de una distribución Gev
H1:	La muestra no proviene de una distribución Pearson tipo III	H1:	La muestra no proviene de una distribución Gev
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 8.40$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 1.60$
Valor -p	$p = 0.0780$	Valor -p	$p = 0.8088$
Grados de libertad	4	Grados de libertad	4
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Aceptamos H0 a a un nivel de significado del 1%

Tabla 7.10 Resultados de la prueba Chi Cuadrado para cada Distribución, duración 180 minutos.

PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Gumbel	H0:	La muestra proviene de una distribución Weibull
H1:	La muestra no proviene de una distribución Gumbel	H1:	La muestra no proviene de una distribución Weibull
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 1.20$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 0.40$
Valor -p	$p = 0.9449$	Valor -p	$p = 0.9953$
Grados de libertad	5	Grados de libertad	5
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Aceptamos H0 a a un nivel de significado del 5%
PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Pearson tipo III	H0:	La muestra proviene de una distribución Gev
H1:	La muestra no proviene de una distribución Pearson tipo III	H1:	La muestra no proviene de una distribución Gev
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 1.60$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 1.20$
Valor -p	$p = 0.8088$	Valor -p	$p = 0.8781$
Grados de libertad	4	Grados de libertad	4
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Aceptamos H0 a a un nivel de significado del 1%



Tabla 7.11 Resultados de la prueba Chi Cuadrado para cada Distribución, duración 240 minutos.

PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Gumbel	H0:	La muestra proviene de una distribución Weibull
H1:	La muestra no proviene de una distribución Gumbel	H1:	La muestra no proviene de una distribución Weibull
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 1.20$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 3.60$
Valor -p	$p = 0.9449$	Valor -p	$p = 0.6083$
Grados de libertad	5	Grados de libertad	5
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%
PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Pearson tipo III	H0:	La muestra proviene de una distribución Gev
H1:	La muestra no proviene de una distribución Pearson tipo III	H1:	La muestra no proviene de una distribución Gev
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 2.00$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 1.20$
Valor -p	$p = 0.7358$	Valor -p	$p = 0.8781$
Grados de libertad	4	Grados de libertad	4
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 1%

Tabla 7.12 Resultados de la prueba Chi Cuadrado para cada Distribución, duración 360 minutos.

PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Gumbel	H0:	La muestra proviene de una distribución Weibull
H1:	La muestra no proviene de una distribución Gumbel	H1:	La muestra no proviene de una distribución Weibull
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 3.20$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 3.20$
Valor -p	$p = 0.6692$	Valor -p	$p = 0.6692$
Grados de libertad	5	Grados de libertad	5
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%
PRUEBA DE CHI CUADRADO		PRUEBA DE CHI CUADRADO	
H0:	La muestra proviene de una distribución Pearson tipo III	H0:	La muestra proviene de una distribución Gev
H1:	La muestra no proviene de una distribución Pearson tipo III	H1:	La muestra no proviene de una distribución Gev
Resultado de la estadística	$\chi^2 = 0.80$	Resultado de la estadística	$\chi^2 = 3.20$
Valor -p	$p = 0.9384$	Valor -p	$p = 0.5249$
Grados de libertad	4	Grados de libertad	4
Numero de clases	8	Numero de clases	8
Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 5%	Conclusión	Aceptamos H0 a un nivel de significado del 1%

En la ilustración 7 para una duración de 10 minutos; se rechazó que la muestra provenía de la distribución Gumbel, pero la aceptó a un nivel de significado del 1%. De manera muy similar se ajustó la distribución Gev, en la que el ajuste rechazó que la muestra provenía de esta distribución, a un nivel de significado del 1%. Y como se puede observar en la ilustración 7 hay datos en los que el comportamiento de la distribución no se ajusta a los mismos, a lo que se puede deber el porcentaje de aceptación de la distribución.

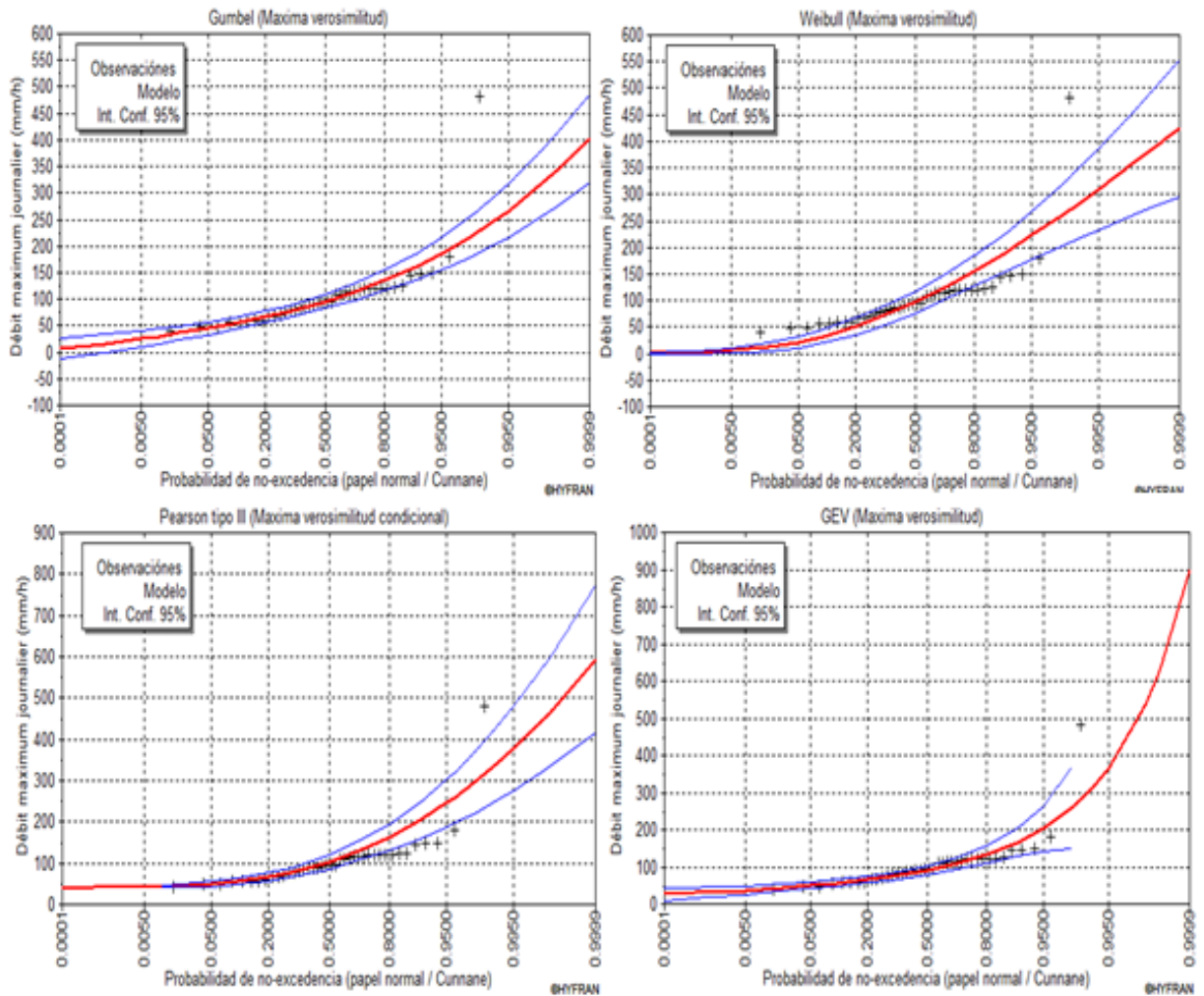


Ilustración 7. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 10 minutos.

Para 20 minutos se ajustó a las diferentes distribuciones modeladas en el software, tales como Gumbel, Weibull, Pearson Tipo III y Gev, mostrando un comportamiento similar para cada una de éstas, como se puede ver en la ilustración 8.

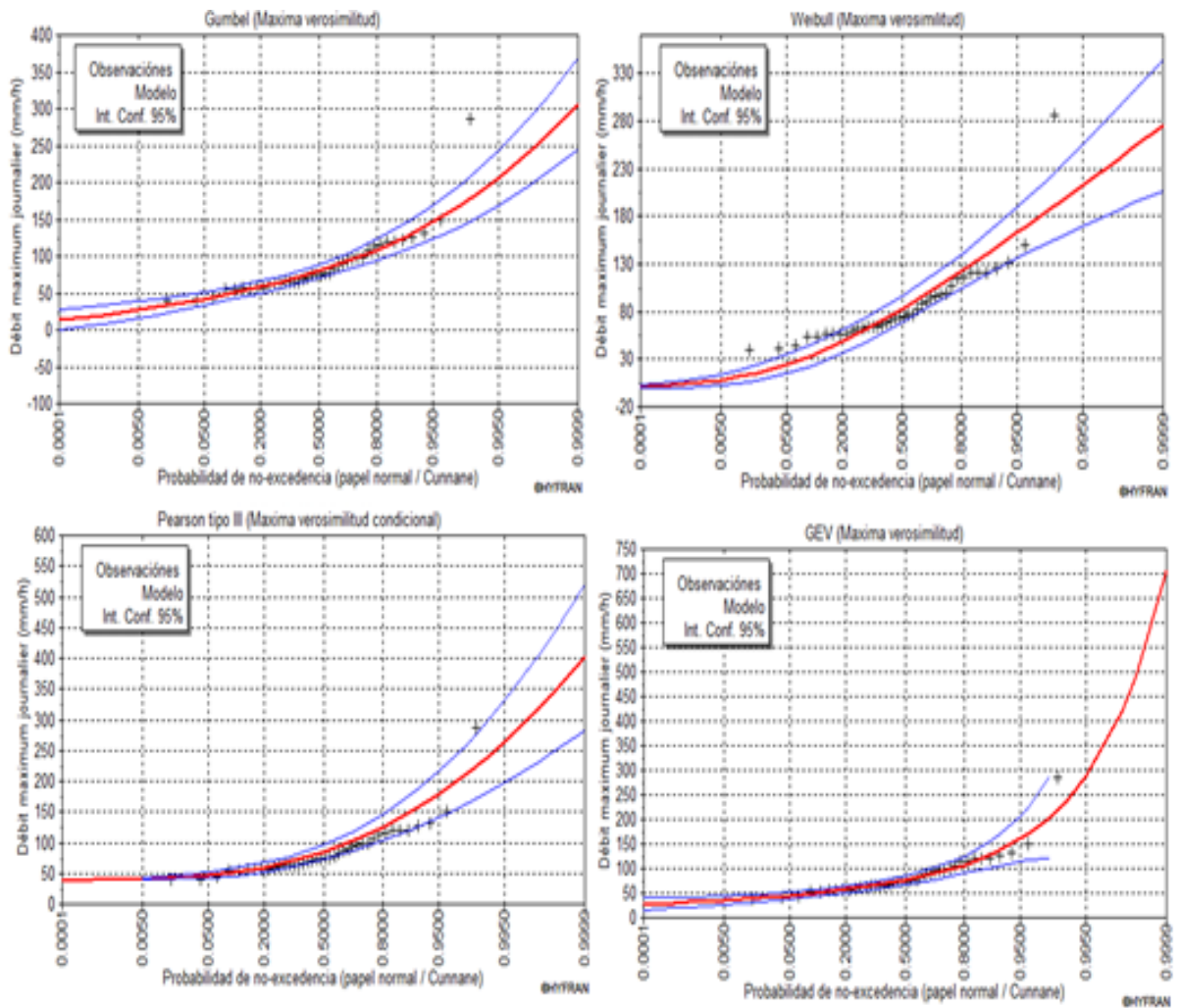


Ilustración 8. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 20 minutos.

En la ilustración 9 se muestra el comportamiento gráfico del modelo en el software Hyfran para una duración de 30 minutos. En éste se observa un comportamiento similar para todas las distribuciones, cabe resaltar que la distribución Gev es una de las distribuciones que más se ajusta a los datos gráficamente, y se puede observar en la tabla 7.4 que arroja un menor valor en la prueba Chi cuadrado, en relación a las demás distribuciones.

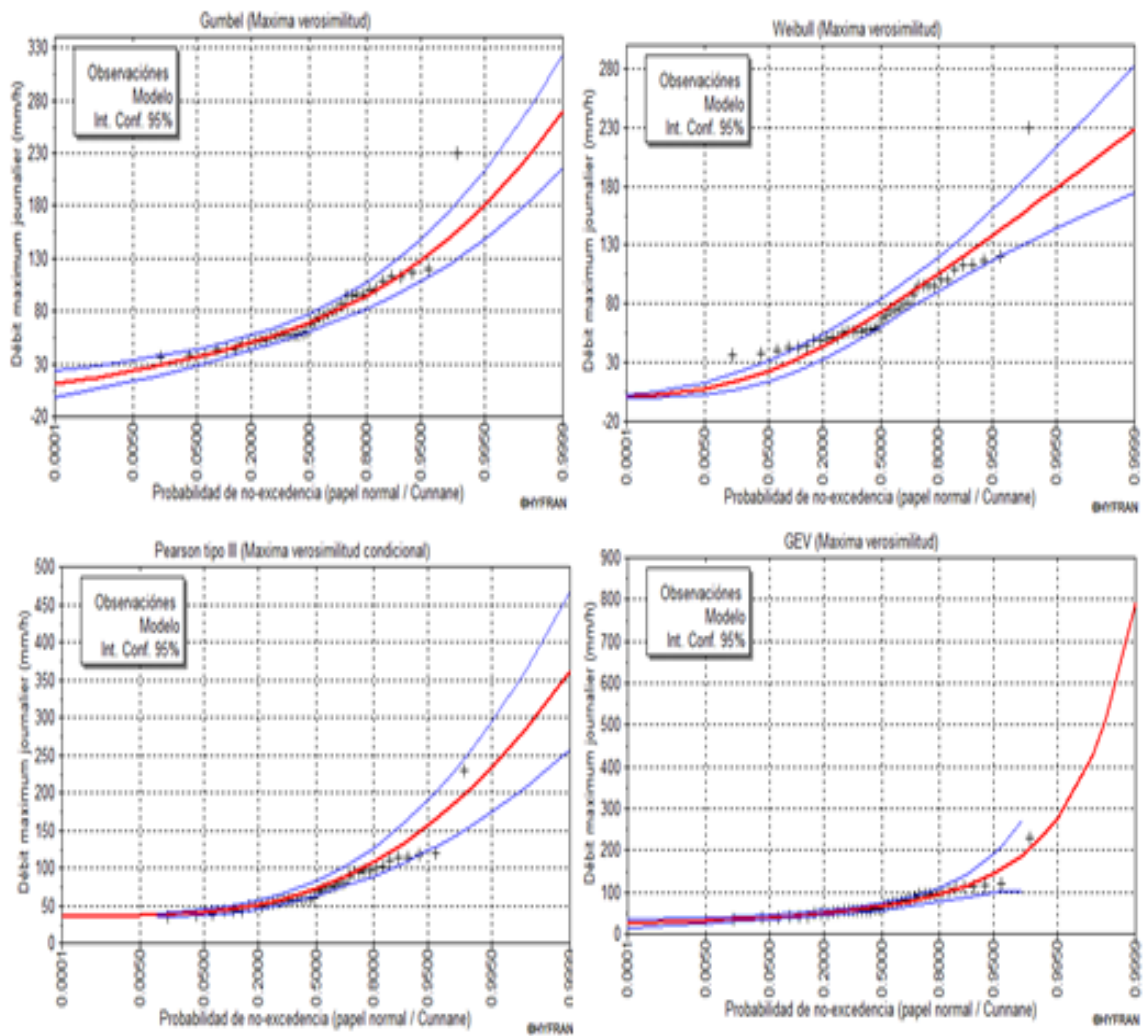


Ilustración 9. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 30 minutos.



En la ilustración 10 se muestra las gráficas para una duración de 60 minutos en la cual no se halla solución para la distribución de Pearson Tipo III y de acuerdo con la tabla 7.4 la distribución que mejor se ajusta a la serie de datos es la Gumbel, ya que es la que reporta un menor valor en cuanto a la prueba de bondad de ajuste.

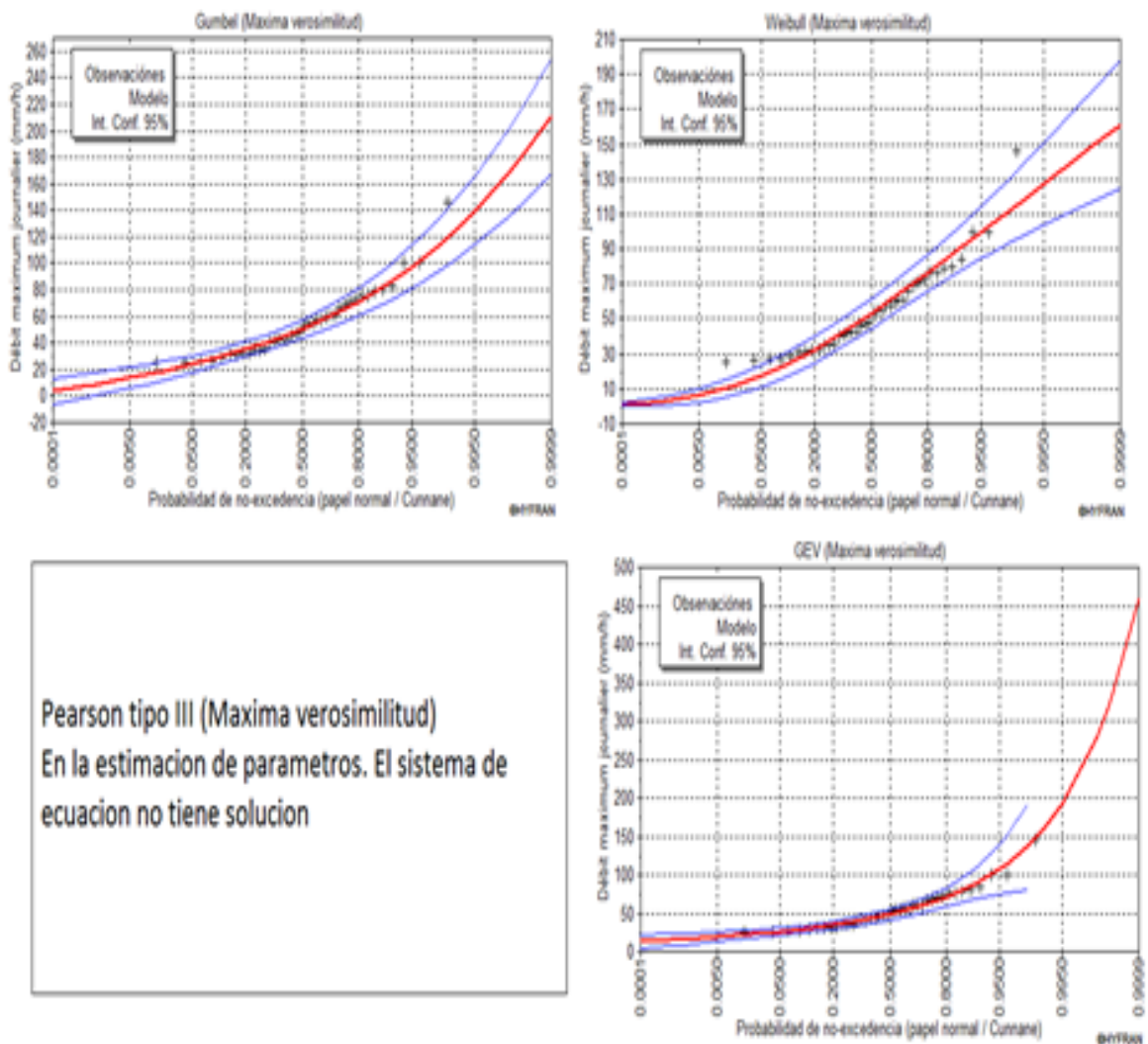


Ilustración 10. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 60 minutos.

En la ilustración 11 se muestra el ajuste de datos para 120 minutos, en esta las distribuciones muestran un comportamiento muy similar, es decir, en general se acepta que la serie de datos proviene de estas distribuciones de probabilidad, aunque según la tabla 7.4 las distribuciones que mejor se ajustan a los datos son la Weibull y la Gev.

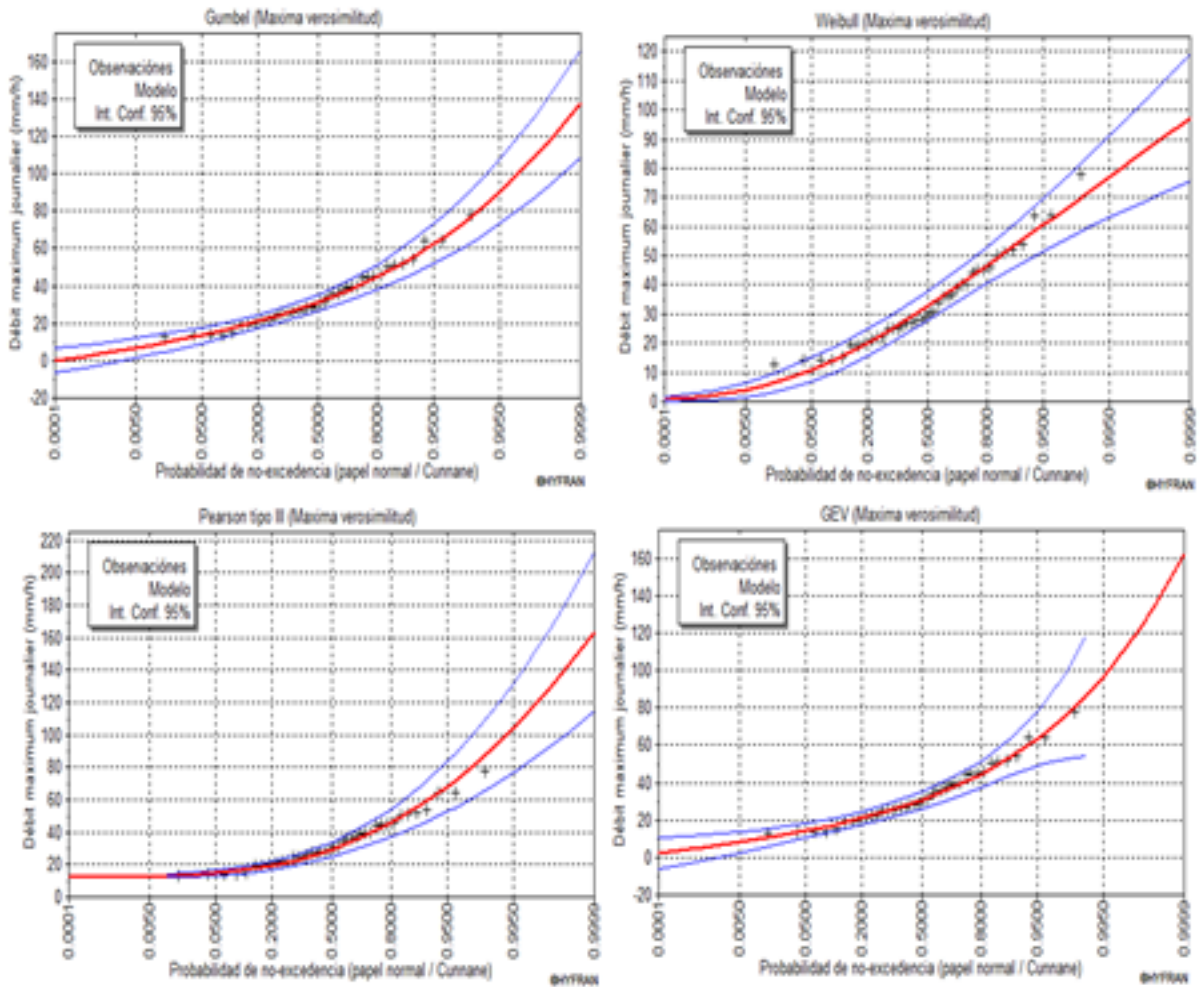


Ilustración 11. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 120 minutos.

En la ilustración 12 se muestra el ajuste de datos para 180 minutos, en la que se observa el mismo nivel de aceptación para cada una de las distribuciones modeladas. Aunque para el gráfico 7.4 resultado de la prueba de bondad de ajuste, la distribución que mejor se ajusta es la Weibull.

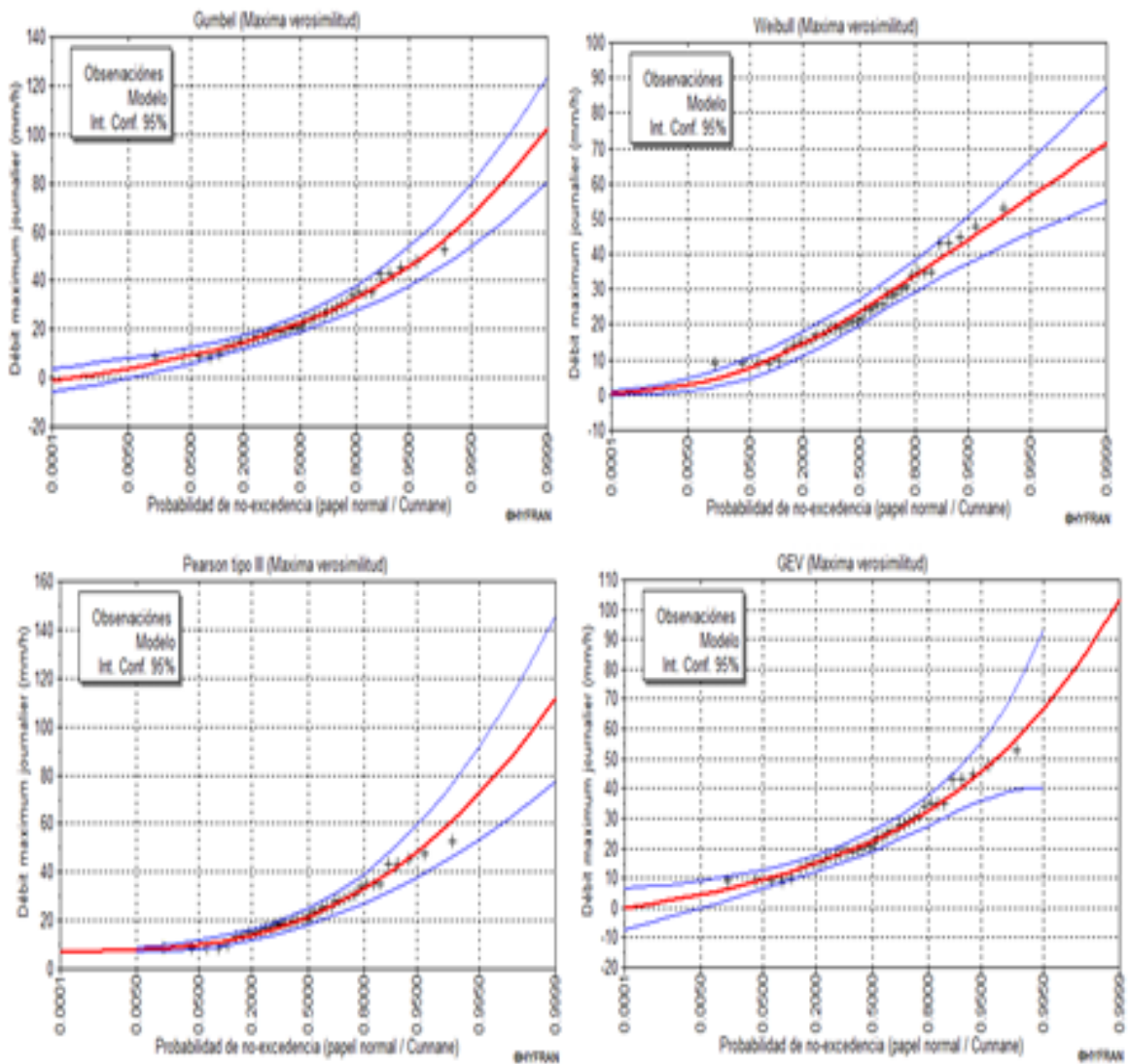


Ilustración 12. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 180 minutos.

En la Ilustración 13 se muestra el ajuste de la serie de datos para 240 minutos, en la cual se observa un comportamiento similar para cada una de las distribuciones, pero para la prueba de bondad de ajuste, tabla 7.4 las distribuciones que mejor se ajustan a los datos son la Gumbel y Gev.

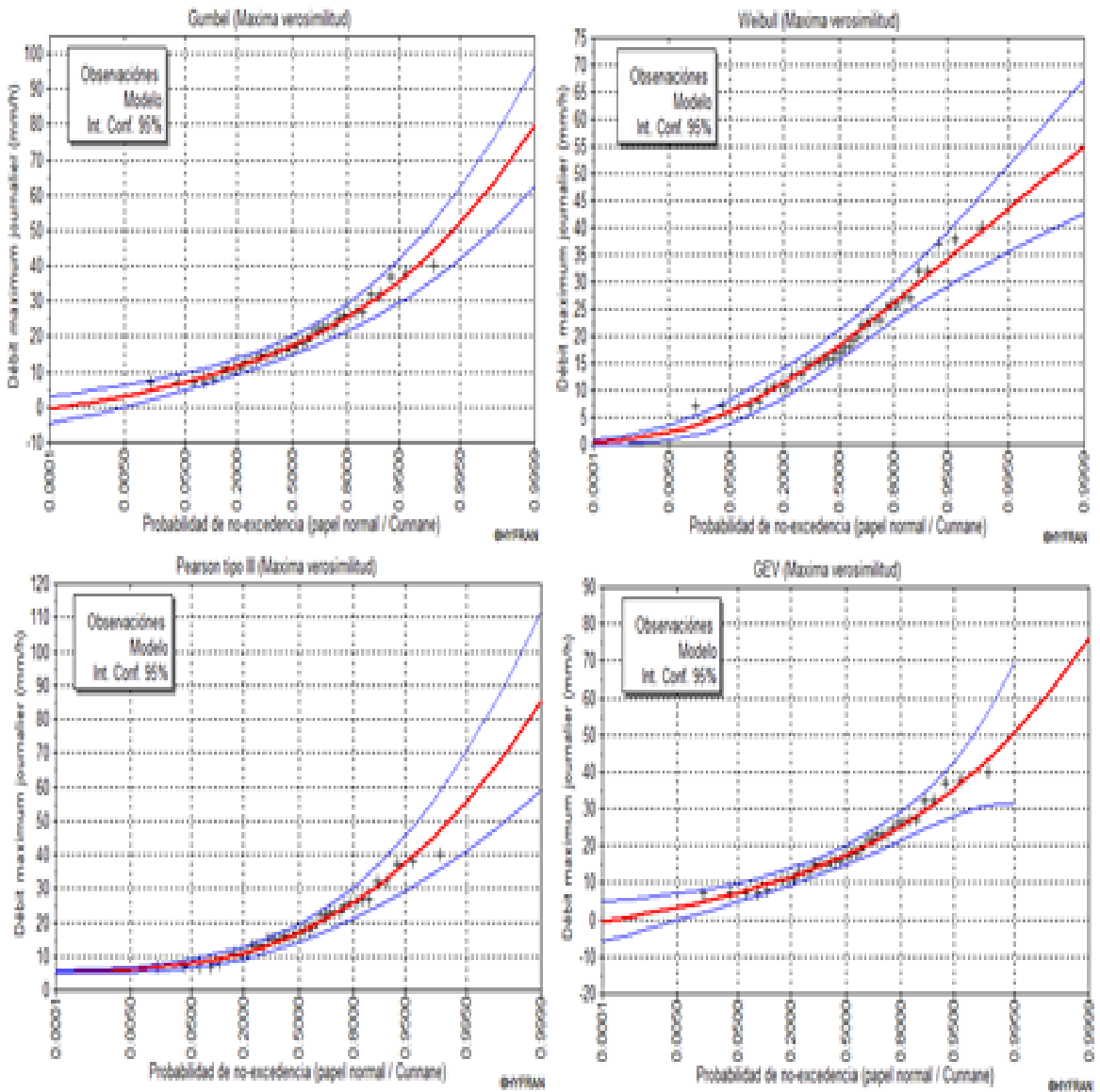


Ilustración 13. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 240 minutos.

En la Ilustración 14 se muestra el ajuste gráfico para datos con duraciones iguales a 360 minutos, en éste se puede observar que se tiene un comportamiento similar para todas las distribuciones modeladas.

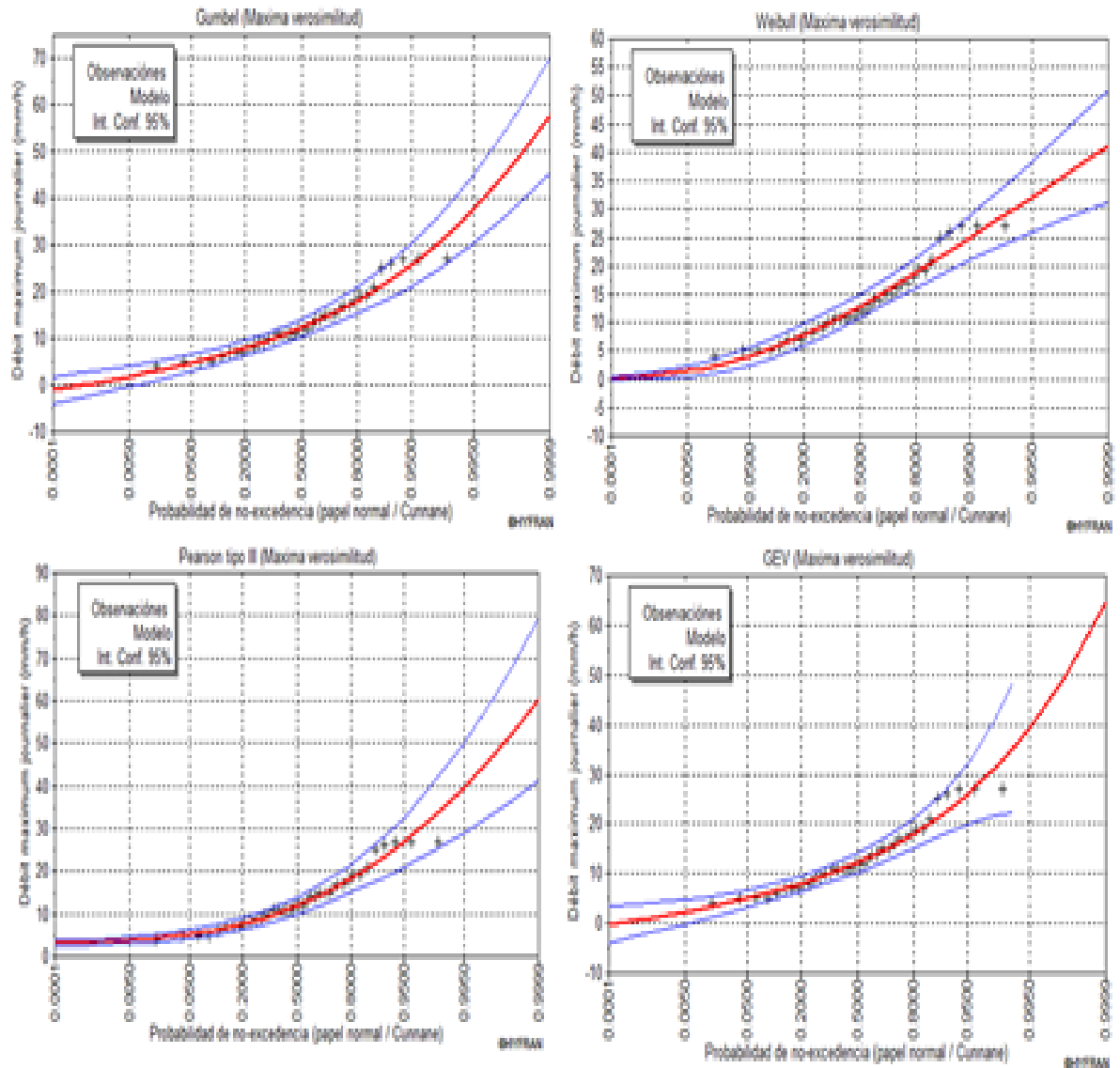


Ilustración 14. Ajuste de datos por diferentes distribuciones de probabilidad para 360 minutos.

### 7.1.1. Diseño de ecuación para obtención de curvas IDF una población.

Para el diseño de la ecuación de la curva IDF de una población se utilizará los datos ajustados a través de la distribución Gumbel en los que se relacionan los valores de las intensidades para duraciones de 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 y 360, con periodos de retorno de 5, 10, 20, 25,50 y 100 años.

Tabla 7.13. Intensidades para cada una de las duraciones con su respectivo periodo de retorno.

T	10	20	30	60	120	180	240	360
100	242	188	165	127	93,5	60,6	47,2	34
50	218	170	149	115	82,7	54,3	42,3	30,4
25	194	152	133	102	71,8	48	37,4	26,8
20	186	146	128	97,6	68,2	45,9	35,7	25,7
10	161	128	112	84,6	57	39,4	30,7	22
5	135	109	95	71	45,5	32,6	25,4	18,1

Con los valores reportados en la tabla anterior se determinan las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, utilizando la ecuación 4.1 en la que se relacionan las tres variables simultáneamente. Esta es esbozada de la siguiente manera.

$$I = \frac{k * (T^m)}{(d + c)^n}$$

Para encontrar las constantes de la ecuación anterior  $k, m, n$  y  $c$  se realiza un análisis de correlación lineal múltiple, ejecutando el siguiente procedimiento:

- Aplicando logaritmos se obtiene:

$$\log I = \log k + m \log T - n \log(d + c)$$

- Igualando cada uno de los elementos de la siguiente forma:

$$\log I = y$$

$$\log k = a_0$$

$$m \log T = a_1 x_1$$

$$-n \log (d + c) = a_2 x_2$$

- Reemplazando estos valores en la ecuación, se obtiene el siguiente resultado: (7.1)

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

Los valores de T y d son conocidos, para hallar los demás valores es necesario que la constante c sea calculada, colocándole un valor para cada regresión a realizar. Teniendo en cuenta lo anterior se proceden a dar valores a c de 5, 10 y 20, en la gráfica se muestran los resultados del coeficiente de correlación y el valor de c, donde podemos observar que para c=10, el valor del coeficiente de correlación, es mucho más cercano a 1:

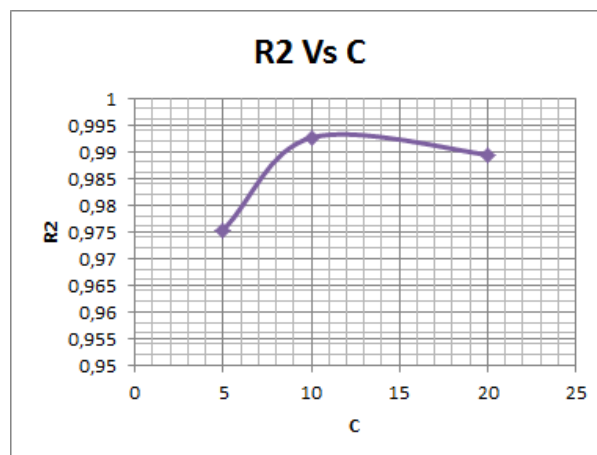


Ilustración 15. R2 vs c



Como ya se dijo anteriormente, los valores para  $c=10$  se ajustan más a los datos que se están analizando, ya que si observamos valores como el coeficiente de correlación, que es quien nos da una idea de cómo es la relación de los datos con el ajuste, cuanto es más cercano a 1, el valor de este, se tiene un mejor ajuste.

Hallado el valor de  $c$  podemos conocer el valor de las demás constantes que forman la ecuación, en este sentido, con los valores obtenidos del análisis de la correlación lineal múltiple perteneciente a  $c=10$  encontramos los valores de cada uno de los componentes de la ecuación. En la siguiente tabla se muestra un resumen estadístico de la regresión múltiple.

Tabla 7.14 Resumen de la estadística de la regresión.

<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coefficiente de correlación múltiple	0,99629971							
Coefficiente de determinación $R^2$	0,992613112							
$R^2$ ajustado	0,992284805							
Error típico	0,026932438							
Observaciones	48							
<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>								
	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>			
Regresión	2	4,386138231	2,193069115	3023,43745	1,09745E-48			
Residuos	45	0,032641029	0,000725356					
Total	47	4,41877926						
	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	3,098856074	0,024369546	129,0583816	1,8156E-59	3,096011406	3,19417698	3,096011406	3,194176977
Variable X 1	0,17121045	0,00909832	22,07864742	8,8501E-26	0,182553634	0,21920355	0,182553634	0,219203546
Variable X 2	-0,703330441	0,010285753	-74,56143926	8,5106E-49	-0,787637118	-0,74620398	-0,787637118	-0,746203978



De esta manera, según la tabla .7.14 los valores de ecuación 7.1 son:

$$a_0 = 3,0989$$

$$a_1 = 0,1712$$

$$a_2 = -0,7033$$

Y los valores de los parámetros de la ecuación 4.1 son:

$$k = 10^{3,0989} = 1255,61$$

$$m = 0,1712$$

$$n = 0,7033$$

Por lo que la ecuación de la curva IDF es:

$$I = \frac{1255,61 * (Tr)^{0,171}}{(D + 10)^{0,703}} \quad (7.2)$$

Obtenida la ecuación de diseño podemos realizar una comparación entre la ecuación inicial, generada por la Universidad de Cartagena y la que hemos generado en nuestra investigación. En la tabla 7.15 se muestran cada una de las ecuaciones con sus respectivos valores en el que se observa que estos son distintos en muchos aspectos, el valor de k en la ecuación de la UTB, es mucho mayor que la de la UDC, la supera en un valor doble al inicial. De igual forma para el valor de n, se observa un aumento, de la ecuación generada actualmente, en relación con la ecuación anterior, caso contrario para el valor de m, el cual reportó una disminución en relación a la ecuación anterior.

Tabla 7.15. Ecuaciones Generadas por la UTB y UDC

<b>Ecuación UDC</b>	<b>Ecuación UTB</b>
$I = \frac{616,97 * (Tr)^{0,18}}{(D + 10)^{0,561}}$	$I = \frac{1255,61 * (Tr)^{0,171}}{(D + 10)^{0,703}}$

Con las ecuaciones mostradas en la tabla 7.15 se obtuvieron los valores de las intensidades para cada uno de los periodos de retorno. De la ecuación de la Universidad de Cartagena se obtuvo los valores de las intensidades mostradas en la tabla 7.16.

Tabla 7.16. Valores de Intensidades con la Ecuación de la UDC.

<b>T</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>360</b>
<b>5</b>	153,532	122,296	104,069	76,028	53,722	43,420	37,224	29,875
<b>10</b>	173,934	138,547	117,898	86,131	60,861	49,190	42,171	33,845
<b>20</b>	197,047	156,958	133,565	97,577	68,948	55,727	47,775	38,343
<b>25</b>	205,123	163,391	139,039	101,576	71,774	58,011	49,733	39,914
<b>50</b>	232,381	185,103	157,515	115,074	81,312	65,720	56,342	45,218
<b>100</b>	263,260	209,700	178,446	130,365	92,117	74,453	63,829	51,227

De la ecuación generada bajo nuestra investigación obtenemos los valores para las intensidades reportadas en la tabla 7.17.

Tabla 7.17. Valores de Intensidades con la Ecuación de la UTB.

<b>T</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>360</b>
<b>5</b>	201,128	151,225	123,523	83,332	53,917	41,287	34,039	25,836
<b>10</b>	226,470	170,279	139,088	93,832	60,711	46,489	38,329	29,092
<b>20</b>	255,007	191,735	156,613	105,656	68,361	52,347	43,158	32,758
<b>25</b>	264,938	199,202	162,712	109,770	71,023	54,385	44,839	34,033
<b>50</b>	298,321	224,302	183,215	123,602	79,972	61,238	50,489	38,322
<b>100</b>	335,910	252,565	206,301	139,176	90,048	68,954	56,850	43,150

Con los valores de las tablas 7.16 y 7.17 graficamos las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia, con sus respectivos periodos de retorno, como se puede observar en la ilustración 16.

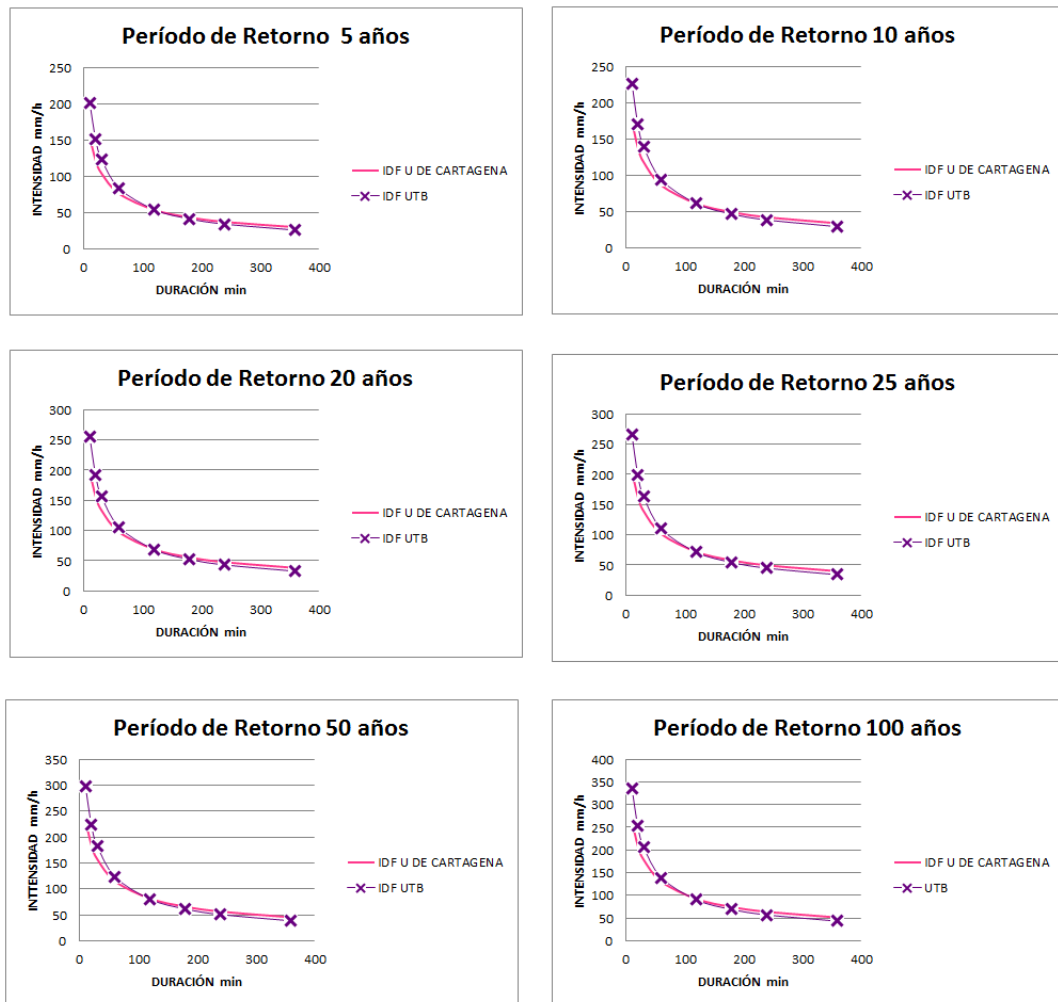


Ilustración 16. Valores de las Intensidades, para cada una de las ecuaciones (UTB y UDC).

En el análisis de la ilustración 16 podemos destacar lo siguiente:

- Presentaron un comportamiento similar, en cada uno de los periodos de retorno, para valores de duraciones mayores a los 100 minutos.
- Para duraciones menores a 100 minutos se obtuvieron mayores intensidades de lluvia en la curva IDF de la UTB, lo cual repercutió en el

cálculo de una intensidad mayor en relación a la curva de Universidad de Cartagena.

De acuerdo a los resultados anteriores, si comparamos los periodos de lluvia en años anteriores, con los que actualmente se presentan, evidencia el comportamiento de las gráficas anteriores, ya que se muestra un aumento en cuanto a los valores de intensidades reportados por las mismas.

## **7.2. Elaboración de las curvas IDF con la distribución mixta de probabilidad Gumbel-Gumbel**

Para modelar las curvas IDF de dos poblaciones se utilizó la información que se obtuvo a partir de las intensidades máximas, para cada uno de los meses correspondientes, a cada año registrado por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Junto con información del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y la Organización meteorológica mundial (OMM) con la cual, se identificó cuáles de los valores pertenecían a cada evento, ya sea ciclónico o no ciclónico.

Para identificar que alturas de precipitación pertenecían a un evento ciclónico, como lo son la niña y los huracanes. Se utilizó la tabla 4.4 suministrada por el NOAA y la información encontrada en la organización meteorológica mundial (OMM) expuesta en el ítem 4.7 con la cual se comparó el comportamiento de las alturas máxima de precipitación de la tabla 7.1 superponiéndolas en los diferentes años en que ocurrieron eventos niña y huracanes, acogiendo como intensidad ciclónica a aquella que coincidía con la ocurrencia de este tipo de fenómeno, como se puede observar en la tabla 7.18.

Tabla 7.18. Valores Registrados para cada año.

Fecha		Duración (min)							
		10	20	30	60	120	180	240	360
Año	Mes								
2010	Mayo	19,2	25,8	31,2	60	99,4	104,3	109,5	116
	Octubre	17,5	23,3	34	45,7	46,2	47,2	60,9	63,8
	Noviembre	10	14,5	19,3	24,6	32,3	36,8	42	63,4
2009	Agosto	12,7	21,2	28	30,8	30,8	31,1	31,9	31,9
	Octubre	11	18	22	40	55,6	58,1	59,8	59,9
2008	Mayo	11,1	20,7	24,5	30,5	32,9	32,9	32,9	32,9
	Noviembre	10,6	13,6	15,2	27,2	37,1	41,9	42,6	43,2
2007	Mayo	19,2	33,1	47,8	76,4	104,6	105,6	105,6	105,6
2006	Mayo	10	17	19	34,5	39,6	44,2	45	45,9
	Octubre	14,5	19	22	23,8	26,9	26,9	26,9	26,9
2005	Mayo	9,4	14,2	20,9	30,8	38,8	55,5	63,5	65,7
	Octubre	9,7	18,8	21,3	27,7	43,9	44,9	54,6	57,1
2004	Mayo	5,3	7,8	11,5	14,8	24,5	27,8	33,4	39,1
	Octubre	9,4	18	26,2	29,1	29,1	29,9	29,9	29,9
2003	Noviembre	9,8	19,1	28,3	52,9	89,4	105,2	109	124,2
2002	Octubre	8	12,9	19,8	26,4	27,4	27,4	27,4	27,4
	Junio	0,3	0,5	0,7	1	1,1	1,1	1,1	1,1
2001	Octubre	11,9	21,2	29,9	43,1	50,1	50,8	51,8	52,2
	Junio	9,6	16,9	21,3	23,1	23,1	23,1	23,1	23,1
2000	Julio	13,1	23,1	28,6	54,8	72,1	72,8	73,1	73,1
	Septiembre	12,3	25,1	31,1	37,9	39,9	40,7	41,8	43,1
1999	Agosto	14,6	27,3	37	55,2	80,5	87	87	101,8
1998	Septiembre	19	31,8	37	46,2	50,2	57,1	68,8	79,8
	Mayo	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1997	Noviembre	9,7	19,2	28,3	55,5	72,5	75,4	77	77,2
	Junio	24	43,9	58,7	80,3	90,6	91	91	92,4
1996	Octubre	5,5	9,7	12,7	14,7	18,3	19,5	20,7	21,6
	Junio	8	20	21,5	27	27,8	28,2	28,5	29,8



Fecha		Duración (min)							
		10	20	30	60	120	180	240	360
Año	Mes								
1995	Julio	10,5	16,7	25,6	45,3	64,7	66,9	68	68
	Agosto	11,3	18	24,7	36,3	51,2	76,7	80,9	81
1994	Noviembre	15,14	25,04	28,84	42,44	43,64	44,04	44,34	44,34
	Agosto	3,5	5,4	5,6	6,4	6,6	6,6	6,6	6,6
1993	Mayo	0,3	0,6	1,3	1,3	2,1	2,5	2,5	2,5
	Septiembre	1,6	2	2	2,2	2,8	3,4	3,4	3,4
1992	Junio	16	21,2	25,8	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8
	Julio	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1991	Septiembre	9,5	14,7	19,2	25,2	25,3	25,9	28,3	28,4
	Mayo	8,2	13,6	14,7	16,7	27,6	27,8	27,8	27,8
1990	Septiembre	15,9	24,8	40,7	57,3	68,2	71	71,6	71,6
	Diciembre	14,3	19,3	25,3	30,8	42,5	66,1	72,2	82
1989	Septiembre	9,6	19	27,5	48	53,7	67,2	68,8	68,8
1988	Junio	13,9	23,9	32,9	43,3	56	60,3	60,5	66,1
	Mayo	12,9	25,2	34,9	47	47,7	47,8	47,8	47,8
1987	Septiembre	18	32	44	66,1	72,7	72,7	73,2	73,5
	Octubre	13,7	25,1	32,9	58,2	80,9	84,5	90,4	93,3
1986	Octubre	9,5	16,6	19,6	27	38,8	40	43,7	54,3
	Junio	15,8	21,7	25,2	40,9	53,2	53,2	53,2	53,2
1985	Agosto	10	20	28,2	53,2	69,5	70,1	70,1	70,1
	Octubre	20,3	40,4	50,5	71,4	108,9	134,9	146,1	147,8
1984	Agosto	18,6	34,9	44,2	55,9	61	62,5	64,3	64,3
	Julio	24,5	42	54,5	83,5	92,4	92,4	92,4	92,4
1983	Noviembre	16,9	23,4	36,2	47,5	49,7	49,7	49,7	49,7
	Septiembre	19,5	29,2	38,6	57,1	58,7	58,7	58,7	61
1982	Agosto	6,8	13,5	18,2	32,3	38,1	38,1	38,1	38,1
	Noviembre	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
1981	Septiembre	2,5	5	6,8	8,5	12	12,4	12,4	12,4
	Octubre	18	24,5	28,5	32,3	42,3	48,8	58,4	70,7
1980	Julio	20	40	56,5	100	127,2	129	129,3	163,5
1979	Octubre	20	30	46,7	74,5	100	123	127,5	131,8



Fecha		Duración (min)							
		10	20	30	60	120	180	240	360
Año	Mes								
	Abril	9	15,5	19,7	36,9	48,7	74,6	81,8	89,3
1978	Octubre	9,8	16,2	21,5	29	39,4	43,2	46,3	54
	Septiembre	20	38,8	47,3	60,6	62,4	64,3	64,8	66,5
1977	Noviembre	11,3	21	29,4	29,7	29,7	29,7	29,7	43
	Agosto	14,9	20,4	27,1	42,5	62,6	63,1	63,1	63,1
1976	Octubre	8,5	16,5	19,5	35	49,8	50,7	50,7	50,7
	Septiembre	13,6	23,6	29,1	35,3	38,2	39,2	39,2	39,2
1975	Julio	80,2	95,2	115,2	146,3	156,9	158,4	159,6	163,2
	Agosto	30	54	74,4	95,9	98,6	98,6	98,6	98,6
1974	Septiembre	25	38	50	73	74,4	74,4	74,4	74,4
1973	Mayo	30	50	60	75,7	78,5	78,5	89,9	90,1
	Octubre	17	29,5	39,5	50,5	57,1	57,2	58,1	58,1
1972	Junio	20	32,5	48	78,5	101,3	102	102,3	102,3
	Abril	12,5	22	29,5	45,2	54	54	54	54
1971	Enero	17,3	30	40	60,7	63,5	63,5	63,5	63,5
	Junio	20,7	25,1	30,1	45	72,9	84,6	99,5	113,8
1970	Diciembre	10	14,2	15,5	20,3	20,5	20,5	20,5	20,7
	Julio	20	35,5	47,5	69	88,8	143	153,7	153,7

### Convención

xxx Fenómeno niña

xxx Huracanes



En la tabla 7.19 se muestran las intensidades de mayor valor, correspondiente a cada año, sin importar el mes a que corresponde dicho valor.

Tabla 7.19. Valores Registrados para cada año.

Duración (min)								
Fecha	10	20	30	60	120	180	240	360
Año	Alturas de Precipitación							
2010	19,2	25,8	34	60	99,4	104,3	109,5	116
2009	12,7	21,2	28	40	55,6	58,1	59,8	59,9
2008	11,1	20,7	24,5	30,5	37,1	41,9	42,6	43,2
2007	19,2	33,1	47,8	76,4	104,6	105,6	105,6	105,6
2006	14,5	19	22	34,5	39,6	44,2	45	45,9
2005	9,7	18,8	21,3	30,8	43,9	55,5	63,5	65,7
2004	9,4	18	26,2	29,1	29,1	29,9	33,4	39,1
2003	9,8	19,1	28,3	52,9	89,4	105,2	109	124,2
2002	8	12,9	19,8	26,4	27,4	27,4	27,4	27,4
2001	11,9	21,2	29,9	43,1	50,1	50,8	51,8	52,2
2000	13,1	25,1	31,1	54,8	72,1	72,8	73,1	73,1
1999	14,6	27,3	37	55,2	80,5	87	87	101,8
1998	19	31,8	37	46,2	50,2	57,1	68,8	79,8
1997	24	43,9	58,7	80,3	90,6	91	91	92,4
1996	8,0	20,0	21,5	27,0	27,8	28,2	28,5	29,8
1995	11,3	18	25,6	45,3	64,7	76,7	80,9	81
1994	15,14	25,04	28,84	42,44	43,64	44,04	44,34	44,34
1993	1,6	2,0	2,0	2,2	2,8	3,4	3,4	3,4
1992	16	21,2	25,8	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8
1991	9,5	14,7	19,2	25,2	27,6	27,8	28,3	28,4
1990	15,9	24,8	40,7	57,3	68,2	71	72,2	82,0
1989	9,6	19,0	27,5	48,0	53,7	67,2	68,8	68,8
1988	13,9	25,2	34,9	47	56	60,3	60,5	66,1
1987	18	32	44	66,1	80,9	84,5	90,4	93,3

Duración (min)								
Fecha	10	20	30	60	120	180	240	360
Año	Alturas de Precipitación							
1986	15,8	21,7	25,2	40,9	53,2	53,2	53,2	53,2
1985	20,3	40,4	50,5	71,4	108,9	134,9	146,1	147,8
1984	24,5	42	54,5	83,5	92,4	92,4	92,4	92,4
1983	19,5	29,2	38,6	57,1	58,7	58,7	58,7	61
1982	6,8	13,5	18,2	32,3	38,1	38,1	38,1	38,1
1981	18	24,5	28,5	32,3	42,3	48,8	58,4	70,7
1980	20	40	56,5	100	127,2	129	129,3	163,5
1979	20,0	30,0	46,7	74,5	100,0	123,0	127,5	131,8
1978	20,0	38,8	47,3	60,6	62,4	64,3	64,8	66,5
1977	14,9	21	29,4	42,5	62,6	63,1	63,1	63,1
1976	13,6	23,6	29,1	35,3	49,8	50,7	50,7	50,7
1975	80,2	95,2	115,2	146,3	156,9	158,4	159,6	163,2
1974	25	38	50	73	74,4	74,4	74,4	74,4
1973	30	50	60	75,7	78,5	78,5	89,9	90,1
1972	20	32,5	48	78,5	101,3	102	102,3	102,3
1971	20,7	30	40	60,7	72,9	84,6	99,5	113,8
1970	20	35,5	47,5	69	88,8	143	153,7	153,7

Identificadas las alturas de precipitación máxima y transformadas a intensidades como ya se mostró en el ítem 7.1 se ordenaron de mayor a menor, sin importar el año de ocurrencia, determinando así los eventos ciclónicos y los no ciclónicos.

Los valores de orden 1 se escogieron como eventos ciclónicos ya que corresponden al año 1975 y durante todo este año el Índice del Niño Oceánico (ONI) reportó la ocurrencia de un fenómeno niña (tabla 4.4). El valor para 360 minutos fue escogido como evento ciclónico debido a que en el año 1980 al cual corresponde éste, hubo la ocurrencia del huracán Allen, el cual tuvo

incidencia entre los meses Julio y Agosto de ese mismo año, periodo en el cual se encuentra este valor (tabla 7.18).

Los valores de orden 2 pertenecientes a 10, 20 y 30 minutos son eventos ciclónicos, ya que corresponden al año 1973 en el cual el periodo comprendido de Mayo a Diciembre se presentó el fenómeno Niña según los valores registrados por el ONI mostrados en la tabla 4.4. El valor para la duración de 360 minutos se reporta como evento ciclónico debido a que el año 1975 al que corresponde éste, muestra la ocurrencia del fenómeno de la Niña de acuerdo con los valores del ONI señalados en la tabla 4.4. Los valores de las duraciones de 60 y 120 minutos son eventos ciclónicos debido a que corresponden al año 1980, en el cual el huracán Allen tuvo su fecha de ocurrencia en el periodo comprendido entre Julio y Agosto, dentro del cual se ubican estos valores. Las duraciones de 180 y 240 minutos se eligieron como eventos ciclónicos, ya que en el año 1970 el huracán Camille, tuvo incidencia en el periodo comprendido entre Julio y Diciembre, cuya fecha corresponde igualmente a los meses reportados en la tabla 7.18 para 1970.

De igual manera los puntos correspondientes a los números de orden 1 y 2, son los valores máximos que se registraron en el procedimiento realizado con el software Hyfran bajo la distribución Gumbel. Si se comparan los dos puntos máximos de las ilustraciones 7 a la 14 son los mismos valores reportados para el número de orden 1 y 2 de la tabla 7.20, los cuales tienen una tendencia diferente a los demás datos, ya que se ubican más distantes de estos dentro de la gráfica.

Para los valores correspondientes a los números de orden 3 a 40 se toman como eventos no ciclónicos debido a que no presentan el mismo comportamiento para las diferentes duraciones, es decir, en un mismo número de orden se pueden presentar fenómenos niña, huracanes o eventos en los que no hubo ninguna incidencia de éstos.

Tabla 7.20. Valores Ordenados y clasificados.

Fecha	Duración (min)							
	10	20	30	60	120	180	240	360
1	481	286	230	146	78	53	40	27
2	180	150	120	100	64	48	38	27
3	150	132	117	84	54	45	37	26
4	147	126	113	80	52	43	32	25
5	144	121	109	79	51	41	32	22
6	124	120	101	76	50	35	27	21
7	122	116	100	76	50	35	27	19
8	120	114	96	75	46	35	26	19
9	120	107	96	73	45	34	26	18
10	120	99	95	71	45	31	25	17
11	120	98	95	69	44	30	23	17
12	120	96	93	66	40	29	23	16
13	117	95	88	61	40	28	23	15
14	115	90	81	61	39	28	22	15
15	115	90	80	60	37	26	22	15
16	114	88	77	57	36	26	20	14
17	108	82	74	57	36	25	19	14
18	108	77	74	55	34	24	18	13
19	96	76	70	55	32	24	18	12
20	95	75	68	53	31	22	17	12
21	95	75	62	48	31	21	17	12
22	91	74	60	47	29	21	16	11
23	89	74	59	46	28	20	16	11
24	88	71	58	45	28	20	16	11
25	87	65	58	43	27	19	15	11
26	83	64	57	43	27	19	15	11
27	82	64	57	42	25	19	15	10
28	79	64	56	41	25	18	15	10

Fecha	Duración (min)							
Numero de orden	10	20	30	60	120	180	240	360
29	76	63	55	40	25	17	13	9
30	71	62	52	35	22	17	13	9
31	68	60	52	35	22	16	13	8
32	67	57	51	32	21	15	11	8
33	59	57	50	32	20	15	11	7
34	58	57	49	31	19	14	11	7
35	58	56	44	31	19	13	10	7
36	57	54	43	29	15	10	8	6
37	56	54	43	27	14	9	7	5
38	48	44	40	27	14	9	7	5
39	48	41	38	26	14	9	7	5
40	41	39	36	25	13	9	7	4

Una vez identificado que evento fue ciclónico o no ciclónico, se procede con el cálculo de la distribución mixta de probabilidad Gumbel – Gumbel. Para esto se utilizara una función de distribución de probabilidad demostrada por Fernando J. González Villarreal, investigador mexicano, la cual corresponde a una función de distribución de probabilidad que modela la incidencia de una tormenta ciclónica y a una función de distribución de probabilidad que modela los datos pertenecientes a un comportamiento no ciclónico, (Véase ecuación 4.24) que se expresa como sigue:

$$F(x) = F_1(x)[p + (1 - p)F_2(x)]$$

Para el cálculo de estos parámetros se utilizarán las intensidades máximas, con las cuales se estimará el valor de  $p$ , cuyo valor corresponde, a la probabilidad de que un año cualquiera, sea no ciclónico.

El valor de  $p$  será calculado con el número de años de registro, en que la intensidad máxima, no fue producida por una tormenta ciclónica, dividida entre el número total de años, ecuación 4.26. Así:

$$p = \frac{N_n}{N_T}$$

Una vez estimado el valor de  $p$ , los demás parámetros se evaluarán, reemplazando, en la ecuación 4.11 la distribución de probabilidad de Gumbel, la cual se define como:

$$F(x)_{Gumbel} = e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}}$$

Se utiliza esta distribución de probabilidad, ya que es la que mostró un mejor comportamiento en cuanto a la construcción de la curva IDF para una población, además de ser la que mejor se ajustó a la serie de valores en la prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado.

Reemplazando la ecuación 4.11, en la ecuación 4.24, la ecuación general que modela los dos comportamientos, será la que se presenta a continuación:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \left[ p + (1-p)e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \right] \quad (7.3)$$

Donde  $\alpha_1$  y  $\beta_1$ , corresponden a la población no ciclónica y  $\alpha_2$  y  $\beta_2$ , corresponden a la ciclónica.

En la tabla 7.20 se muestra una serie de 40 datos, de los cuales las 2 primeras filas pertenecen a eventos ciclónicos y las 38 restantes a eventos no ciclónicos. De este modo y de acuerdo con la ecuación 4.26  $N_n = 38$ ,  $N_T = 40$  el valor de  $p$  para la población no ciclónica será entonces:

$$p = \frac{38}{40} = 0,95$$

Los valores de la media y desviación estándar de la población no ciclónica, calculada a partir de las fórmulas matemáticas, ya conocidas, son:

$$\bar{x}_1 = 93,6; \quad s_1 = 29,6$$

De la misma forma los valores de la media y la desviación estándar de la población ciclónica, correspondientes a los 2 registros más altos de intensidad son:

$$\bar{x}_2 = 330,6; \quad s_2 = 213,0$$

Los parámetros  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$  y  $\beta_2$  son, entonces, de acuerdo con las ecuaciones 4.13 y 4.14. Para la población no ciclónica:

$$\alpha_1 = \frac{\sigma_{y_1}}{s_1} = \frac{1,1365}{29,6}$$

$$\alpha_1 = 0,038459748$$

$$\beta_1 = \bar{x}_1 - \frac{\mu_{y_1}}{\alpha_1} = 93,6 - \frac{0,54239}{0,038459748}$$

$$\beta_1 = 79,47194045$$

De igual manera, para la población ciclónica:

$$\alpha_2 = \frac{\sigma_{y_2}}{s_2} = \frac{0,49838}{213,0}$$

$$\alpha_2 = 0,038459748$$

$$\beta_2 = \bar{x}_2 - \frac{\mu_{y_2}}{\alpha_2} = 93,6 - \frac{0,54239}{0,038459748} = 79,47194045$$

$$\beta_2 = 79,47194045$$

Los valores  $\mu_{y_1}$ ,  $\mu_{y_2}$ ,  $\sigma_{y_1}$  y  $\sigma_{y_2}$ , son obtenidos de la tabla 4.2 de la distribución Gumbel. En la tabla 7.21 se muestra un resumen de los datos calculados anteriormente.

Tabla 7.21. Resumen de datos estadísticos calculados

ESTADÍSTICA	EVENTOS CICLÓNICOS	EVENTOS NO CICLÓNICOS	TOTAL
	(2)	(1)	NT
NÚMERO DE DATOS	2	38	40
MEDIA	330,6	93,6	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	213,0	29,6	
$\mu_y$	0,40434	0,54239	
$\sigma_y$	0,49838	1,1365	
$\alpha$	0,002340026	0,038459748	
$\beta$	157,8070295	79,47194045	
P			0,95

Con los parámetros anteriores, los cuales son los que definen la función de distribución, se procede al cálculo de esta última, para cada intensidad, y para cada una de las poblaciones, ya sea ciclónica o no ciclónica.

Para Intensidades con duraciones iguales a diez minutos se realizó el respectivo cálculo, con base a los datos de la tabla 7.21 generando los valores de la ecuación 7.3. A continuación se muestran los resultados arrojados.



Tabla 7.22. Intensidades máximas para 10 minutos

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
481	1	0,625508843	0,999999805	0,98127525	0,01872475	53,41
180	2	0,386975728	0,979281611	0,94926544	0,05073456	19,71
150	1	0,361159156	0,935783398	0,90589257	0,09410743	10,63
147	2	0,358577236	0,928218262	0,89844925	0,10155075	9,85
144	3	0,355995781	0,91980073	0,89018295	0,10981705	9,11
124	4	0,338979305	0,836085011	0,80845154	0,19154846	5,22
122	5	0,336920305	0,821735878	0,79449206	0,20550794	4,87
120	6	0,335376719	0,810252264	0,78332664	0,21667336	4,62
120	7	0,335376719	0,810252264	0,78332664	0,21667336	4,62
120	8	0,335376719	0,810252264	0,78332664	0,21667336	4,62
120	9	0,335376719	0,810252264	0,78332664	0,21667336	4,62
120	10	0,335376719	0,810252264	0,78332664	0,21667336	4,62
117	11	0,332805425	0,789668116	0,763325	0,236675	4,23
115	12	0,331263508	0,776414126	0,7504533	0,2495467	4,01
115	13	0,331263508	0,776414126	0,7504533	0,2495467	4,01
114	14	0,330235939	0,767188674	0,7414969	0,2585031	3,87
108	15	0,325102947	0,71618953	0,69202182	0,30797818	3,25
108	16	0,325102947	0,71618953	0,69202182	0,30797818	3,25
96	17	0,314864793	0,588850356	0,56867825	0,43132175	2,32
95	18	0,314353982	0,581615405	0,56167629	0,43832371	2,28
95	19	0,313843283	0,574303582	0,55460047	0,44539953	2,25
91	20	0,310475583	0,524225134	0,50615183	0,49384817	2,02
89	21	0,30925226	0,505296128	0,48784452	0,51215548	1,95
88	22	0,307724113	0,481167332	0,46451231	0,53548769	1,87
87	23	0,307214984	0,473020111	0,45663505	0,54336495	1,84
83	24	0,304162958	0,423252803	0,40852705	0,59147295	1,69
82	25	0,302638762	0,397955494	0,38407956	0,61592044	1,62
79	26	0,300101234	0,355545079	0,3431028	0,6568972	1,52

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
76	27	0,298073815	0,321712034	0,31042113	0,68957887	1,45
71	28	0,294026235	0,255628081	0,24660475	0,75339525	1,33
68	29	0,290997194	0,208756282	0,20135584	0,79864416	1,25
67	30	0,289988829	0,193867009	0,18698462	0,81301538	1,23
59	31	0,283451294	0,109205449	0,1052929	0,8947071	1,12
58	32	0,28294966	0,103703385	0,09998536	0,90001464	1,11
58	33	0,28244821	0,098359757	0,09483085	0,90516915	1,10
57	34	0,281946946	0,093176335	0,08983106	0,91016894	1,10
56	35	0,281445869	0,08815459	0,0849874	0,9150126	1,09
48	36	0,274451114	0,034915093	0,03364846	0,96635154	1,03
48	37	0,274451114	0,034915093	0,03364846	0,96635154	1,03
41	38	0,268487458	0,011971943	0,01153406	0,98846594	1,01

Una vez obtenido los valores reportados en la tabla 7.22 se calculó el valor respectivo de la intensidad máxima asociado a cada periodo de retorno, con la ayuda de Excel y su función solver. En la siguiente tabla se muestra lo enunciado.

Tabla 7.23. Calculo de Intensidades y periodo de Retorno Para 10 minutos

AJUSTE PARA CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO				
Tr (años)	P(X<x)	F(x)	p(X<x)-F(x)=0	Intensidad máximo (mm/h)
5	0,800	0,800	-2,90761E-07	123
10	0,900	0,900	-6,08475E-07	148
20	0,950	0,950	-5,45675E-07	181
25	0,960	0,960	-8,48267E-07	198
50	0,980	0,980	-1,82208E-07	445
100	0,990	0,990	-4,83736E-07	799

Utilizando el mismo procedimiento para intensidades con duraciones iguales a diez minutos se realiza para 20, 30, 60, 120, 180, 240 y 360 minutos, obteniendo los valores reportados en las siguientes tablas.

Tabla 7.24. Resumen de datos estadísticos calculados

ESTADÍSTICA	EVENTOS CICLÓNICOS	EVENTOS NO CICLÓNICOS	TOTAL
	(2)	(1)	NT
NÚMERO DE DATOS	2	38	40
MEDIA	217,8	78,8	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	95,9	24,9	
$\mu y$	0,40434	0,54239	
$\sigma y$	0,49838	1,1365	
$\alpha$	0,005197756	0,04562648	
$\beta$	140,0087424	66,94449077	
P			0,95

Tabla 7.25. Intensidades máximas para 20 minutos

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
<b>Intensidad (mm/h)</b>						
286	1	0,625508843	0,999953521	0,98122983	0,01877017	53,28
150	2	0,386975728	0,977647393	0,94768131	0,05231869	19,11
132	1	0,35199689	0,949232731	0,91847744	0,08152256	12,27
126	2	0,341116745	0,934656216	0,90386475	0,09613525	10,40
121	3	0,33197298	0,919319149	0,88861265	0,11138735	8,98
120	4	0,329690454	0,914977151	0,88431126	0,11568874	8,64
116	5	0,322852626	0,900578122	0,87008692	0,12991308	7,70



Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
114	6	0,318303181	0,88973039	0,85940407	0,14059593	7,11
107	7	0,304142718	0,848308536	0,81879345	0,18120655	5,52
99	8	0,290646868	0,79573519	0,76751233	0,23248767	4,30
98	9	0,28729056	0,780323903	0,75251669	0,24748331	4,04
96	10	0,284499547	0,766732881	0,73930299	0,26069701	3,84
95	11	0,283384695	0,761101354	0,73383051	0,26616949	3,76
90	12	0,273393391	0,705210509	0,67958998	0,32041002	3,12
90	13	0,273393391	0,705210509	0,67958998	0,32041002	3,12
88	14	0,268978863	0,677275885	0,65252074	0,34747926	2,88
82	15	0,258564868	0,603252682	0,58088905	0,41911095	2,39
77	16	0,2504192	0,537614945	0,51746565	0,48253435	2,07
76	17	0,247181055	0,509801596	0,49061218	0,50938782	1,96
75	18	0,246642523	0,505089777	0,48606412	0,51393588	1,95
75	19	0,246319566	0,502252819	0,48332591	0,51667409	1,94
74	20	0,24502895	0,490833506	0,47230525	0,52769475	1,90
74	21	0,243418441	0,476407503	0,45838545	0,54161455	1,85
71	22	0,238605738	0,432276139	0,41581951	0,58418049	1,71
65	23	0,228542755	0,33695687	0,32395948	0,67604052	1,48
64	24	0,225917581	0,311967631	0,2998932	0,7001068	1,43
64	25	0,225917581	0,311967631	0,2998932	0,7001068	1,43
64	26	0,225917581	0,311967631	0,2998932	0,7001068	1,43
63	27	0,224870289	0,302043174	0,29033704	0,70966296	1,41
62	28	0,223302367	0,287259395	0,27610371	0,72389629	1,38
60	29	0,219658179	0,25339638	0,24350959	0,75649041	1,32
57	30	0,215002928	0,211659635	0,20335203	0,79664797	1,26
57	31	0,214487815	0,20717815	0,1990411	0,8009589	1,25
57	32	0,214487815	0,20717815	0,1990411	0,8009589	1,25
56	33	0,21345889	0,198321467	0,19052207	0,80947793	1,24
54	34	0,209360765	0,164459331	0,15795793	0,84204207	1,19



Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
54	35	0,209360765	0,164459331	0,15795793	0,84204207	1,19
44	36	0,19276818	0,058673299	0,05630515	0,94369485	1,06
41	37	0,18686632	0,035366203	0,03392833	0,96607167	1,04
39	38	0,183943109	0,02656781	0,02548377	0,97451623	1,03

Tabla 7.26. Calculo de Intensidades y periodo de Retorno Para 20 minutos

AJUSTE PARA CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO				
Tr (años)	P(X<x)	F(x)	p(X<x)-F(x)=0	Intensidad máximo (mm/h)
5	0,800	0,800	-9,45454E-07	104
10	0,900	0,900	-3,0312E-07	125
20	0,950	0,950	-7,90452E-07	152
25	0,960	0,960	-9,2506E-07	165
50	0,980	0,980	-5,66285E-07	270
100	0,990	0,990	9,88437E-07	429

## Intensidades máximas para 30 minutos

Tabla 7.27. Resumen de datos estadísticos calculados

ESTADÍSTICA	EVENTOS CICLÓNICOS	EVENTOS NO CICLÓNICOS	TOTAL
	(2)	(1)	NT
NÚMERO DE DATOS	2	38	40
MEDIA	175,2	69,7	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	78,1	23,0	
$\mu y$	0,40434	0,54239	
$\sigma y$	0,49838	1,1365	
$\alpha$	0,006384201	0,049366802	
$\beta$	111,8655248	58,67832511	
P			0,95

Tabla 7.28. Intensidades máximas para 30 minutos

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
230	1	0,625508843	0,999791892	0,98107123	0,01892877	52,83
120	2	0,386975728	0,952706454	0,92350484	0,07649516	13,07
117	1	0,380875119	0,946405925	0,91710875	0,08289125	12,06
113	2	0,370543865	0,933842431	0,90445179	0,09554821	10,47
109	3	0,3611498	0,919991766	0,89060492	0,10939508	9,14
101	4	0,342381304	0,883578174	0,8545253	0,1454747	6,87
100	5	0,340039019	0,878060968	0,84908667	0,15091333	6,63
96	6	0,33068267	0,853483967	0,82492139	0,17507861	5,71
96	7	0,329748325	0,850791609	0,82227938	0,17772062	5,63
95	8	0,328347298	0,846668621	0,81823526	0,18176474	5,50



Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
95	9	0,327413618	0,843862826	0,81548429	0,18451571	5,42
93	10	0,324614271	0,835164883	0,80696196	0,19303804	5,18
88	11	0,312053046	0,790449608	0,76326024	0,23673976	4,22
81	12	0,296798719	0,722002447	0,69661679	0,30338321	3,30
80	13	0,293579561	0,705368402	0,68045407	0,31954593	3,13
77	14	0,287161001	0,669800953	0,64592794	0,35407206	2,82
74	15	0,279860375	0,625401483	0,60288266	0,39711734	2,52
74	16	0,279860375	0,625401483	0,60288266	0,39711734	2,52
70	17	0,270340611	0,561298143	0,54082032	0,45917968	2,18
68	18	0,266284207	0,531969451	0,51245373	0,48754627	2,05
62	19	0,253319154	0,431529358	0,41541862	0,58458138	1,71
60	20	0,248005107	0,388239951	0,37364223	0,62635777	1,60
59	21	0,245800279	0,370089169	0,35613311	0,64386689	1,55
58	22	0,244480097	0,359193376	0,34562449	0,65437551	1,53
58	23	0,243337608	0,349756255	0,33652389	0,66347611	1,51
57	24	0,24184595	0,337434895	0,32464351	0,67535649	1,48
57	25	0,24096977	0,330202758	0,31767106	0,68232894	1,47
56	26	0,239657275	0,319384432	0,30724235	0,69275765	1,44
55	27	0,23747458	0,301459671	0,28996614	0,71003386	1,41
52	28	0,231828354	0,255803822	0,24597876	0,75402124	1,33
52	29	0,230099638	0,24213376	0,23281282	0,76718718	1,30
51	30	0,229236828	0,235381094	0,22630994	0,77369006	1,29
50	31	0,227514339	0,222056876	0,21348009	0,78651991	1,27
49	32	0,224510179	0,199387814	0,19165665	0,80834335	1,24
44	33	0,213891125	0,126951427	0,12196154	0,87803846	1,14
43	34	0,211788757	0,114360643	0,10985363	0,89014637	1,12
43	35	0,210949875	0,109520602	0,10519974	0,89480026	1,12
40	36	0,20469668	0,076943367	0,0738837	0,9261163	1,08
38	37	0,202214793	0,065795195	0,06317067	0,93682933	1,07





Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
36	38	0,198103631	0,049608439	0,0476194	0,9523806	1,05

Tabla 7.29. Calculo de Intensidades y periodo de Retorno Para 30 minutos

AJUSTE PARA CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO				
Tr (años)	P(X<x)	F(x)	p(X<x)-F(x)=0	Intensidad máximo (mm/h)
5	0,800	0,800	-5,96947E-07	92
10	0,900	0,900	-4,64444E-07	112
20	0,950	0,950	-2,85664E-07	136
25	0,960	0,960	8,75669E-07	147
50	0,980	0,980	-9,72534E-07	221
100	0,990	0,990	-2,50323E-07	347

## Intensidades máximas para 60 minutos

Tabla 7.30. Resumen de datos estadísticos calculados

ESTADÍSTICA	EVENTOS CICLÓNICOS	EVENTOS NO CICLÓNICOS	TOTAL
	(2)	(1)	NT
NÚMERO DE DATOS	2	38	40
MEDIA	123,15	50,85894737	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	32,73904397	17,84291635	
$\mu_y$	0,40434	0,54239	
$\sigma_y$	0,49838	1,1365	
$\alpha$	0,015222802	0,063694745	
$\beta$	96,58853076	42,34348815	
P			0,95

Tabla 7.31. Intensidades máximas para 60 minutos

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
146	1	0,625508843	0,998669432	0,97996979	0,02003021	49,92
100	2	0,386975728	0,974905269	0,94502324	0,05497676	18,19
84	1	0,295088528	0,92988243	0,89710819	0,10289181	9,72
80	2	0,277646949	0,914724289	0,8816866	0,1183134	8,45
79	3	0,267937308	0,904873125	0,87175193	0,12824807	7,80
76	4	0,256716168	0,892020097	0,85886889	0,14113111	7,09
76	5	0,253003617	0,887384747	0,85424109	0,14575891	6,86
75	6	0,246673919	0,879003209	0,84589441	0,15410559	6,49
73	7	0,238826858	0,867711224	0,8346873	0,1653127	6,05



Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
71	8	0,230541693	0,854601724	0,8217227	0,1782773	5,61
69	9	0,218291679	0,832708801	0,80016203	0,19983797	5,00
66	10	0,203800188	0,802348752	0,77040726	0,22959274	4,36
61	11	0,177836035	0,732998816	0,70286656	0,29713344	3,37
61	12	0,177368796	0,731545444	0,70145584	0,29854416	3,35
60	13	0,174576296	0,722690966	0,69286465	0,30713535	3,26
57	14	0,162248447	0,679962892	0,65148089	0,34851911	2,87
57	15	0,161351211	0,676608735	0,64823688	0,35176312	2,84
55	16	0,152940948	0,643444297	0,61619253	0,38380747	2,61
55	17	0,151196973	0,636164656	0,60916573	0,39083427	2,56
53	18	0,143042879	0,600204501	0,57448703	0,42551297	2,35
48	19	0,123044448	0,497841276	0,47601204	0,52398796	1,91
47	20	0,119152799	0,47552075	0,45457769	0,54542231	1,83
46	21	0,116087118	0,457396738	0,43718179	0,56281821	1,78
45	22	0,112689359	0,436767465	0,41739004	0,58260996	1,72
43	23	0,104614679	0,385599241	0,36833625	0,63166375	1,58
43	24	0,102470033	0,371546764	0,35487305	0,64512695	1,55
42	25	0,102256936	0,370140891	0,35352632	0,64647368	1,55
41	26	0,096872972	0,334104352	0,31901742	0,68098258	1,47
40	27	0,093803164	0,313177877	0,29898784	0,70101216	1,43
35	28	0,078702417	0,208843513	0,19922316	0,80077684	1,25
35	29	0,076288828	0,192425975	0,18353867	0,81646133	1,22
32	30	0,069887678	0,150176346	0,1431923	0,8568077	1,17
32	31	0,069887678	0,150176346	0,1431923	0,8568077	1,17
31	32	0,06572186	0,124179981	0,11837905	0,88162095	1,13
31	33	0,064907991	0,119281719	0,11370475	0,88629525	1,13
29	34	0,06119477	0,097824245	0,09323235	0,90676765	1,10
27	35	0,055885805	0,070139389	0,06682841	0,93317159	1,07
27	36	0,055396431	0,067790168	0,06458843	0,93541157	1,07

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
26	37	0,054426117	0,063241869	0,06025188	0,93974812	1,06
25	38	0,051582415	0,050788778	0,04838033	0,95161967	1,05

Tabla 7.32. Calculo de Intensidades y periodo de Retorno Para 60 minutos

AJUSTE PARA CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO				
Tr (años)	P(X<x)	F(x)	p(X<x)-F(x)=0	Intensidad máximo (mm/h)
5	0,800	0,800	-5,02026E-07	69
10	0,900	0,900	-8,29932E-07	84
20	0,950	0,950	2,10345E-07	103
25	0,960	0,960	9,84095E-07	111
50	0,980	0,980	-4,33949E-07	146
100	0,990	0,990	2,4549E-07	196

## Intensidades máximas para 120 minutos

Tabla 7.33. Resumen de datos estadísticos calculados

ESTADÍSTICA	EVENTOS CICLÓNICOS	EVENTOS NO CICLÓNICOS	TOTAL
	(2)	(1)	NT
NÚMERO DE DATOS	2	38	40
MEDIA	71,0	31,6	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	10,5	12,3	
$\mu_y$	0,40434	0,54239	
$\sigma_y$	0,49838	1,1365	
$\alpha$	0,04746234	0,092736784	
$\beta$	62,50582466	25,77287493	
P			0,95

Tabla 7.34. Intensidades máximas para 120 minutos

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
78	1	0,625508843	0,992470178	0,97388661	0,02611339	38,29
64	2	0,386975728	0,970486498	0,94073991	0,05926009	16,87
54	1	0,230911099	0,932404543	0,89654944	0,10345056	9,67
52	2	0,197268736	0,918116022	0,881266	0,118734	8,42
51	3	0,172835534	0,905238317	0,86779927	0,13220073	7,56
50	4	0,163586351	0,89965602	0,86203179	0,13796821	7,25
50	5	0,159393924	0,896976185	0,859276	0,140724	7,11
46	6	0,114379535	0,8603494	0,82225225	0,17774775	5,63
45	7	0,104052655	0,849158236	0,81111818	0,18888182	5,29



Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
45	8	0,097468615	0,841250648	0,80328789	0,19671211	5,08
44	9	0,094268056	0,837158003	0,79924597	0,20075403	4,98
40	10	0,057926447	0,77385079	0,73739957	0,26260043	3,81
40	11	0,056373841	0,770145613	0,73380914	0,26619086	3,76
39	12	0,049019809	0,750845877	0,7151439	0,2848561	3,51
37	13	0,036019907	0,707120192	0,6730377	0,3269623	3,06
36	14	0,031932632	0,689687687	0,65630448	0,34369552	2,91
36	15	0,029892789	0,680072069	0,64708493	0,35291507	2,83
34	16	0,021268779	0,630034102	0,5992024	0,4007976	2,50
32	17	0,015237545	0,580780322	0,55218379	0,44781621	2,23
31	18	0,012304539	0,549385113	0,52225385	0,47774615	2,09
31	19	0,012049771	0,546327886	0,51934065	0,48065935	2,08
29	20	0,008032663	0,487882686	0,4636845	0,5363155	1,86
28	21	0,005837421	0,443349607	0,42131153	0,57868847	1,73
28	22	0,005557968	0,436649802	0,41493866	0,58506134	1,71
27	23	0,004374303	0,404567066	0,3844272	0,6155728	1,62
27	24	0,004099681	0,396070479	0,37634814	0,62365186	1,60
25	25	0,002732734	0,344938793	0,32773899	0,67226101	1,49
25	26	0,002694678	0,343236644	0,32612106	0,67387894	1,48
25	27	0,002583143	0,338133635	0,32127063	0,67872937	1,47
22	28	0,001054923	0,240388754	0,228382	0,771618	1,30
22	29	0,001011107	0,236268276	0,22446681	0,77553319	1,29
21	30	0,000809132	0,215396107	0,20463502	0,79536498	1,26
20	31	0,000505148	0,175514263	0,16674298	0,83325702	1,20
19	32	0,00038367	0,154839379	0,14710038	0,85289962	1,17
19	33	0,00031763	0,141720611	0,13463683	0,86536317	1,16
15	34	5,8964E-05	0,058929954	0,05598363	0,94401637	1,06
14	35	4,34584E-05	0,049423524	0,04695246	0,95304754	1,05
14	36	4,14307E-05	0,04805796	0,04565516	0,95434484	1,05



Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
14	37	3,94886E-05	0,04671793	0,04438213	0,95561787	1,05
13	38	3,41446E-05	0,042849674	0,04070726	0,95929274	1,04

Tabla 7.35. Calculo de Intensidades y periodo de Retorno Para 120 minutos

AJUSTE PARA CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO				
Tr (años)	P(X<x)	F(x)	p(X<x)-F(x)=0	Intensidad máximo (mm/h)
5	0,800	0,800	-8,0707E-07	44
10	0,900	0,900	-7,49731E-07	55
20	0,950	0,950	-2,17839E-07	67
25	0,960	0,960	1,79544E-07	71
50	0,980	0,980	-7,15207E-07	84
100	0,990	0,990	9,09491E-07	97

## Intensidades máximas para 180 minutos

Tabla 7.36. Resumen de datos estadísticos calculados

ESTADÍSTICA	EVENTOS CICLÓNICOS	EVENTOS NO CICLÓNICOS	TOTAL
	(2)	(1)	NT
NÚMERO DE DATOS	2	38	40
MEDIA	50,2	22,9	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	3,6	9,7	
$\mu_y$	0,40434	0,54239	
$\sigma_y$	0,49838	1,1365	
$\alpha$	0,13730177	0,117382293	
$\beta$	47,28843322	18,30068956	
P			0,95

Tabla 7.37. Intensidades máximas para 180 minutos

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
53	1	0,625508843	0,982721808	0,96432078	0,03567922	28,03
48	2	0,386975728	0,968661982	0,93897132	0,06102868	16,39
45	1	0,25272525	0,957228802	0,92146316	0,07853684	12,73
43	2	0,164994688	0,946424709	0,90691123	0,09308877	10,74
41	3	0,093364884	0,9327348	0,89045229	0,10954771	9,13
35	4	0,005205362	0,871480228	0,82813304	0,17186696	5,82
35	5	0,004723471	0,869591238	0,82631705	0,17368295	5,76
35	6	0,003771051	0,865246966	0,82214776	0,17785224	5,62





Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
34	7	0,002029731	0,853533896	0,81094382	0,18905618	5,29
31	8	6,63577E-05	0,794080289	0,75437891	0,24562109	4,07
30	9	3,51091E-05	0,783837668	0,74464716	0,25535284	3,92
29	10	4,47205E-06	0,75215214	0,7145447	0,2854553	3,50
28	11	1,0701E-06	0,731353276	0,69478565	0,30521435	3,28
28	12	1,0047E-06	0,730456797	0,69393399	0,30606601	3,27
26	13	1,27828E-08	0,672202532	0,63859241	0,36140759	2,77
26	14	2,68428E-09	0,652999785	0,6203498	0,3796502	2,63
25	15	3,00184E-10	0,627312592	0,59594696	0,40405304	2,47
24	16	5,67418E-11	0,608696001	0,5782612	0,4217388	2,37
24	17	7,483E-12	0,587040967	0,55768892	0,44231108	2,26
22	18	5,76301E-14	0,538994633	0,5120449	0,4879551	2,05
21	19	7,61218E-16	0,500417194	0,47539633	0,52460367	1,91
21	20	1,06652E-16	0,484036735	0,4598349	0,5401651	1,85
20	21	6,98627E-19	0,445033237	0,42278157	0,57721843	1,73
20	22	2,91645E-20	0,422354204	0,40123649	0,59876351	1,67
19	23	8,33641E-21	0,413794843	0,3931051	0,6068949	1,65
19	24	9,56453E-22	0,399478722	0,37950479	0,62049521	1,61
19	25	2,41942E-23	0,37648539	0,35766112	0,64233888	1,56
18	26	7,46789E-26	0,343397966	0,32622807	0,67377193	1,48
17	27	9,03544E-29	0,309096493	0,29364167	0,70635833	1,42
17	28	6,71901E-29	0,307677004	0,29229315	0,70770685	1,41
16	29	1,85267E-31	0,280923866	0,26687767	0,73312233	1,36
15	30	1,16488E-38	0,218700544	0,20776552	0,79223448	1,26
15	31	6,1303E-39	0,216622769	0,20579163	0,79420837	1,26
14	32	7,16905E-43	0,189533371	0,1800567	0,8199433	1,22
13	33	7,07769E-51	0,145175714	0,13791693	0,86208307	1,16
10	34	1,02506E-73	0,069959275	0,06646131	0,93353869	1,07
9	35	1,27381E-79	0,058263318	0,05535015	0,94464985	1,06

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
9	36	4,44102E-81	0,055708369	0,05292295	0,94707705	1,06
9	37	1,45522E-82	0,053227796	0,05056641	0,94943359	1,05
9	38	7,66505E-85	0,049645389	0,04716312	0,95283688	1,05

Tabla 7.38. Calculo de Intensidades y periodo de Retorno Para 180 minutos

AJUSTE PARA CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO				
Tr (años)	P(X<x)	F(x)	p(X<x)-F(x)=0	Intensidad máximo (mm/h)
5	0,800	0,800	-9,13381E-07	33
10	0,900	0,900	-8,5547E-08	42
20	0,950	0,950	-3,44079E-08	50
25	0,960	0,960	-9,73392E-07	52
50	0,980	0,980	-7,56414E-07	58
100	0,990	0,990	7,92539E-07	64

## Intensidades máximas para 240 minutos

Tabla 7.39. Resumen de datos estadísticos calculados

ESTADÍSTICA	EVENTOS CICLÓNICOS	EVENTOS NO CICLÓNICOS	TOTAL
	(2)	(1)	NT
NÚMERO DE DATOS	2	38	40
MEDIA	39,2	17,9	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,0	7,6	
$\mu_y$	0,40434	0,54239	
$\sigma_y$	0,49838	1,1365	
$\alpha$	0,47784119	0,149780361	
$\beta$	38,31631928	14,25139582	
P			0,95

Tabla 7.40. Intensidades máximas para 240 minutos

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
40	1	0,625508843	0,978770574	0,96044353	0,03955647	25,28
38	2	0,386975728	0,973591857	0,94375009	0,05624991	17,78
37	1	0,095021962	0,965051601	0,92138408	0,07861592	12,72
32	2	2,48049E-08	0,935445885	0,88867359	0,11132641	8,98
32	3	3,71542E-10	0,9311035	0,88454833	0,11545167	8,66
27	4	1,05136E-81	0,869302885	0,82583774	0,17416226	5,74
27	5	1,09028E-86	0,867004839	0,8236546	0,1763454	5,67
26	6	9,2475E-130	0,850367257	0,80784889	0,19215111	5,20
26	7	4,1072E-192	0,8324302	0,79080869	0,20919131	4,78



Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
25	8	3,8893E-268	0,815723714	0,77493753	0,22506247	4,44
23	9	0	0,766660885	0,72832784	0,27167216	3,68
23	10	0	0,755774923	0,71798618	0,28201382	3,55
23	11	0	0,750981765	0,71343268	0,28656732	3,49
22	12	0	0,746928314	0,7095819	0,2904181	3,44
22	13	0	0,722342628	0,6862255	0,3137745	3,19
20	14	0	0,664501254	0,63127619	0,36872381	2,71
19	15	0	0,593719052	0,5640331	0,4359669	2,29
18	16	0	0,578477608	0,54955373	0,45044627	2,22
18	17	0	0,567726221	0,53933991	0,46066009	2,17
17	18	0	0,525723884	0,49943769	0,50056231	2,00
17	19	0	0,525723884	0,49943769	0,50056231	2,00
16	20	0	0,473846845	0,4501545	0,5498455	1,82
16	21	0	0,456517975	0,43369208	0,56630792	1,77
16	22	0	0,451147795	0,42859041	0,57140959	1,75
15	23	0	0,415883351	0,39508918	0,60491082	1,65
15	24	0	0,406304975	0,38598973	0,61401027	1,63
15	25	0	0,391205098	0,37164484	0,62835516	1,59
15	26	0	0,387079309	0,36772534	0,63227466	1,58
13	27	0	0,315639811	0,29985782	0,70014218	1,43
13	28	0	0,29664532	0,28181305	0,71818695	1,39
13	29	0	0,281867672	0,26777429	0,73222571	1,37
11	30	0	0,208543664	0,19811648	0,80188352	1,25
11	31	0	0,200522065	0,19049596	0,80950404	1,24
11	32	0	0,179962089	0,17096398	0,82903602	1,21
10	33	0	0,131366055	0,12479775	0,87520225	1,14
8	34	0	0,088890277	0,08444576	0,91555424	1,09
7	35	0	0,054596128	0,05186632	0,94813368	1,05
7	36	0	0,0534157	0,05074491	0,94925509	1,05

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
7	37	0	0,048312546	0,04589692	0,95410308	1,05
7	38	0	0,045098283	0,04284337	0,95715663	1,04

Tabla 7.41. Calculo de Intensidades y periodo de Retorno Para 240 minutos

AJUSTE PARA CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO				
Tr (años)	P(X<x)	F(x)	p(X<x)-F(x)=0	Intensidad máximo (mm/h)
5	0,800	0,800	-4,77149E-08	26
10	0,900	0,900	-3,69415E-07	34
20	0,950	0,950	-6,46998E-07	39
25	0,960	0,960	3,82674E-07	40
50	0,980	0,980	7,8893E-07	43
100	0,990	0,990	-3,65296E-07	46

## Intensidades máximas para 360 minutos

Tabla 7.42. Resumen de datos estadísticos calculados

ESTADÍSTICA	EVENTOS CICLÓNICOS	EVENTOS NO CICLÓNICOS	TOTAL
	(2)	(1)	NT
NÚMERO DE DATOS	2	38	40
MEDIA	27,2	12,5	
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,0	5,5	
$\mu y$	0,40434	0,54239	
$\sigma y$	0,49838	1,1365	
$\alpha$	14,0963151	0,205589841	
$\beta$	27,19631591	9,890031604	
P			0,95

Tabla 7.43. Intensidades máximas para 360 minutos

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
<b>Intensidad (mm/h)</b>						
27	1	0,625508843	0,972210349	0,95400614	0,04599386	21,74
27	2	0,386975728	0,971927281	0,94213653	0,05786347	17,28
26	1	0	0,961337551	0,91327067	0,08672933	11,53
25	2	0	0,952882364	0,90523825	0,09476175	10,55
22	3	0	0,919885313	0,87389105	0,12610895	7,93
21	4	0	0,897316509	0,85245068	0,14754932	6,78
19	5	0	0,866324115	0,82300791	0,17699209	5,65
19	6	0	0,856645161	0,8138129	0,1861871	5,37
18	7	0	0,814705071	0,77396982	0,22603018	4,42



Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
17	8	0	0,794960981	0,75521293	0,24478707	4,09
17	9	0	0,7918151	0,75222434	0,24777566	4,04
16	10	0	0,731725626	0,69513935	0,30486065	3,28
15	11	0	0,724602455	0,68837233	0,31162767	3,21
15	12	0	0,724602455	0,68837233	0,31162767	3,21
15	13	0	0,705713212	0,67042755	0,32957245	3,03
14	14	0	0,631257223	0,59969436	0,40030564	2,50
14	15	0	0,621214806	0,59015407	0,40984593	2,44
13	16	0	0,608924038	0,57847784	0,42152216	2,37
12	17	0	0,550521612	0,52299553	0,47700447	2,10
12	18	0	0,53575504	0,50896729	0,49103271	2,04
12	19	0	0,507849979	0,48245748	0,51754252	1,93
11	20	0	0,48522194	0,46096084	0,53903916	1,86
11	21	0	0,457286244	0,43442193	0,56557807	1,77
11	22	0	0,45237502	0,42975627	0,57024373	1,75
11	23	0	0,44744986	0,42507737	0,57492263	1,74
11	24	0	0,415146596	0,39438927	0,60561073	1,65
10	25	0	0,388790865	0,36935132	0,63064868	1,59
10	26	0	0,374935633	0,35618885	0,64381115	1,55
9	27	0	0,291078139	0,27652423	0,72347577	1,38
9	28	0	0,278821088	0,26488003	0,73511997	1,36
8	29	0	0,260658209	0,2476253	0,7523747	1,33
8	30	0	0,204966201	0,19471789	0,80528211	1,24
7	31	0	0,187883328	0,17848916	0,82151084	1,22
7	32	0	0,175777614	0,16698873	0,83301127	1,20
7	33	0	0,135231803	0,12847021	0,87152979	1,15
6	34	0	0,126121552	0,11981547	0,88018453	1,14
5	35	0	0,063823682	0,0606325	0,9393675	1,06
5	36	0	0,055751741	0,05296415	0,94703585	1,06

Valores ordenados	M	F2(x)	F1(x)	F(x)	P	Tr
Intensidad (mm/h)						
5	37	0	0,050414392	0,04789367	0,95210633	1,05
4	38	0	0,047381007	0,04501196	0,95498804	1,05

Tabla 7.44. Calculo de Intensidades y periodo de Retorno Para 360 minutos

AJUSTE PARA CAUDALES MÁXIMOS ASOCIADOS A DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO				
Tr (años)	P(X<x)	F(x)	p(X<x)-F(x)=0	Intensidad máximo (mm/h)
5	0,800	0,800	-8,37481E-07	18
10	0,900	0,900	3,70231E-07	24
20	0,950	0,950	-9,1666E-08	27
25	0,960	0,960	-2,15507E-07	27
50	0,980	0,980	4,00958E-07	29
100	0,990	0,990	-2,2979E-07	32



### 7.2.1. Ecuación de diseño de las curvas IDF para dos poblaciones.

Para el diseño de la ecuación de la curva IDF de dos poblaciones se utilizará los datos ajustados a través de la distribución Gumbel- Gumbel en los que se relacionan los valores de las intensidades para duraciones de 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 y 360, con periodos de retorno de 5, 10, 20, 25,50 y 100 años, cuyos valores se reflejan en la tabla 7.45.

Tabla 7.45. Valores de Intensidad y duración para dos poblaciones

Tr	10	20	30	60	120	180	240	360
5	123	104	92	69	44	33	26	18
10	148	125	112	84	55	42	34	24
20	181	152	136	103	67	50	39	27
25	198	165	147	111	71	52	40	27
50	445	270	221	146	84	58	43	29
100	799	429	347	196	97	64	46	32

Con los valores reportados en la tabla anterior, se realizó el mismo procedimiento del ítem 7.1.1 en el cual se efectuó el diseño de la ecuación que rige el comportamiento de las curvas IDF de una población. A partir de estos datos se realizó un análisis de correlación lineal múltiple, por medio del que se calculó los valores de las constantes que forman parte de la ecuación de diseño, asignándole un valor a la constante  $c$  para de esta manera obtener un valor del coeficiente de correlación múltiple cercano a 1 para así conocer cual valor de  $c$  lograba un mejor ajuste de los datos. En la siguiente tabla se muestra un resumen estadístico de la regresión múltiple.

Tabla 7.46. Resumen de la estadística de la regresión.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múlti	0,974330039
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,949319025
R <sup>2</sup> ajustado	0,947066537
Error típico	0,085984277
Observaciones	48

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	6,231862002	3,115931001	421,453576	7,22789E-30
Residuos	45	0,332698316	0,007393296		
Total	47	6,564560318			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	3,870203902	0,069420277	55,75033797	3,5612E-43	3,730384287	4,01002352	3,730384287	4,010023517
Variable X 1	-0,339714889	0,029047219	-11,69526362	3,0848E-15	-0,398218992	-0,28121079	-0,398218992	-0,281210786
Variable X 2	-0,762998798	0,028713237	-26,57306835	3,7972E-29	-0,820830225	-0,70516737	-0,820830225	-0,705167371

En la siguiente ilustración se demuestra que 10 es el valor que más de ajusta a los datos.

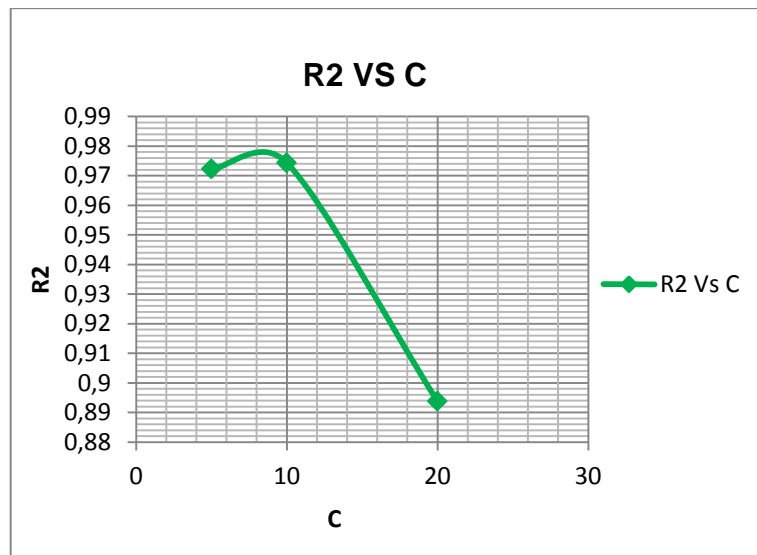


Ilustración 17. R2 Vs C.

De esta manera, según la tabla 7.46 los valores de ecuación 7.1 son:

$$a_0 = 3,8702$$

$$a_1 = -0,3397$$

$$a_2 = -0,7630$$

Y los valores de los parámetros de la ecuación 4.1 son:

$$k = 10^{3,8702} = 7416,58$$

$$m = -0,3397$$

$$n = 0,7630$$

Por lo que la ecuación de la curva IDF es:

$$I = \frac{7416,58 * (Tr)^{-0,3397}}{(D + 10)^{0,763}} \quad (7.4)$$

Remplazando el periodo de retorno y la duración en la ecuación 7.4 obtuvimos los valores de intensidad mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 7.47. Valores de Intensidades con la Ecuación de curva IDF dos poblaciones.

<b>Tr</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>360</b>
<b>5</b>	437	320	257	168	105	78	64	47
<b>10</b>	345	253	203	133	83	62	50	37
<b>20</b>	273	200	161	105	65	49	40	29
<b>25</b>	253	185	149	97	61	45	37	27
<b>50</b>	200	147	118	77	48	36	29	22
<b>100</b>	158	116	93	61	38	28	23	17

Con los valores de la tabla 7.47 se construyeron las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia para dos poblaciones y se realizó una comparación con la curva IDF de una población. Como se expresa a continuación.

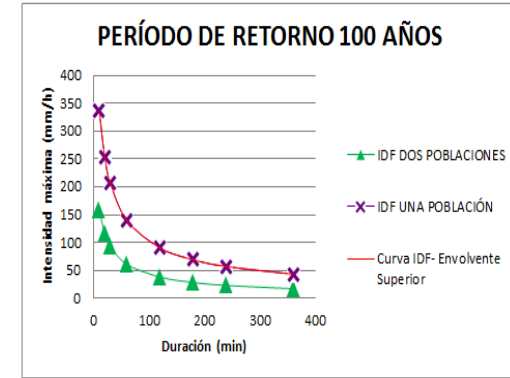
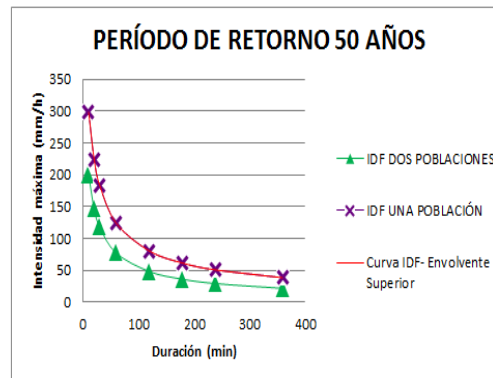
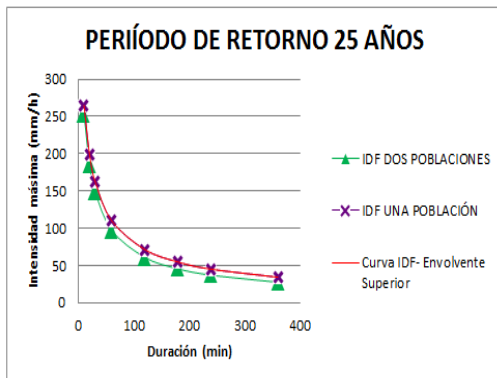
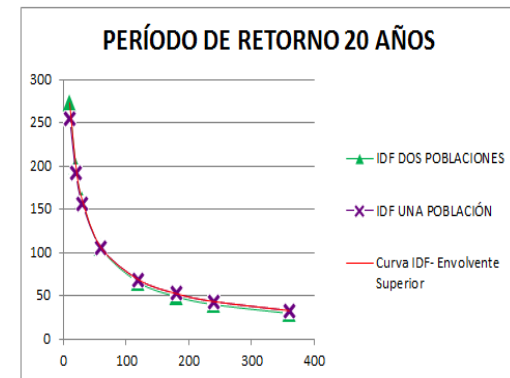
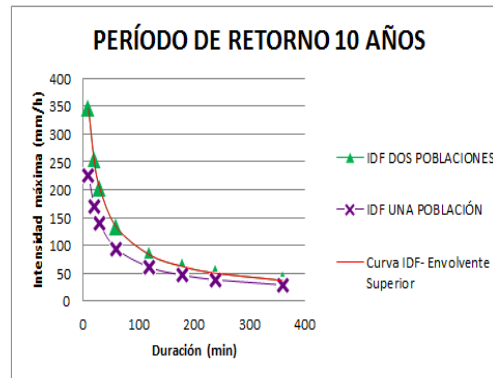
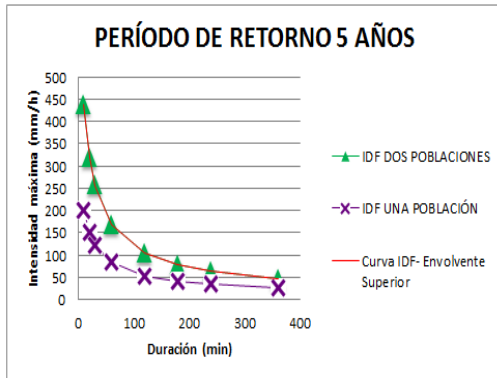


Ilustración 18. Comparación dos poblaciones Vs una población.

De la ilustración 18, se puede destacar lo siguiente:

- ✓ Para periodos de retorno de 5 y 10 años los valores de intensidad son mucho mayores para las curvas modeladas con las distribuciones mixtas de probabilidad.
- ✓ Para un periodo de retorno de 20 años las curvas presentan un comportamiento muy similar en cuanto al valor reportado por las intensidades.
- ✓ Con periodos de retorno de 25, 50 y 100 años la curva de una población presenta valores de intensidades mayores en relación con la curva de dos poblaciones, y se observa que a medida que aumenta el periodo de retorno, la curva de dos poblaciones tiende a reportar valores de intensidades menores a la de una población.

### **7.2.2. Ecuación de Diseño Curva IDF-Envolvente superior**

La curva envolvente cubre todos los puntos de las gráficas generadas a partir de los análisis realizados en el cálculo de las curvas IDF de dos poblaciones y una población, por tanto los valores suministrados de estas gráficas son los que se deben tener en cuenta al momento de realizar un diseño hidráulico o hidrológico. A continuación se muestra el proceso de cálculo de la ecuación de diseño que modela la curva IDF envolvente.

En la ilustración 18 se mostró una comparación entre la curva IDF de dos poblaciones vs una población, en esta comparación notamos que la curva IDF de dos poblaciones disminuía su intensidad máxima a medida que aumentaba el periodo de retorno mientras que la curva IDF de una población aumentaba su intensidad máxima, por lo que se escogió de las dos curvas los puntos más

críticos, con los cuales se halló la ecuación de diseño que modela esos puntos. En la siguiente tabla se muestran los puntos máximos de cada curva IDF.

Tabla 7.48. Valores críticos de intensidad y duración.

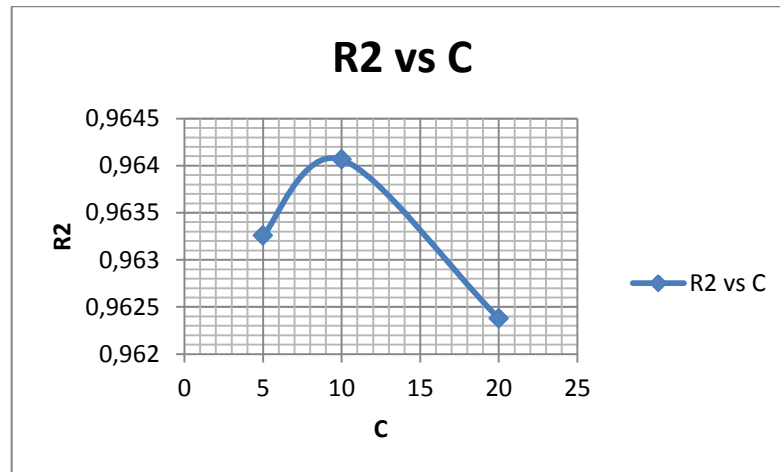
<b>T</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>360</b>
<b>5</b>	437	320	257	168	105	78	64	47
<b>10</b>	345	253	203	133	83	62	50	37
<b>20</b>	273	200	161	106	68	52	43	33
<b>25</b>	265	199	163	110	71	54	45	34
<b>50</b>	298	224	183	124	80	61	50	38
<b>100</b>	336	253	206	139	90	69	57	43

Con los valores reportados en la tabla anterior, se realizó el mismo procedimiento del ítem 7.1.1 en el cual se efectuó el diseño de la ecuación que rige el comportamiento de las curvas IDF de una población. A partir de estos datos se realizó un análisis de correlación lineal múltiple, por medio del que se calculó los valores de las constantes que forman parte de la ecuación de diseño, asignándole un valor a la constante  $c$  para de esta manera obtener un valor del coeficiente de correlación múltiple cercano a 1 para así conocer cual valor de  $c$  lograba un mejor ajuste de los datos. En la siguiente tabla se muestra un resumen estadístico de la regresión múltiple.

Tabla 7.49. Resumen de la estadística de la regresión.

Estadísticas de la regresión								
Coefficiente de correlación múltiple	0,981867629							
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,964064042							
R <sup>2</sup> ajustado	0,962466888							
Error típico	0,062810606							
Observaciones	48							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	2	4,762721005	2,381360503	603,613819	3,15797E-33			
Residuos	45	0,177532752	0,003945172					
Total	47	4,940253757						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	3,380528597	0,050710779	66,6629196	1,2562E-46	3,278391845	3,48266535	3,278391845	3,48266535
Variable X 1	0,052095789	0,021218687	2,455184355	0,01801042	0,009359159	0,09483242	0,009359159	0,094832418
Variable X 2	-0,726948592	0,020974716	-34,65832811	4,2376E-34	-0,769193839	-0,68470335	-0,769193839	-0,684703345

En la siguiente ilustración se demuestra que 10 es el valor que más se ajusta a los datos.





De esta manera, según la tabla 7.49 los valores de ecuación 7.1 son:

$$a_0 = 3,3805$$

$$a_1 = 0,0521$$

$$a_2 = -0,7269$$

Y los valores de los parámetros de la ecuación 4.1 son:

$$k = 10^{3,3805} = 2401,754$$

$$m = 0,0521$$

$$n = 0,7269$$

Por lo que la ecuación de la curva IDF es:

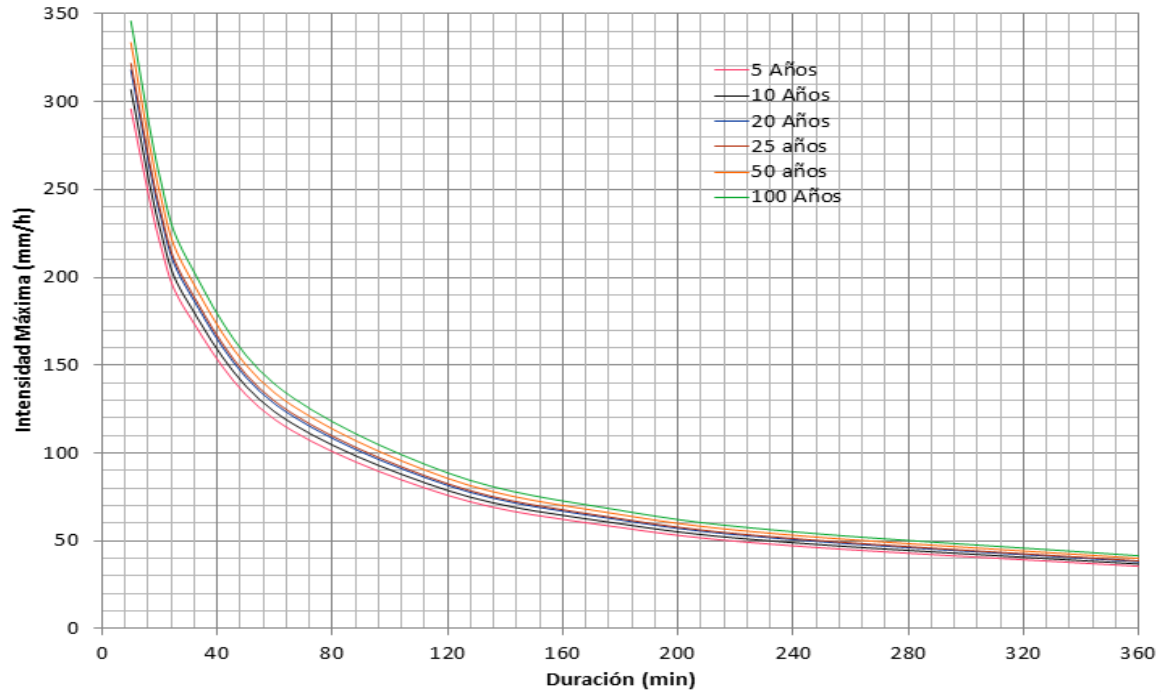
$$I = \frac{2401,754 * (Tr)^{0,0521}}{(D + 10)^{0,7269}} \quad (7.5)$$

Remplazando el periodo de retorno y la duración en la ecuación 7.5 obtuvimos los valores de intensidad mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 7.50. Valores de Intensidades con la Ecuación curva IDF- Envolvente.

<b>T</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>360</b>
5	296	220	179	119	76	58	47	35
10	307	228	185	123	79	60	49	37
20	318	237	192	128	82	62	51	38
25	322	240	194	129	83	63	51	39
50	334	248	202	134	86	65	53	40
100	346	258	209	139	89	67	55	41

Con los valores de la tabla 7.50 se construyeron las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia – Envolvente como se muestra a continuación.



**Tesis de Grado:**

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE CURVAS INTENSIDAD- DURACIÓN -FRECUENCIA, UTILIZANDO DISTRIBUCIONES MIXTAS DE PROBABILIDAD. CASO DE ESTUDIO, ESTACIÓN SINÓPTICA PRINCIPAL AEROPUERTO RAFAEL NÚÑEZ.

**Contiene:**

Curvas Intensidad-Duración- Frecuencia (1970-2010)

**Autores:**

Eliana Romero Valiente  
Sindy Puello Lopez

Ilustración 19. Curva Intensidad- Duración- Frecuencia- Envoltente Superior.

## 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los fenómenos climáticos que han afectado al país en los últimos años denotan la importancia de incluir dentro de los estudios hidrológicos eventos macroclimáticos que inicialmente no se modelaban, ya que de estos dependen diseños hidráulicos e hidrológicos en los que si no se tiene en cuenta con qué frecuencia ocurre cada evento pueden ocasionar perdidas tanto económicas como humanas.

De la importancia de que estos eventos sean modelados en los estudios hidrológicos, surge la presente investigación en la que se elaboró la siguiente propuesta metodológica:

- ✓ Se recopilaron los registros pluviograficos de la estación Sinóptica Principal Aeropuerto Rafael Núñez. Resaltando que en algunos casos estos registros suministrados por el IDEAM no se encontraban en buen estado lo que dificultó su lectura. Además hubo algunos registros que reportaban las máximas intensidades que no se encontraron, por lo que para futuras investigaciones se recomienda buscar esta información con otra fuente.
- ✓ Se interpretó la información de intensidades máximas para 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 y 360 minutos.
- ✓ Se realizaron los ajustes estadísticos con diferentes distribuciones de probabilidad (Gumbel, Weibull, Gev, Pearson Tipo III). Mediante la prueba Chi Cuadrado se comprobó que Gumbel fue la que más se ajustó a los datos.
- ✓ Se construyó la curva IDF para una población con la distribución de probabilidad Gumbel.

- ✓ Se realizó el ajuste estadístico para la distribución mixta de probabilidad mediante la combinación Gumbel – Gumbel, con la cual se construyó la curva IDF para dos poblaciones.
- ✓ Se Construyó la curva envolvente superior a partir de las IDF's realizadas, para considerar la condición más crítica al momento de realizar un estudio hidrológico.

A partir de lo descrito anteriormente se obtuvo lo siguiente:

La ecuación de diseño que modela la curva de Intensidad-Duración-Frecuencia para una población del periodo comprendido entre 1970- 2010 con un coeficiente R2 de 0.992 lo cual muestra una relación directa entre las variables presentes en la siguiente ecuación:

$$I = \frac{1255,61 * (Tr)^{0,171}}{(D + 10)^{0,703}}$$

Se validó la curva IDF de una población (1970 - 2010) comparándola con la curva generada por la Universidad de Cartagena (1970-1994) con lo que se mostró que la curva bajo de la presente investigación tenía cierta similitud en cuanto a duraciones superiores a 100 minutos y diferencias para duraciones menores a ésta; esto es debido a los nuevos registros pluviograficos comprendidos entre el año 1995-2010 donde los valores de los períodos de lluvia registrados son mucho más altos en comparación a los años anteriores. Actualizándose de esta manera la curva IDF para una población.

En el cálculo de las curvas IDF para dos poblaciones primeramente se escogieron los eventos que coincidían con la incidencia de un fenómeno Niña, mediante la utilización de la tabla de Índice de Niño Oceánico (ONI) y la ocurrencia de un huracán, información suministrada por la Organización meteorológica Mundial; se compararon los años en que se reportaron los dos eventos mencionados anteriormente y se escogieron las intensidades que

coincidían con la ocurrencia de estos eventos; teniendo en cuenta también que este comportamiento debía ser igual para todas las duraciones. Se utilizó la distribución Gumbel, ya que mostró un mejor comportamiento y fue la que se ajustó a los datos registrados, para las curvas de una población, por lo que pudo presentar un comportamiento similar para las curvas de dos poblaciones. Además en relación a los resultados arrojados por la prueba de bondad de ajuste Chi cuadrado; esta distribución fue quien reportó los mejores resultados. La ecuación de diseño que resulta para las curvas IDF de dos poblaciones con un coeficiente R2 de 0,949 es la siguiente:

$$I = \frac{7416,58 * (Tr)^{-0,3397}}{(D + 10)^{0,763}}$$

A través de este trabajo de investigación se generó la curva envolvente de las gráficas resultantes para una y dos poblaciones para considerar la condición más crítica en el momento de realizar un estudio hidrológico tomando a esta como la curva IDF que tiene en cuenta los fenómenos Niña y los Huracanes, debido a que esta representa los puntos máximos entre las IDF's generadas para una y dos poblaciones. La ecuación de diseño se generó a partir de los puntos máximos entre las gráficas para una y dos poblaciones con un coeficiente R2 de 0,964 como se puede ver a continuación:

$$I = \frac{2401,754 * (Tr)^{0,0521}}{(D + 10)^{0,7269}}$$

De los eventos macroclimáticos que se registraron el fenómeno de la Niña fue quien incidió en los valores registrados, ya que bajo la ocurrencia de éste se reportaron las intensidades máximas que fueron escogidas como eventos ciclónicos.

En el presente trabajo solo se utilizó la distribución mixta Gumbel – Gumbel, sin embargo en los futuros trabajos a realizar, se debe contar con un software

capaz de modelar de manera más profunda las demás distribuciones mixtas de probabilidad (Gumbel-Pearson III, Pearson III- Log normal, Normal- Pearson III, Log normal- Normal, Gumbel - Gev) para de esta manera realizar análisis variados sobre el comportamiento de este tipo de fenómenos con diferentes distribuciones de probabilidad.

## 9. BIBLIOGRAFIA

Campos – Aranda (2008). Rainfall Maximun Intensities for Urban Hydrological Design in Mexican Republic. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. México.

Edison Heredia Calderón (1998). Una Metodología de Análisis Regional de Frecuencia de Lluvias Intensas Adecuadas para Zonas Bajo los Efectos de “El Niño”. Bulletin de l’Institut Français d’Études Andines, Tomo 27, número 3. Página 667-673.

APARICIO, Francisco. Fundamentos de hidrología de superficie. 9 ed. México D. F: Grupo Noriega, 2001. P. 252 – 255, 258 – 261, 263 – 264, 270 – 272.

CASTILLO, I. Hydrological Frequency Analysis (HYFRAN). Recuperado el 30 de enero de 2008. Disponible en internet: <<http://aguaingenieria.blogspot.com/2008/01/hydrological-frequencyanalysis.html>>.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM).

Olga Umpiérrez (ponencia). Análisis de Impactos Hidrológicos de “El Niño” – Compilación, Estudios de Investigación.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA).

ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM).