



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**COMPARACIÓN DEL MODELO ESTÁNDAR Y MODELO *WENZEL* PARA CURVAS
INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA**

Manuel de Jesús Sales Rodríguez
Asesorado por el Ing. Sergio Antonio López Dubón

Guatemala, octubre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DEL MODELO ESTÁNDAR Y MODELO *WENZEL* PARA CURVAS
INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MANUEL DE JESÚS SALES RODRIGUEZ
ASESORADO POR EL ING. SERGIO ANTONIO LÓPEZ DUBÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Wuilliam Ricardo Yon Chavarría
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Linares Cruz
EXAMINADOR	Ing. Edgar Fernando Valenzuela Villanueva
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DEL MODELO ESTÁNDAR Y MODELO WENZEL PARA CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha marzo de 2012.



Manuel de Jesús Sales Rodríguez

Guatemala, 19 de junio de 2012


Ingeniero Pedro Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Aguilar Polanco

Por este medio me es grato informarle que en mi calidad de asesor del trabajo de graduación con el título: **COMPARACIÓN DEL MODELO ESTÁNDAR Y MODELO WENZEL PARA CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA**, elaborado por el estudiante de Ingeniería Civil Manuel de Jesús Sales Rodríguez, previo a optar al título de Ingeniero Civil, en grado de licenciatura, ha realizado ya todas las correcciones indicadas, por lo que lo doy por aprobado y solicito se continúen con los trámites correspondientes.

Sin otro particular me es grato despedirme de usted.

Atentamente,


Sergio Antonio López Dubón
Ingeniero Civil
Cyl. No. 9914
Ingeniero Civil Col.9914

Asesor



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
10 de agosto de 2012

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **COMPARACIÓN DEL MODELO ESTÁNDAR Y MODELO WENZEL PARA CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Manuel de Jesús Sales Rodríguez, quien contó con la asesoría del Ing. Sergio Antonio López Dubón.

Considero este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica




FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Sergio Antonio López Dubón y del Jefe del Departamento de Hidráulica Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Manuel de Jesús Sales Rodríguez, titulado **COMPARACIÓN DEL MODELO ESTÁNDAR Y MODELO WENZEL PARA CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, octubre de 2012.

/bbdeb.



DTG. 482.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DEL MODELO ESTÁNDAR Y MODELO WENZEL PARA CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LA CUENCA DEL RÍO MOTAGUA**, presentado por el estudiante universitario **Manuel de Jesús Sales Rodríguez**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 3 de octubre de 2012

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por permitirme culminar una etapa más en mi vida.
Mis padres	Manuel Sales y Basilia Rodriguez de Sales. Por su amor y apoyo incondicional.
Mis abuelos	Marta Porres de Sales (q.e.p.d.) e Isidro Sales. Por su amor incondicional. Alejandra García de Tomás y Herculano Tomás. Por su amor incondicional.
Mi esposa	Brenda Mijangos de Sales. Por su amor y comprensión.
Mis hijas	Andrea y Dulce. Por ser mi inspiración.
Mi familia en general	

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por haberme permitido realizar mis estudios y formado profesionalmente.

Mi asesor

Por compartir sus conocimientos y guiarme en la elaboración de este trabajo.

Mis amigos

Por su amistad y apoyo en la realización de mis estudios.

INSIVUMEH

Por la oportunidad de empleo y gentil colaboración de las personas que ahí laboran.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS/HIPÓTESIS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN	1
1.1. Pluviómetro	2
1.2. Pluviógrafo	3
1.3. Pluviómetros totalizadores	4
2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	7
2.1. Descripción de las estaciones climáticas analizadas	9
2.1.1. Estación climática Puerto Barrios	10
2.1.2. Estación climática San Martín Jilotepeque	10
2.1.3. Estación climática Santa Cruz Balanyá	11
2.1.4. Estación climática Potrero Carrillo	12
2.1.5. Estación climática Morazán	12
2.1.6. Estación climática La Suiza Contenta	13
2.1.7. Estación climática La Unión	14
2.1.8. Estación climática Pasabien	14

3.	DEFINICIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA	17
3.1.	Aplicación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia	18
4.	METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO	23
4.1.	Recopilación de la información pluviográfica	23
4.2.	Selección de intensidades máximas	24
4.3.	Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad	27
5.	TÉCNICAS ESTADÍSTICAS UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS	29
5.1.	Parámetros estadísticos	29
5.1.1.	De posición (valor medio)	29
5.1.2.	De dispersión (desviación estándar)	29
5.1.3.	De asimetría (coeficiente de asimetría relativa).....	30
5.1.4.	De aplanamiento	31
5.2.	Distribuciones teóricas	31
5.2.1.	Distribución Binomial.....	32
5.2.2.	Distribución Normal.....	34
5.3.	Distribuciones extremas.....	35
5.3.1.	Probabilidad	36
5.3.2.	Período de retorno	37
5.3.3.	Distribución de Gumbel.....	38

6.	CÁLCULO Y PRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA.....	43
7.	AJUSTE DE LAS INTENSIDADES DE LLUVIA A MODELOS ESTÁNDAR Y <i>WENZEL</i>	71
7.1.	Errores estadísticos	80
7.1.1.	Error relativo	80
7.1.2.	Mínimos cuadrados	80
7.2.	Comparación de modelos para cada estación climatológica	81
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Pluviómetro	2
2.	Pluviógrafo	4
3.	Pluviómetro totalizador	5
4.	Cuenca del río Motagua	7
5.	Estaciones climáticas localizadas en la cuenca del río Motagua	9
6.	Estación climática Puerto Barrios	10
7.	Estación climática San Martín Jilotepeque	11
8.	Estación climática Santa Cruz Balanyá	11
9.	Estación climática Potrero Carrillo	12
10.	Estación climática Morazán	13
11.	Estación climática La Suiza Contenta	13
12.	Estación climática La Unión	14
13.	Estación climática Pasabien	15
14.	Familia de curvas IDF para distintos períodos de retorno	17
15.	Equipo pluviográfico y banda milimetrada	24
16.	Banda pluviográfica con registro de precipitación	25
17.	Esquema de las curvas IDF, según el método propuesto por Témez	26
18.	Curvas IDF de la estación climática Santa Cruz Balanyá, utilizando la distribución de frecuencias Normal	44
19.	Curvas IDF de la estación climática Santa Cruz Balanyá, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel	45

20.	Curvas IDF de la estación climática San Martín Jilotepeque, utilizando la distribución de frecuencias Normal	46
21.	Curvas IDF de la estación climática San Martín Jilotepeque, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel	47
22.	Curvas IDF de la estación climática La Suiza Contenta, utilizando la distribución de frecuencias Normal	48
23.	Curvas IDF de la estación climática La Suiza Contenta, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel	49
24.	Curvas IDF de la estación climática Morazán, utilizando la distribución de frecuencias Normal	50
25.	Curvas IDF de la estación climática Morazán, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel	51
26.	Curvas IDF de la estación climática Potrero Carrillo, utilizando la distribución de frecuencias Normal	52
27.	Curvas IDF de la estación climática Potrero Carrillo, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel	53
28.	Curvas IDF de la estación climática Pasabien, utilizando la distribución de frecuencias Normal	54
29.	Curvas IDF de la estación climática Pasabien, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel	55
30.	Curvas IDF de la estación climática La Unión, utilizando la distribución de frecuencias Normal	56
31.	Curvas IDF de la estación climática La Unión, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel	57
32.	Curvas IDF de la estación climática Puerto Barrios, utilizando la distribución de frecuencias Normal	58
33.	Curvas IDF de la estación climática Puerto Barrios, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel	59

34.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 2 años	60
35.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 2 años	61
36.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 2 años	61
37.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 25 años	62
38.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 25 años	62
39.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 25 años	63
40.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 100 años	63
41.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 100 años	64
42.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 100 años	64
43.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 2 años	65
44.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 2 años	66
45.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 2 años	66
46.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 25 años	67
47.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 25 años	67

48.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 25 años	68
49.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 100 años.....	68
50.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 100 años.....	69
51.	Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 100 años.....	69
52.	Resultado del ajuste de un conjunto de datos a una función cuadrática.....	81

TABLAS

I.	Resumen multianual de intensidades de lluvia máximas de la estación climática La Unión.	28
II.	Función de Gumbel, variable reducida y período de retorno.....	41
III.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Santa Cruz Balanyá.	44
IV.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Santa Cruz Balanyá.	45
V.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática San Martín Jilotepeque.	46
VI.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática San Martín Jilotepeque.	47
VII.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática La Suiza Contenta.....	48
VIII.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática La Suiza Contenta.....	49

IX.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Morazán.....	50
X.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Morazán.....	51
XI.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Potrero Carrillo.....	52
XII.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Potrero Carrillo.....	53
XIII.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Pasabien.....	54
XIV.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Pasabien.....	55
XV.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática La Unión.....	56
XVI.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática La Unión.....	57
XVII.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Puerto Barrios.....	58
XVIII.	Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Puerto Barrios.....	59
XIX.	Coeficientes del modelo Wenzel para la estación climática Santa Cruz Balanyá.....	72
XX.	Coficientes del modelo estándar para la estación climática Santa Cruz Balanyá.....	72
XXI.	Coeficientes del modelo Wenzel para la estación climática San Martin Jilotepeque.....	73
XXII.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática San Martin Jilotepeque.....	73

XXIII.	Coeficientes del modelo Wenzel para la estación climática La Suiza Contenta.	74
XXIV.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática La Suiza Contenta.	74
XXV.	Coeficientes del modelo Wenzel para la estación climática Morazán.	75
XXVI.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática Morazán.	75
XXVII.	Coeficientes del modelo Wenzel para la estación climática Potrero Carrillo.	76
XXVIII.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática Potrero Carrillo.	76
XXIX.	Coeficientes del modelo Wenzel para la estación climática Pasabien.	77
XXX.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática Pasabien.	77
XXXI.	Coeficientes del modelo Wenzel para la estación climática La Unión.	78
XXXII.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática La Unión.	78
XXXIII.	Coeficientes del modelo Wenzel para la estación climática Puerto Barrios.	79
XXXIV.	Coeficientes del modelo estándar para la estación climática Puerto Barrios.	79
XXXV.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación La Unión.	82
XXXVI.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación Morazán.	83

XXXVII.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación Pasabien.....	83
XXXVIII.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación Potrero Carrillo.....	84
XXXIX.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación San Martin Jilotepeque.....	84
XL.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación San Santa Cruz Balanyá.....	85
XLI.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación La Suiza Contenta.....	85
XLII.	Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación Puerto Barrios.....	86

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
γ_2	Coefficiente de aplanamiento
γ_1	Coefficiente de asimetría relativa
$\binom{n}{x}$	Combinación de n elementos tomados de x
α_0, u_0	Constantes obtenidas de los datos de intensidades de lluvia
$\sigma_{x,y}$	Desviación estándar de las variables x e y
S	Desviación estándar
ΔP	Diferencial de precipitación
Δt	Diferencial de tiempo
dx	Diferencial de x
e^x	Exponencial de x
$\Phi(x)$	Función de distribución de Gumbel de la variable aleatoria x
$F(x)$	Función de distribución normal de la variable aleatoria x
$f(x)$	Función de frecuencia de la variable aleatoria x
$f(z)$	Función de frecuencia normal o de Gauss
$^\circ$	Grado sexagesimal
$\int_{-\infty}^{\infty} x$	Integral de la función de la variable independiente x
I	Intensidad de precipitación

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f}{n}$	Límite de la razón frecuencial cuando n tiende a infinito
$\ln n$	Logaritmo natural de n
'	Minuto
μ_4	Momento central de cuarto orden
μ_2	Momento central de segundo orden
μ_3	Momento central de tercer orden
T	Período de retorno
p	Probabilidad de éxito
q	Probabilidad de fracaso
"	Segundo
m	Valor medio
\bar{y}	Valor medio de la variable dependiente y
\bar{x}	Valor medio de la variable independiente x
z	Variable aleatoria normalizada

GLOSARIO

Asimetría	Falta de simetría entre los datos de una distribución. Se refiere a que si los valores de la serie presentan la misma forma a la izquierda y derecha de un valor central.
Modo	Parámetro estadístico que está definido como el valor más probable de la variable aleatoria.
Recorrido Intercuartílico	Es una medida de dispersión, su valor se obtiene de la diferencia del tercer cuartil menos el primer cuartil.
Sesgo	Se denomina así a la asimetría que presenta una distribución de frecuencias, puede ser negativo o a la izquierda y positivo o a la derecha.

RESUMEN

La importancia de implementar o actualizar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia propias de una determinada región o de un país completo, radica en que dichas curvas constituyen una herramienta básica para los entes encargados del diseño de obras hidráulicas, enfocadas a mitigar o evitar daños ocasionados por eventos meteorológicos, principalmente asociados con lluvias de intensidades máximas, esto debido a que son elaboradas con información histórica del comportamiento de la lluvia de una región y al aplicar el análisis estocástico es posible determinar la probabilidad de que un evento con intensidad de lluvia máxima pueda ser igualado o superado en un tiempo determinado.

La metodología empleada para la elaboración de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de la cuenca del río Motagua es la recomendada por Témez, por ser el método más validado para obtener los valores de intensidad de lluvia máxima de un registro pluviográfico, luego a dichos valores le fue aplicado un análisis de frecuencias, empleando las funciones de distribución Normal y de Gumbel, para finalmente ajustar los valores de intensidad de lluvia máxima a dos modelos que son el propuesto por *Wenzel* y el utilizado en el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

Además de obtener las ecuaciones matemáticas de la intensidad de lluvia máxima para un período de retorno y duración en específico, también fue posible representar el comportamiento de la intensidad de lluvia a lo largo de la cuenca del río Motagua mediante mapas de isolíneas de intensidades de lluvia.

OBJETIVOS

General

Generar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la cuenca del río Motagua.

Específicos

1. Generar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia con el modelo estándar utilizado en el Departamento de Investigación y Servicios Hidrológicos de INSIVUMEH.
2. Generar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia con el modelo propuesto por *Wenzel*.
3. Determinar el modelo que represente mejor los valores obtenidos del análisis de distribución de frecuencias de cada estación climática.

HIPÓTESIS

El modelo estándar no es el que mejor se ajusta a los valores obtenidos del análisis de distribución de frecuencia.

INTRODUCCIÓN

Hidrológicamente Guatemala está dividida en tres vertientes que son: vertiente del océano Pacífico, vertiente del mar Caribe y vertiente del Golfo de México. En cada una de esas vertientes existen cuencas hidrográficas de los principales ríos de la República de Guatemala.

En la vertiente del mar Caribe se encuentra la cuenca del río Motagua, con un área de 12 670 kilómetros cuadrados, equivalente al 11,63 por ciento del área total del territorio nacional, y según el registro histórico de un total de nueve estaciones climáticas ubicadas en la cuenca, la precipitación anual promedio es de 1 530 milímetros.

La precipitación puede caracterizarse como intensidad de precipitación, expresando la cantidad de lluvia en función del tiempo, siendo sus dimensionales milímetros por hora. De tal modo, también es posible relacionar la intensidad de precipitación con la frecuencia con que ocurre y con la duración de la lluvia, esto se logra mediante técnicas estadísticas que relacionan las tres variables, dando como resultado las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, que son generadas en base a las intensidades máximas.

Las intensidades de precipitación muy altas son poco frecuentes pero cuando ocurren ocasionan serios daños como: el colapso en los sistemas de drenaje, desborde de los cauces de los ríos y deslizamientos de laderas. Sin embargo, es posible mitigar o evitar los daños en las obras hidráulicas con un buen diseño, basado en el conocimiento de intensidades máximas de precipitación.

Por esta razón en el presente trabajo de graduación se generan las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la cuenca del río Motagua, para luego realizar la comparación entre los resultados de los modelos estándar y el propuesto por *Wenzel* y determinar el modelo que represente mejor los valores estadísticos obtenidos del análisis de distribución de frecuencias mediante el cálculo de la sumatoria de errores relativos.

Los capítulos uno y dos contienen la descripción de los instrumentos utilizados para la medición de la precipitación en el sistema tradicional, seguido de la descripción general de la zona de estudio y de cada una de las estaciones climáticas ubicadas dentro de la misma.

Los capítulos tres y cuatro contienen la definición, las múltiples aplicaciones y la metodología utilizada para la elaboración de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia. El capítulo cinco contiene una serie de definiciones de las técnicas estadísticas utilizadas en el cálculo de distribución de frecuencias utilizando las funciones Normal y de Gumbel.

Por último en los capítulos seis y siete se encuentran el cálculo y la presentación gráfica de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, así como la comparación entre los modelos estándar y *Wenzel*.

1. MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

La precipitación puede definirse como el producto líquido o sólido de la condensación del vapor de agua que cae de las nubes y se deposita en el terreno procedente del aire. Por tanto comprende la lluvia, el granizo, la nieve, el rocío, la centellada blanca, la escarcha y la precipitación de la neblina.

El volumen total de las precipitaciones se expresa en función del nivel que alcanzaría sobre una proyección horizontal de la superficie de la tierra. El objetivo principal de cualquier método de medición consiste en obtener una muestra representativa de la precipitación de la zona a que se refiere la medición.

Existen algunas técnicas para medir las precipitaciones, siendo una de las más modernas el uso del radar meteorológico, que determina la densidad de las nubes y de la lluvia, permitiendo estimar tanto el volumen de lluvia como su desarrollo sobre una región geográfica y elaborar pronósticos a corto plazo, su uso ha sido de gran utilidad para solucionar problemas de previsión hidrológica.

Sin embargo, para utilizar el radar meteorológico es necesario calibrarlo con un sistema tradicional que consiste en medir la columna vertical de agua acumulada precipitada en un punto fijo, los instrumentos comúnmente utilizados para este tipo de mediciones son: el pluviómetro, el pluviógrafo y el pluviómetro totalizador.

1.1. Pluviómetro

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), para fines de estudios y comparación, recomienda utilizar el pluviómetro estándar que tiene un área de recepción de 200 centímetros cuadrados, delimitada por un anillo de bronce con borde bicelado.

El pluviómetro se compone internamente por dos partes cilíndricas que son: un receptor y un colector, el receptor ubicado en la parte superior está unido al anillo de bronce y su fondo tiene forma de embudo, el agua recolectada por el receptor pasa a la parte inferior que consta de una vasija de boca estrecha llamada colector, que está aislada del cilindro exterior para evitar evaporación por calentamiento.

La medición del agua recolectada en el pluviómetro se lleva a cabo utilizando una probeta especialmente graduada en milímetros y en décimas de milímetros, la altura alcanzada del agua medida en la probeta representa la capa de agua sobre el terreno suponiendo que fuese horizontal y no hubiese pérdidas ni movimiento del agua.

Figura 1. **Pluviómetro**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

1.2. Pluviógrafo

A diferencia del pluviómetro que únicamente permite obtener un parámetro, que es la cantidad de agua precipitada durante 24 horas, el pluviógrafo registra la cantidad de precipitación en forma continua, lo que permite obtener tres parámetros de la lluvia que son: cantidad, duración e intensidad.

Existen varios tipos de pluviógrafos, que son: de flotador con sifón, de balanza, de oscilación y combinación de balanza y oscilación. En Guatemala normalmente se utiliza el pluviógrafo de flotador con sifón, que consta de un receptor igual al del pluviómetro con un área de recepción de 200 centímetros cuadrados de superficie. El receptor va unido a una caja cilíndrica de 110 centímetros de diámetro, en la que se aloja el sistema registrador del aparato y una jarra colectora.

El agua recolectada por la parte receptora pasa por un embudo y un tubo al mecanismo registrador, constituido por un cilindro en cuyo interior se encuentra un flotador que se desplaza verticalmente, conectado a un brazo de palanca con una plumilla que marca la línea en la banda, que está colocada sobre un cilindro movido por un sistema de relojería, registrándose así la precipitación en función del tiempo.

Figura 2. **Pluviógrafo**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

1.3. Pluviómetros totalizadores

Este tipo de pluviómetros es colocado en regiones de difícil acceso o montañosas, por lo que tienen capacidad de almacenar aproximadamente 150 litros durante la época lluviosa, y así el observador puede tomar la lectura una o dos veces al año, ya que el pluviómetro permite tomar una sola medida de precipitación total en un cierto punto, durante un largo período de tiempo.

Existen diversos modelos que permiten conservar el agua recolectada durante períodos largos de tiempo, sin embargo, el modelo más utilizado consta de un depósito de zinc con una boquilla de 200 centímetros cuadrados, con un aro de latón de borde cortante. En el fondo lleva un tapón enroscado de 10 centímetros de diámetro y un grifo. Dicho depósito va soportado y protegido por otro de chapa galvanizada dejando un espacio entre ambos que evita el enfriamiento o calentamiento exagerado provocado por las condiciones climáticas. El fondo del depósito interno se cierra con un tapón enroscado o con

una tapa fijada con candado. Para evitar la evaporación en el interior se colocan dos litros de aceite, líquido de vaselina o parafina.

Regularmente los pluviómetros totalizadores son colocados en lugares en donde las precipitaciones se producen en gran parte en forma de nieve, que por medios químicos debe fundirse para mantenerla en forma líquida.

Figura 3. **Pluviómetro totalizador**

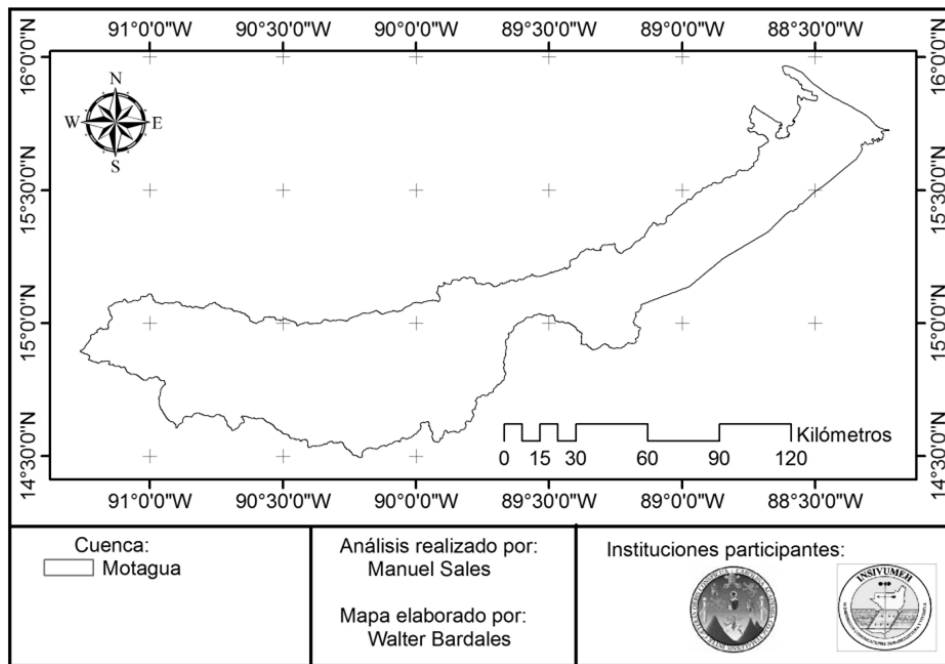


Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en la vertiente del mar Caribe, donde la longitud de los ríos es mucho mayor que en otras vertientes, lo cual implica que las pendientes de los ríos sean suaves y su desarrollo menos brusco, provocando que las crecidas sean de mayor duración, en dicha vertiente está localizada la cuenca del río Motagua que es el río más largo de Guatemala, con 486,5 kilómetros de longitud y su cuenca cuenta con un área superficial de 12 670 kilómetros cuadrados, lo cual la constituye como la cuenca más extensa de la vertiente del mar Caribe.

Figura 4. **Cuenca del río Motagua**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

La cuenca del río Motagua abarca un total de trece departamentos, que son: Alta Verapaz, Baja Verapaz, Chimaltenango, Guatemala, Izabal, Jalapa, El Progreso, Quiché, Sacatepéquez, Zacapa, Chiquimula, Sololá y Totonicapán. Dichos departamentos presentan, por su topografía accidentada y variabilidad de precipitaciones y temperaturas, una serie de zonas de vida de *Holdridge* que es una medida de la riqueza en biodiversidad con que cuenta Guatemala.

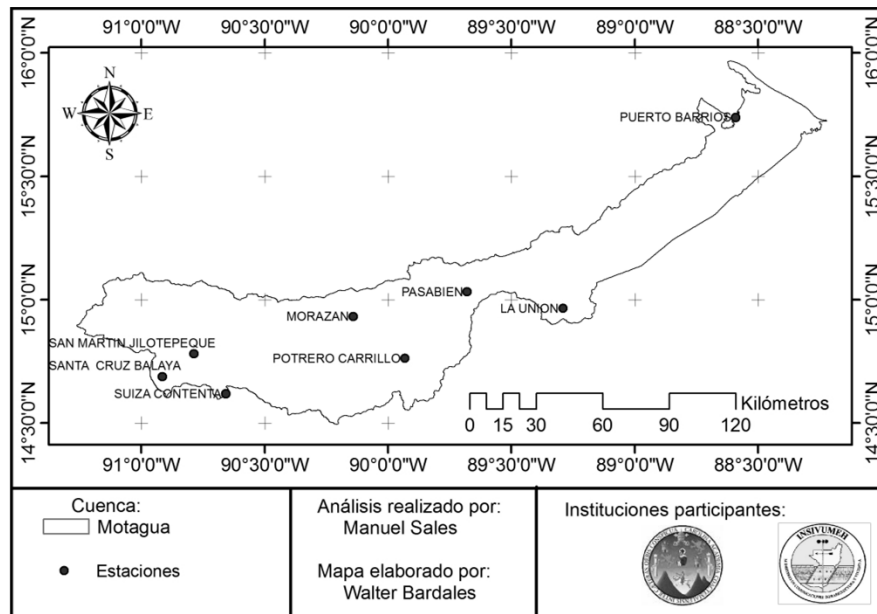
Según la clasificación de las zonas de vida de *Holdridge* en la parte oeste de la cuenca del río Motagua, donde se localizan los departamentos de Totonicapán, Quiché, Sololá, Sacatepéquez y Chimaltenango, predomina la zona de bosque húmedo montano bajo subtropical, además en la parte central de la cuenca, donde se localizan los departamentos de Guatemala, Baja Verapaz y Alta Verapaz, predomina la zona de bosque húmedo Subtropical templado.

En la parte sur-este de la cuenca predomina la zona de bosque húmedo subtropical templado, donde además se encuentran las zonas semiáridas del país donde las precipitaciones en los departamentos Zacapa, Jalapa, Chiquimula y El Progreso presentan valores de precipitación menores a 500 milímetros por año, en contraste con el sector norte-este en el departamento de Izabal donde predomina la zona de bosque muy húmedo subtropical cálido, con un rango anual de precipitaciones que se encuentra entre los 1 500 a 4 000 milímetros por año.

2.1. Descripción de las estaciones climáticas analizadas

En la cuenca del río Motagua se encuentran ubicadas un total de doce estaciones climáticas de diferentes tipos funcionando actualmente, de las cuales cuatro fueron descartadas por no contar con un registro de años completo, siendo éstas Las Vegas, Los Albores, Chinique y San Lorenzo. En consecuencia, ocho estaciones climáticas fueron consideradas para la elaboración de curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia, por contar con registros completos y que abarcan un período considerable de años de registro necesarios para el presente estudio, siendo éstas San Martín Jilotepeque, Santa Cruz Balanyá, La Suiza Contenta, Morazán, Potrero Carrillo, Pasabien, La Unión y Puerto Barrios.

Figura 5. **Estaciones climáticas localizadas en la cuenca del río Motagua**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

2.1.1. Estación climática Puerto Barrios

Estación climática tipo A, ubicada en el municipio de Puerto Barrios del departamento de Izabal, a una elevación de 2 metros sobre el nivel del mar y coordenadas $15^{\circ}44'16''$ latitud norte y $88^{\circ}35'30''$ longitud oeste. Las bandas pluviográficas analizadas fueron un total de 3 450, que a su vez corresponden a un período que abarca desde 1994 hasta el 2010.

Figura 6. **Estación climática Puerto Barrios**



Fuente: Puerto Barrios, Izabal.

2.1.2. Estación climática San Martín Jilotepeque

Estación climática tipo B, ubicada en el municipio de San Martín Jilotepeque del departamento de Chimaltenango, a una elevación de 1 820 metros sobre el nivel del mar y coordenadas $14^{\circ}47'13''$ latitud norte y $90^{\circ}47'32''$ longitud oeste. Las bandas pluviográficas analizadas fueron un total de 1 277, que a su vez corresponden a un período que abarca 1995 hasta el 2011.

Figura 7. **Estación climática San Martín Jilotepeque**



Fuente: San Martín Jilotepeque, Chimaltenango.

2.1.3. **Estación climática Santa Cruz Balanyá**

Estación climática tipo B, ubicada en el municipio de Santa Cruz Balanyá del departamento de Chimaltenango, a una elevación de 2 080 metros sobre el nivel del mar y coordenadas $14^{\circ}41'12''$ latitud norte y $90^{\circ}54'55''$ longitud oeste. Las bandas pluviográficas analizadas fueron un total de 1 184, que a su vez corresponden a un período que abarca desde 1995 hasta el 2010.

Figura 8. **Estación climática Santa Cruz Balanyá**



Fuente: Santa Cruz Balanyá, Chimaltenango.

2.1.4. Estación climática Potrero Carrillo

Estación climática tipo B, ubicada en el municipio de Jalapa departamento de Jalapa, a una elevación de 1 760 metros sobre el nivel del mar y coordenadas 14°45'38" latitud norte y 89°55'56" longitud oeste. Las bandas pluviográficas analizadas fueron un total de 3 712, que a su vez corresponden a un período que abarca desde 1990 hasta el 2011.

Figura 9. **Estación climática Potrero Carrillo**



Fuente: Jalapa, Jalapa.

2.1.5. Estación climática Morazán

Estación climática tipo B, ubicada en el municipio de Morazán del departamento de El Progreso, a una elevación de 370 metros sobre el nivel del mar y coordenadas 14°55'49" latitud norte y 90°08'31" longitud oeste. Las bandas pluviográficas analizadas fueron un total de 2 810, que a su vez corresponden a un período que abarca desde 1990 hasta el 2011.

Figura 10. **Estación climática Morazán**



Fuente: Morazán, El Progreso.

2.1.6. Estación climática La Suiza Contenta

Estación climática tipo B, ubicada en el municipio de San Lucas Sacatepéquez del departamento de Sacatepéquez, a una elevación de 2 105 metros sobre el nivel del mar y coordenadas 14°37'00" latitud norte y 90°39'40" longitud oeste. Las bandas pluviográficas analizadas fueron un total 1 875, que a su vez corresponden a un período que abarca desde 1995 hasta el 2010.

Figura 11. **Estación climática La Suiza Contenta**



Fuente: San Lucas Sacatepéquez, Sacatepéquez.

2.1.7. Estación climática La Unión

Estación climática tipo B, ubicada en el municipio de La Unión del departamento de Zacapa, a una elevación de 1 100 metros sobre el nivel del mar y coordenadas $14^{\circ}58'00''$ latitud norte y $89^{\circ}17'39''$ longitud oeste. Las bandas pluviográficas analizadas fueron un total de 3 615, que a su vez corresponden a un período que abarca desde 1991 hasta el 2010.

Figura 12. **Estación climática La Unión**



Fuente: La Unión, Zacapa.

2.1.8. Estación climática Pasabien

Estación climática tipo B, ubicada en el municipio de Río Hondo del departamento de Zacapa, a una elevación de 260 metros sobre el nivel del mar y coordenadas $15^{\circ}01'48''$ latitud norte y $89^{\circ}40'48''$ longitud oeste. Las bandas pluviográficas analizadas fueron un total de 1 647, que a su vez corresponden a un período que abarca desde el 2002 hasta el 2011.

Figura 13. **Estación climática Pasabien**



Fuente: Río Hondo, Zacapa.

El Departamento de Investigación y Servicios Climatológicos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), tiene a su cargo el monitoreo de una amplia red de estaciones climáticas situadas en todo el territorio nacional, donde se miden elementos meteorológicos diariamente, estos elementos de observación pueden ser: principales y auxiliares.

Los elementos de observación principales son:

- Temperatura
- Humedad relativa del aire
- Precipitaciones
- Tiempo presente
- Tiempo pasado
- Tipo de nubes
- Nubosidad

Los elementos de observación auxiliares son:

- Presión atmosférica
- Viento en superficie
- Brillo y radiación solar
- Humedad del suelo
- Evaporación y evapotranspiración.

El INSIVUMEH clasifica a las estaciones climatológicas como tipo A, tipo B, tipo C o tipo D, donde cada tipo difiere fundamentalmente en el instrumental que posee y por ende, en el número de elementos meteorológicos que se observan.

Estaciones climatológicas de tipo “A”: los elementos meteorológicos que se observan en total son once, siendo éstos: temperatura, precipitación, humedad relativa del aire, presión atmosférica, brillo solar, radiación solar, evaporación, nubosidad, viento en superficie, temperatura del subsuelo y visibilidad.

Estaciones climatológicas de tipo “B”: los elementos meteorológicos que se observan en total son cuatro, siendo éstos: temperatura, precipitación, humedad relativa del aire y velocidad de viento.

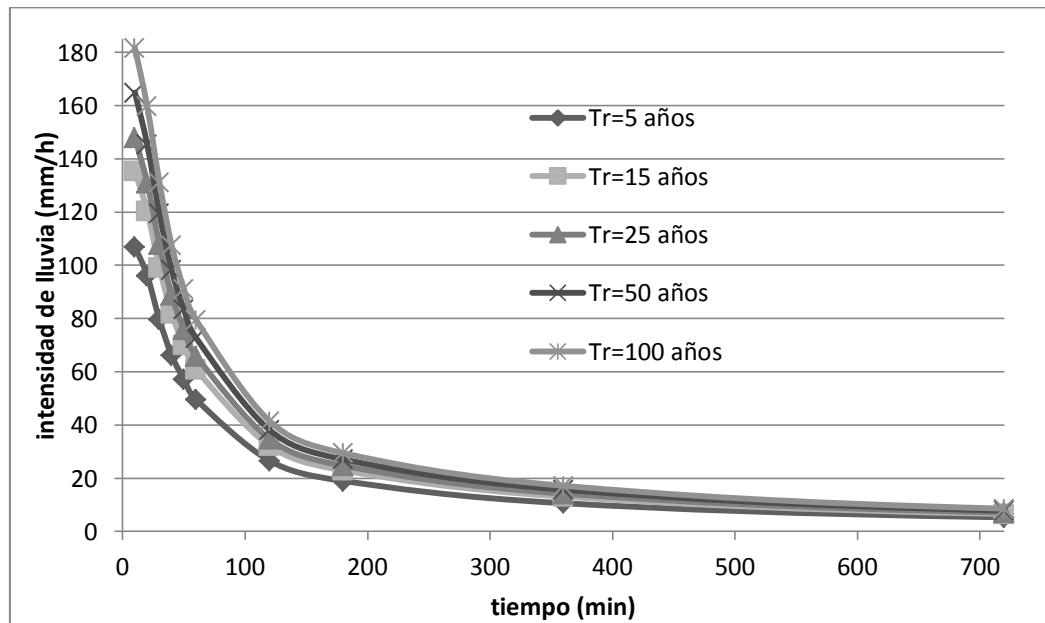
Estaciones climatológicas de tipo “C”: los elementos meteorológicos que se observan en total son dos, siendo éstos: temperatura y precipitación.

Estaciones climatológicas de tipo “D”: se observa un único elemento meteorológico que es la precipitación.

3. DEFINICIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN FRECUENCIA

En relación a las curvas IDF, Pizarro afirma que corresponden a la representación gráfica de la relación que existe entre la intensidad de la lluvia con su duración, asociado a la frecuencia o período de retorno, donde para cada período de retorno se tiene una curva diferente.

Figura 14. Familia de curvas IDF para distintos períodos de retorno



Fuente: elaboración propia.

Una definición más detallada es la descrita por Mintegui y López, que señalan que las curvas IDF representan a las duraciones en las abscisas y las

intensidades de precipitación en las ordenadas, donde cada curva representada corresponde a una frecuencia o período de retorno, de tal manera que las gráficas de estas curvas representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los puntos de una misma curva a un idéntico período de retorno.

Para la elaboración de estas curvas es necesario realizar el análisis de frecuencias de lluvias intensas. En este sentido, las distribuciones más utilizadas son la distribución Normal y la de valores extremos tipo I o de Gumbel, esta última distribución ha sido utilizada con buenos resultados en el estudio de eventos meteorológicos de valores máximos diarios y anuales, obteniéndose así ajustes precisos según Mintegui y López.

3.1. Aplicación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia son de mucha utilidad para el diseño hidrológico de caudales máximos cuando se emplean modelos lluvia-escorrentía como los hidrogramas unitarios o el método racional. De tal modo que gran número de proyectos hidrológicos, como construcción de puentes, redes de drenaje y diseño de evacuadores de crecidas, entre otros, se definen en función de la máxima precipitación que podría esperarse para un determinado período de retorno. Es decir, que a partir de estos eventos extremos, se fijan las dimensiones del proyecto y se establecen criterios de predicción y riesgo.

Además, también son utilizadas para dimensionar obras destinadas al control de la erosión en laderas y recuperación de suelos degradados. Debido a que para la construcción de obras como zanjas de infiltración, canales de desviación, diques de postes, gaviones y otras obras de prevención de

procesos erosivos, se hace necesario conocer los valores máximos de intensidades de precipitación que puedan presentarse, con el fin de dimensionar adecuadamente dichas obras.

Adicionalmente a las aplicaciones anteriores otra importante es la construcción de las tablas de extensión de las curvas IDF, que permiten estimar las intensidades máximas de precipitación para distintas duraciones y períodos de retorno, relacionando la intensidad de precipitación de 1, 2, 4,...12 horas, con la intensidad de 24 horas, tomando en cuenta que las precipitaciones diarias son más comunes de obtener por medio de un pluviómetro, permitiendo así extrapolar estas relaciones a zonas donde sólo se cuenta con datos pluviométricos.

Originado de la importancia en sus múltiples aplicaciones, son variados los países que cuentan con una amplia red de curvas IDF; entre ellos destacan Brasil, Estados Unidos, Ecuador, Chile y Grecia, entre otros. Empleando dichas curvas para determinar puntos de riesgo, principalmente de zonas de inundaciones a través de mapas de zonificación de riesgos naturales en conjunto con otras variables naturales. Además, en India se utiliza la relación entre las variables de intensidad, duración y frecuencia en la planificación y diseño de proyectos relacionados con los recursos hídricos.

Una particularidad de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia es que pueden expresarse como ecuaciones, con el fin de evitar la lectura de las intensidades de precipitación en una gráfica. De este modo, a través del tiempo, varios investigadores han generado diversos planteamientos de las relaciones matemáticas que modelan a dichas curvas, a continuación se presentan algunas expresiones matemáticas desarrolladas:

Modelo propuesto por Sherman:

$$I = \frac{KT^m}{(D + B)^n}$$

Modelo propuesto por Bernard:

$$I = \frac{KT^m}{D^n}$$

Modelo propuesto por Linsley, válida para duraciones entre 5 y 20 minutos:

$$I = \frac{A}{D + B}$$

Modelo propuesto por Linsley, válida para duraciones superiores a 60 minutos:

$$I = \frac{c}{D^n}$$

Modelo propuesto por *Wenzel*:

$$I = \frac{A}{D^n + B}$$

Modelo propuesto por Chen:

$$I = i_1^T * \frac{A}{(D + B)^c}$$

Modelo propuesto por Chow:

$$I = \frac{KT^m}{D^n + B}$$

Modelo propuesto por Koutsoyiannis:

$$I = K \frac{m \ln \ln \frac{1}{T}}{(D + B)^n}$$

Modelo estándar:

$$I = \frac{A}{(D + B)^n}$$

Donde A, B, K, c, m y n son parámetros adimensionales, i_1^T es la intensidad media de la lluvia de una hora y período de retorno de T años, T es período de retorno, D es la duración e I la intensidad máxima de precipitación.

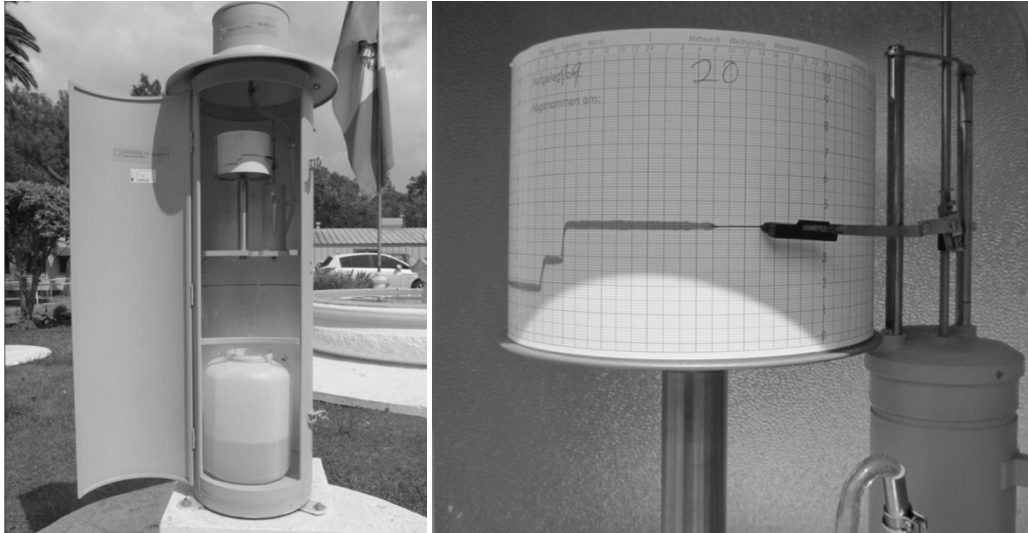
4. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO

4.1. Recopilación de la información pluviográfica

La información utilizada para la elaboración de las curvas IDF de las estaciones climáticas localizadas en la cuenca del río Motagua fue proporcionada por el Departamento de Investigación y Servicios Climatológicos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), que es una dependencia adscrita al Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda.

Las estaciones climáticas analizadas en el presente estudio fueron un total de ocho estaciones, cada una cuenta con equipos pluviográficos tipo *Hellman*, que por medio de bandas milimetradas (vea figura 15), registran los eventos de precipitación que ocurren durante el año, de manera constante utilizando bandas diarias. Actualmente, en dichas estaciones se utilizan bandas milimetradas semanales, lo que dificulta realizar la lectura a cada diez minutos durante la época lluviosa, por lo mismo, no se pudo incluir el registro generado a partir del 2012.

Figura 15. **Equipo pluviográfico y banda milimetrada**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

En cada estación climatológica se utilizó el máximo posible de años de registro, para disponer del máximo de datos pluviográficos y lograr obtener una estadística confiable. Sin embargo, en alguno de los registros de las estaciones climatológicas existen años incompletos o bandas pluviográficas con defectos ocasionados por el paso del tiempo o por el funcionamiento incorrecto del pluviógrafo.

4.2. Selección de intensidades máximas

El método más validado para la construcción gráfica de las curvas IDF, es el propuesto por Témez, que consiste en analizar las bandas de registros pluviográficos, seleccionando los valores extremos de precipitación para tiempos determinados.

De tal modo, del registro pluviográfico de cada estación climática, únicamente deben ser discretizadas las bandas pluviográficas que representen un evento extremo y que coincidan con el historial de precipitaciones máximas del Departamento de Investigación y Servicios Climáticos, obteniendo así las cantidades máximas de precipitación con duración de 24 horas, que abarca desde las 7:00 horas de un día hasta las 7:00 horas del día siguiente.

Figura 16. **Banda pluviográfica con registro de precipitación**



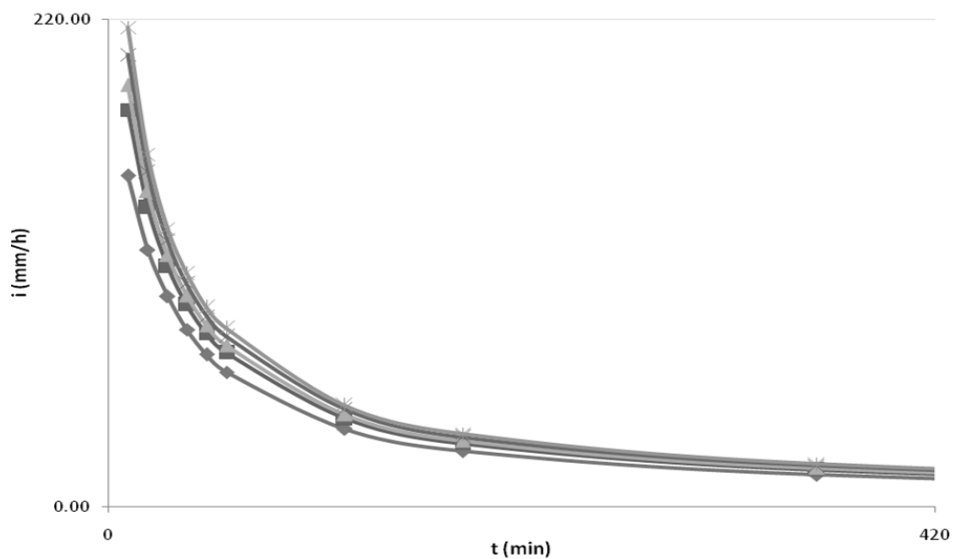
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Luego de discretizar las bandas pluviográficas se procede a calcular los valores de intensidad de la lluvia para distintas duraciones, con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

Donde I es la intensidad de precipitación en milímetros por hora, ΔP el diferencial de precipitación en milímetros y Δt el diferencial de tiempo en horas.

Figura 17. **Esquema de las curvas IDF, según el método propuesto por Témez**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 17, es posible apreciar que el valor de I (intensidad) aumenta al disminuir t (tiempo de duración de la lluvia), presentando una forma exponencial negativa. Esto debido a que la probabilidad de encontrar intensidades mayores aumenta cuando las duraciones disminuyen, por el contrario, las intensidades disminuyen cuando las duraciones son mayores.

4.3. Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad

Tomando en cuenta que en un año en particular pueden ocurrir una serie de eventos con valores de intensidades de lluvia diferentes, deben seleccionarse los valores máximos de dicho año, de lo anterior es posible obtener un resumen multianual de intensidades de lluvia máxima para cada estación climática (vea tabla I).

Al resumen multianual es necesario aplicar un análisis de frecuencia y para ello se requiere del uso de una función de distribución de probabilidades y aplicar las técnicas estadísticas que se describen en el capítulo siguiente. Aunque existen varias funciones de distribución de probabilidades teóricas como la distribución binomial, distribución de Gumbel, distribución de Poisson, distribución normal, distribución chi cuadrado y distribución gamma. En este estudio se aplicaron tanto la distribución Normal como la distribución de Gumbel, por considerar que ambas funciones son aplicables a eventos meteorológicos.

Sin embargo, la función de distribución de Gumbel o tipo 1 ha sido empleada en el estudio de eventos meteorológicos de valores máximos, obteniendo ajustes muy precisos para valores máximos diarios y anuales. Además, literatura especializada en el tema, cita que la aplicación de dicha función de distribución en estudios que contemplen eventos de valores extremos, resulta ser la más adecuada para representar eventos máximos.

Tabla I. **Resumen multianual de intensidades de lluvia máximas de la estación climática La Unión**

Año/ Duración	Intensidad de lluvia máxima (mm/h)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
1991	60,00	57,00	52,40	45,00	44,64	39,00	20,75	14,17	7,17	3,58	1,79
1992	120,00	120,00	100,00	87,60	75,84	64,50	36,35	24,23	12,12	6,06	3,03
1994	120,00	90,00	72,00	63,00	54,48	47,00	24,55	16,37	8,18	4,35	2,18
1995	60,00	57,00	44,00	34,95	29,40	28,00	20,75	14,73	7,67	4,71	2,52
1996	120,00	120,00	96,00	75,00	62,64	54,00	28,75	22,10	12,08	6,93	4,09
1997	57,00	57,00	57,00	55,95	45,60	38,50	20,05	13,67	7,27	3,63	1,82
1998	60,00	60,00	60,00	47,25	39,96	37,00	28,50	24,33	16,40	11,81	6,33
1999	171,00	114,00	95,00	77,85	62,28	52,30	30,45	20,60	11,55	5,80	2,90
2000	171,00	114,00	95,00	77,25	68,40	64,00	40,50	27,67	15,07	7,57	3,78
2001	171,00	114,00	95,00	85,50	78,00	72,90	37,20	24,80	15,83	7,92	4,20
2002	114,00	114,00	95,00	75,75	62,40	53,90	28,70	19,13	9,57	4,78	2,39
2003	60,00	60,00	54,00	43,20	35,88	30,30	23,70	16,80	8,42	4,21	2,10
2004	75,00	60,90	55,80	45,45	45,48	38,10	20,00	13,57	7,45	3,85	1,99
2005	180,00	120,60	100,80	90,75	78,60	70,60	42,55	31,07	16,13	8,07	4,03
2006	111,60	84,30	71,20	63,45	51,48	43,10	24,95	16,70	8,57	4,28	2,14
2007	120,00	90,60	81,40	64,80	52,56	44,90	25,35	21,07	13,58	7,90	3,96
2008	56,40	56,40	56,40	53,55	51,24	44,60	23,80	16,83	10,08	5,04	2,52
2009	168,00	139,80	102,20	84,00	72,48	65,30	38,10	27,57	15,65	8,72	4,41
2010	120,00	113,40	94,80	74,10	62,28	53,30	33,50	23,70	14,00	7,03	3,52

Fuente: elaboración propia.

5. TÉCNICAS ESTADÍSTICAS UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS

5.1. Parámetros estadísticos

Las funciones de distribución brindan información muy completa acerca de un experimento aleatorio, sin embargo, a veces resulta necesario describir la distribución estadística mediante valores representativos, llamados también características de la distribución o parámetros estadísticos, los cuales son: momentos, de posición, de dispersión, de asimetría, de aplanamiento y estimadores.

5.1.1. De posición (valor medio)

El parámetro estadístico de posición es un valor en el eje de las abscisas que determina un punto central de la función, alrededor del cual se distribuyen todos sus demás valores.

Entre los parámetros de posición que se usan frecuentemente está el valor medio, que se define como la abscisa del centro de gravedad de la función de frecuencia y coincide con el momento de primer orden con respecto al origen.

5.1.2. De dispersión (desviación estándar)

La dispersión es un parámetro estadístico que indica la medida en que se distribuye la variable aleatoria alrededor del valor de posición. En otras palabras es el grado de repetitividad de los resultados de un experimento aleatorio. Las

principales medidas de dispersión son la desviación estándar y el recorrido intercuartílico.

Cuando se utiliza el valor medio como parámetro de posición es necesario utilizar la desviación estándar como parámetro de dispersión. Siendo su valor la raíz cuadrada del momento central de segundo orden:

$$S = \sqrt{\mu_2}$$

Siendo la expresión que define al momento central de segundo orden:

$$\mu_2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m)^2 f(x) dx$$

5.1.3. De asimetría (coeficiente de asimetría relativa)

El cálculo de la asimetría permite evaluar la medida en que una función de frecuencia se aparta de la simetría perfecta, caso para el cual este parámetro es nulo. Una larga cola para valores crecientes de la variable aleatoria significa un alto valor positivo de asimetría, mientras que un valor negativo indica lo opuesto.

El parámetro de coeficiente de asimetría relativa se basa en el hecho de que todos los momentos centrales de orden impar son nulos para distribuciones simétricas, tomando el momento central de tercer orden dividido por el cubo de la desviación estándar para dar origen a un coeficiente adimensional, representado por la siguiente expresión:

$$\gamma_1 = \frac{\mu_3}{s^3}$$

5.1.4. De aplanamiento

El parámetro estadístico de aplanamiento se basa en el momento central de cuarto orden, al que se le divide por la cuarta potencia de la desviación estándar, para dar origen a un parámetro adimensional que refleje el grado en que una función de frecuencia resulta achatada en sus valores centrales.

La función de frecuencia normal o de Gauss normalizada tiene un valor medio, mediana, modo y coeficiente de asimetría nulos y desviación estándar unitaria. Si se aplica la definición anterior, la función de frecuencia normal resulta un coeficiente de aplanamiento o kurtosis igual a tres. Con el objeto de llevarlo a cero, se le restan tres unidades al mencionado valor para así obtener el coeficiente de exceso:

$$\gamma_2 = \frac{\mu_4}{s^2} - 3$$

Una función con $\gamma_2 < 0$ se denomina platocúrtica, mientras que una función con $\gamma_2 > 0$ se denomina leptocúrtica.

5.2. Distribuciones teóricas

Para establecer un modelo matemático debe tenerse el conocimiento de la distribución de probabilidades para todos los valores de la variable aleatoria x . Es útil conocer la probabilidad de que la variable tome un valor menor o igual al nivel de referencia X , dicha situación se expresa según la siguiente notación, siendo $F(x)$ la función de distribución de la variable aleatoria x :

$$F(x) = p(x \leq X)$$

Existen varias distribuciones probabilísticas representativas de una serie de experimentos aleatorios que pueden ser descritas con ayuda de expresiones matemáticas correspondientes a distribuciones teóricas, la principal ventaja es que permite aplicar ciertas propiedades de las distribuciones teóricas a los resultados experimentales.

Las funciones teóricas más importantes se originan de un sencillo experimento llamado prueba de Bernoulli. Reciben esta denominación si, en cada ensayo, es posible obtener únicamente dos resultados: favorable y desfavorable y si las probabilidades respectivas se mantienen constantes a lo largo de toda la serie. Si p es la probabilidad de éxito y q la probabilidad de fracaso, resulta:

$$p + q = 1$$

Algunas funciones teóricas son: distribución binomial, distribución de Gumbel, distribución de Poisson, distribución normal, distribución chi cuadrado y distribución gamma.

5.2.1. Distribución Binomial

Para n pruebas de Bernoulli es necesario saber la probabilidad de obtener x éxitos, sin importar el orden en el que aparecen. Puede tomarse como base el caso particular en el cual los x éxitos se obtienen en las primeras x experiencias y los $n - x$ fracasos aparecen posteriormente, en forma consecutiva. Si las pruebas son independientes, puede aplicarse la regla de multiplicación simplificada para el cálculo de la probabilidad P de esta secuencia.

$$P = p^x q^{n-x}$$

Además, tomando en cuenta que deben considerarse todas las posibles series de resultados para el cálculo correcto de la probabilidad buscada, ésta será igual a la suma de todos los casos individuales debido a que las secuencias son mutuamente excluyentes. En consecuencia, la función de frecuencia de la distribución binomial estará dada por la multiplicación entre la expresión anterior y las combinaciones de n elementos tomados de x .

$$f(x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x}$$

Entonces la función de la distribución binomial está dada por la siguiente expresión:

$$F(x) = \sum_{i=1}^x \binom{n}{i} p^i q^{n-i}$$

En conclusión los principales parámetros estadísticos de la distribución binomial son:

$$m = np$$

$$S = \sqrt{npq}$$

$$\gamma_1 = \frac{q - p}{\sqrt{npq}}$$

$$\gamma_2 = \frac{1 - 6pq}{npq}$$

5.2.2. Distribución Normal

También llamada distribución de Gauss, es una distribución de tipo continuo y una aproximación de la distribución binomial, donde se considera una serie grande de repeticiones del experimento aleatorio, sin imponer restricciones respecto al valor de probabilidad.

La función de frecuencia normal o de Gauss, se representa con la siguiente expresión:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

Gráficamente tiene la forma de una campana simétrica con respecto al origen y puntos de inflexión en ± 1 . De tal modo que el valor medio, el modo y la mediana coinciden, siendo nulos. Siendo la función de distribución normal la siguiente:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

Antes de llegar a dicha expresión se da la normalización que consiste en aplicar a la variable aleatoria original la transformación lineal siguiente:

$$z = \frac{x - m}{s}$$

La transformación anterior se conoce como variable normalizada, las definiciones de valor medio y desviación estándar dan como resultado los valores siguientes:

$$m(z) = 0$$

$$S(z) = 1$$

En conclusión los parámetros estadísticos referidos a una variable normalizada z , son: valor medio, coeficiente de asimetría relativa y aplanamiento nulos y desviación estándar unitaria.

$$m = 0$$

$$s = 1$$

$$\gamma_1 = 0$$

$$\gamma_2 = 0$$

El área debajo de la curva de frecuencia normal en un intervalo simétrico con respecto al origen crece rápidamente hacia la unidad al incrementarse dicho intervalo.

5.3. Distribuciones extremas

Cuando de una población cualquiera se toman n muestras de m elementos cada una, los valores medios se distribuyen normalmente alrededor de la gran media. Sin embargo, si en lugar de considerar los valores medios se tienen en cuenta los valores máximos o mínimos de cada muestra, la distribución no será normal sino que responderá a otra función distinta, para lo cual debe utilizarse la teoría de las distribuciones extremas.

5.3.1. Probabilidad

Para un experimento aleatorio que arroje un conjunto de valores favorables a sobre un total de resultados c , existirá una probabilidad igual al cociente:

$$p = \frac{a}{c}$$

Si se repite el mismo experimento un número elevado de veces, todos los casos posibles tenderán a presentarse en una cantidad proporcional a su probabilidad, pudiéndose ejecutar n veces el mismo experimento si aparecen f casos favorables, la relación f/n será aproximadamente igual a la probabilidad de ocurrencia del suceso, existirá una probabilidad igual a:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{f}{n} = \frac{a}{c} = p$$

Donde f es la frecuencia del suceso y f/n es su razón frecuencial.

La definición clásica torna dificultoso determinar si los casos posibles son o no igualmente probables, dando lugar a controversias que fueron solucionándose a medida que se profundizó en la teoría de probabilidades.

Actualmente se tiende a la creación de modelos matemáticos que permitan explicar los fenómenos probabilísticos. De tal modo puede postularse la existencia de un número p , que por definición es la probabilidad matemática del suceso en estudio, siendo la razón frecuencial o frecuencia relativa f/n una medida experimental de la misma.

5.3.2. Período de retorno

Para un experimento aleatorio es conveniente referirse a probabilidades de ocurrencia. Sin embargo, cuando la variable aleatoria considerada es una magnitud relacionada con algún fenómeno natural como caudales, precipitación, velocidades de viento, etc., es conveniente a referirse a períodos de retorno. Si p es la probabilidad de que una variable x supere un valor dado X en un cierto lapso, el período de retorno T representará el número de unidades de tiempo que transcurrirán en promedio entre dos oportunidades en que la variable iguale o supere dicho valor, es decir:

$$p = P(x \geq X) = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Por lo tanto, es equivalente especificar un período de retorno de 100 años o una probabilidad anual de 0,01.

En el caso de intensidades máximas el período de retorno (T) puede describirse como el tiempo (en años) que probablemente transcurrirá para que la variable aleatoria x se repita o sea mayor.

El análisis estadístico consiste en hallar la función que mejor represente el comportamiento de la variable aleatoria x , para luego asignar a cada valor X una probabilidad o un período de recurrencia. Si $\Phi(x)$ es la función de distribución, entonces:

$$p = 1 - \Phi(x) \quad (2)$$

5.3.3. Distribución de Gumbel

Es una de las funciones de distribución más empleadas en Hidrología junto a la función de Fréchet, función de Pearson tipo III y la función de Galton.

Una de sus características principales es que puede aplicarse la ley de valores extremos tipo I (Gumbel) si la función de distribución inicial converge hacia una exponencial, para x tendiendo a infinito y su expresión matemática es:

$$\Phi(y) = e^{-e^{-y}} \quad (3)$$

Siendo y la variable reducida de Gumbel que es, a su vez, la función lineal de la variable aleatoria original x .

$$y = \alpha_0(x - u_0)$$

Otra de sus características es que el campo de variación de x se extiende entre $-\infty$ y $+\infty$. Las constantes α_0 y u_0 se determinan de los datos para lograr su adecuado ajuste. Los parámetros estadísticos como el valor medio y la desviación estándar de la variable reducida son fijos e independientes de la muestra.

$$\bar{y} = \gamma$$

$$\sigma_y = \frac{\pi}{\sqrt{6}}$$

Siendo γ la constante de Euler, definida por la siguiente expresión:

$$\gamma = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{i} - \ln n \right) = 0,577 \dots$$

Tomando en cuenta que entre las variables x y y existe relación lineal pueden calcularse tanto el valor medio como la desviación estándar para la variable aleatoria original y comprobar la validez de la siguiente igualdad:

$$k = \frac{x - \bar{x}}{\sigma_x} = \frac{y - \bar{y}}{\sigma_y}$$

Despejando y de la ecuación (3), se obtiene como resultado la relación k - T para una distribución Gumbel. Si se tiene en cuenta la vinculación existente entre la función de distribución y el período de retorno se obtiene la siguiente expresión:

$$k = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \left[\gamma + \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \right]$$

Otro aspecto importante es la tendencia asintótica de la función de distribución cuando el T tiende al infinito, dado que el objetivo primordial del análisis estadístico es predecir el comportamiento de la variable aleatoria en estudio para grandes períodos de retorno.

Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (2), e igualando luego con la ecuación (1), se obtiene la siguiente expresión:

$$y = \ln \frac{1}{\ln \frac{T}{T-1}} \quad (4)$$

Desarrollando en serie la función $e^{-\frac{1}{T}}$ para T tendiendo a infinito, se obtiene la siguiente aproximación:

$$\frac{1}{T} \approx \ln \frac{T}{T-1} \quad (5)$$

Sustituyendo la ecuación (5) en la ecuación (4), se obtiene la siguiente expresión, válida para grandes períodos de recurrencia:

$$y \approx \ln T$$

Finalmente, la expresión completa tiene la siguiente forma:

$$u = u_0 + \frac{1}{\alpha_0} \ln T$$

Es decir, que el valor para la variable de interés predicho por Gumbel crece, aproximadamente, con el logaritmo del período de retorno. Finalmente la tabla II relaciona la probabilidad, período de retorno y la variable reducida.

Tabla II. **Función de Gumbel, variable reducida y período de retorno**

Probabilidad (p)	Período de retorno (T)	Variable reducida (y)
0,500	2	0,37
0,200	5	1,50
0,100	10	2,25
0,050	20	2,97
0,020	50	3,90
0,010	100	4,60
0,005	200	5,30
0,002	500	6,21
0,001	1 000	6,91

Fuente: MAGGIO, G.E. Análisis estadístico de valores extremos. p.28.

6. CÁLCULO Y PRESENTACIÓN GRÁFICA DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA

Para aplicar el análisis de frecuencias deben calcularse los parámetros estadísticos requeridos por las funciones de distribución Normal y de Gumbel, es decir, parámetros estadísticos como el valor medio, desviación estándar y las constantes α y μ , dichos parámetros son obtenidos del resumen multianual de intensidades de lluvia máxima y son definidas con las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S$$

$$\mu = m - 0,45S$$

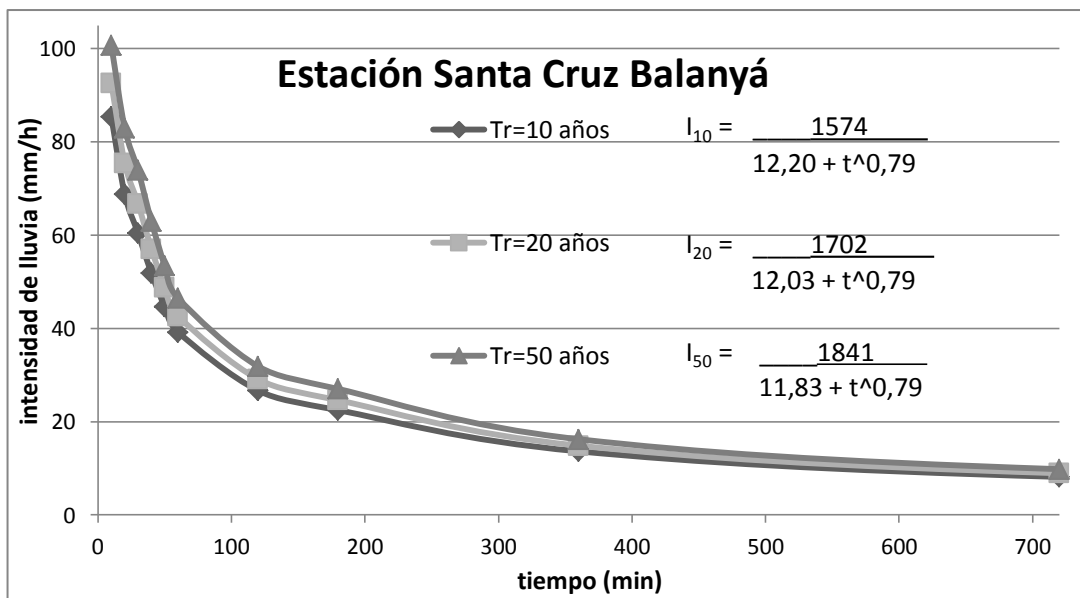
Del cálculo anterior se obtuvieron los valores de probabilidad de intensidad de lluvia máxima, para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 75 y 100 años. Y para cada período de retorno duraciones de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 360, 720 y 1 440 minutos, dando como resultado final una familia de curvas de intensidad-duración-frecuencia para cada estación climatológica. A continuación, se presentan los valores de las intensidades máximas de lluvia resultantes del cálculo de distribuciones de frecuencias Normal y de Gumbel, y la representación gráfica de dichos valores.

Tabla III. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Santa Cruz Balanyá**

Distribución Normal												
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)											
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'	
2	59,95	45,28	38,08	33,34	30,07	27,10	18,05	14,89	9,32	5,39	2,87	
5	76,64	60,71	52,75	45,48	39,66	35,04	23,70	19,86	12,15	7,20	3,99	
10	85,37	68,78	60,42	51,82	44,67	39,19	26,65	22,45	13,63	8,14	4,57	
15	89,72	72,81	64,25	54,99	47,17	41,26	28,12	23,74	14,37	8,62	4,86	
20	92,58	75,45	66,76	57,06	48,81	42,62	29,09	24,59	14,85	8,93	5,05	
25	94,67	77,39	68,60	58,59	50,01	43,62	29,80	25,21	15,21	9,15	5,19	
30	96,32	78,92	70,05	59,79	50,96	44,40	30,36	25,70	15,49	9,33	5,30	
50	100,69	82,95	73,89	62,96	53,46	46,48	31,83	27,00	16,22	9,81	5,60	
75	103,91	85,93	76,72	65,30	55,31	48,01	32,93	27,96	16,77	10,16	5,81	
100	106,09	87,95	78,64	66,89	56,57	49,05	33,66	28,61	17,14	10,39	5,96	

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Curvas IDF de la estación climática Santa Cruz Balanyá, utilizando la distribución de frecuencias Normal**



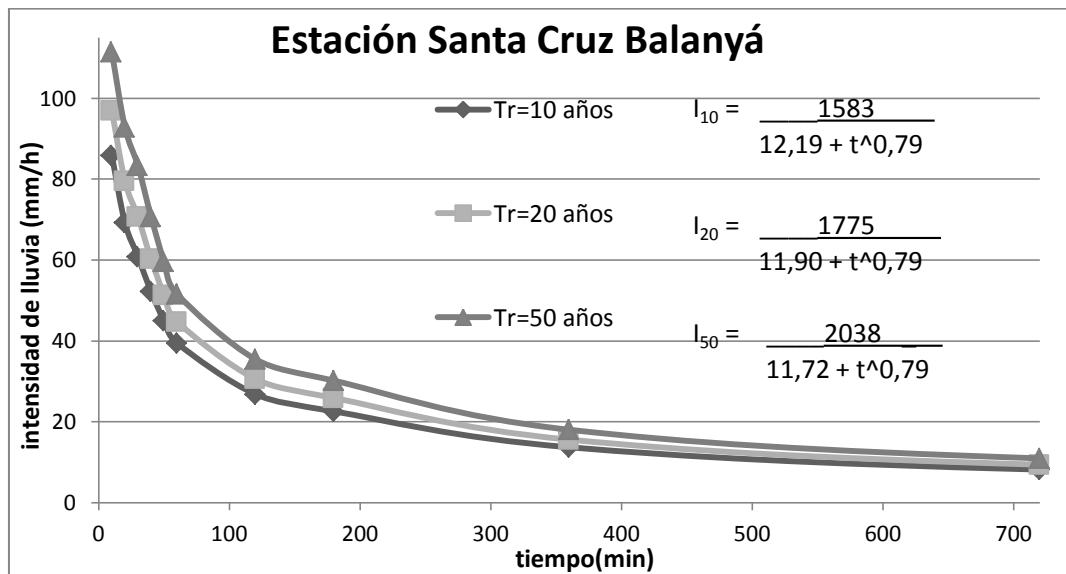
Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Santa Cruz Balanyá

Distribución de Gumbel											
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	56,69	42,26	35,22	30,97	28,20	25,55	16,94	13,93	8,77	5,03	2,65
5	74,22	58,47	50,63	43,71	38,27	33,89	22,88	19,14	11,74	6,93	3,83
10	85,83	69,21	60,83	52,15	44,93	39,41	26,81	22,58	13,71	8,19	4,60
15	92,37	75,26	66,58	56,92	48,69	42,52	29,02	24,53	14,82	8,90	5,04
20	96,96	79,50	70,61	60,25	51,32	44,70	30,57	25,89	15,59	9,40	5,35
25	100,49	82,77	73,71	62,82	53,35	46,38	31,77	26,94	16,19	9,78	5,58
30	103,36	85,42	76,24	64,91	55,00	47,75	32,74	27,80	16,68	10,10	5,78
50	111,37	92,83	83,27	70,73	59,60	51,56	35,45	30,18	18,03	10,96	6,31
75	117,69	98,67	88,83	75,32	63,23	54,57	37,59	32,05	19,10	11,65	6,73
100	122,17	102,81	92,76	78,58	65,80	56,69	39,10	33,38	19,86	12,14	7,03

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Curvas IDF de la estación climática Santa Cruz Balanyá, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel



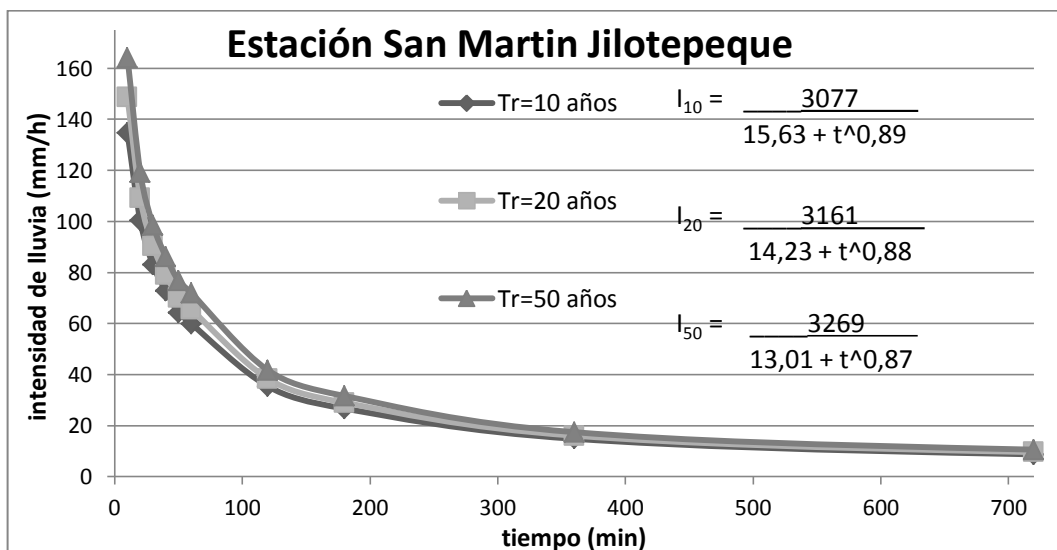
Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática San Martín Jilotepeque**

Período de retorno/ Duración	Distribución Normal										
	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	85,80	68,91	57,22	50,37	43,62	39,87	24,91	18,46	10,54	5,68	2,89
5	117,91	89,52	74,13	65,08	57,16	53,00	31,79	23,86	13,37	7,71	4,03
10	134,69	100,29	82,98	72,77	64,24	59,87	35,39	26,69	14,85	8,76	4,63
15	143,07	105,67	87,39	76,61	67,77	63,29	37,19	28,10	15,59	9,29	4,92
20	148,55	109,19	90,28	79,12	70,09	65,54	38,36	29,02	16,08	9,63	5,12
25	152,59	111,78	92,41	80,97	71,79	67,19	39,23	29,70	16,43	9,89	5,26
30	155,76	113,82	94,08	82,42	73,13	68,49	39,91	30,23	16,71	10,09	5,37
50	164,15	119,20	98,50	86,27	76,67	71,92	41,71	31,64	17,45	10,62	5,67
75	170,35	123,18	101,77	89,11	79,29	74,46	43,04	32,69	18,00	11,01	5,89
100	174,55	125,88	103,98	91,03	81,06	76,17	43,94	33,39	18,37	11,27	6,04

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Curvas IDF de la estación climática San Martín Jilotepeque, utilizando la distribución de frecuencias Normal**



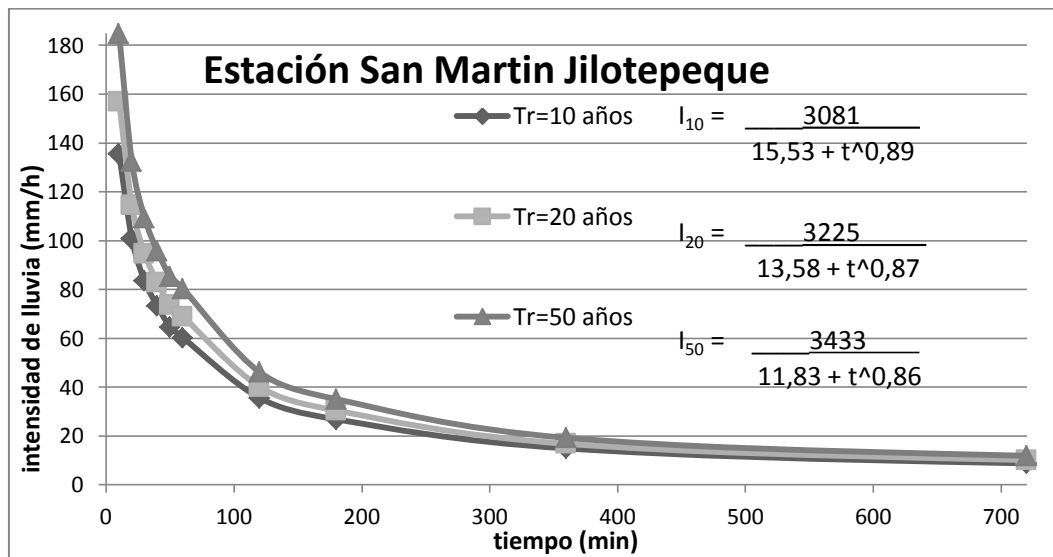
Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática San Martín Jilotepeque

Distribución de Gumbel											
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	79,53	64,89	53,91	47,49	40,97	37,31	23,57	17,40	9,99	5,29	2,67
5	113,25	86,53	71,68	62,94	55,20	51,10	30,80	23,08	12,96	7,41	3,87
10	135,57	100,86	83,44	73,17	64,61	60,23	35,58	26,83	14,93	8,82	4,66
15	148,16	108,94	90,08	78,94	69,93	65,38	38,28	28,95	16,04	9,61	5,10
20	156,98	114,60	94,72	82,98	73,65	68,99	40,17	30,44	16,82	10,17	5,41
25	163,77	118,96	98,30	86,09	76,51	71,76	41,63	31,58	17,42	10,59	5,65
30	169,30	122,51	101,21	88,63	78,84	74,02	42,81	32,51	17,91	10,94	5,85
50	184,70	132,39	109,33	95,68	85,34	80,32	46,11	35,10	19,27	11,91	6,39
75	196,86	140,20	115,73	101,25	90,47	85,30	48,72	37,15	20,34	12,68	6,83
100	205,46	145,72	120,27	105,20	94,10	88,82	50,56	38,60	21,10	13,22	7,13

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Curvas IDF de la estación climática San Martín Jilotepeque, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel



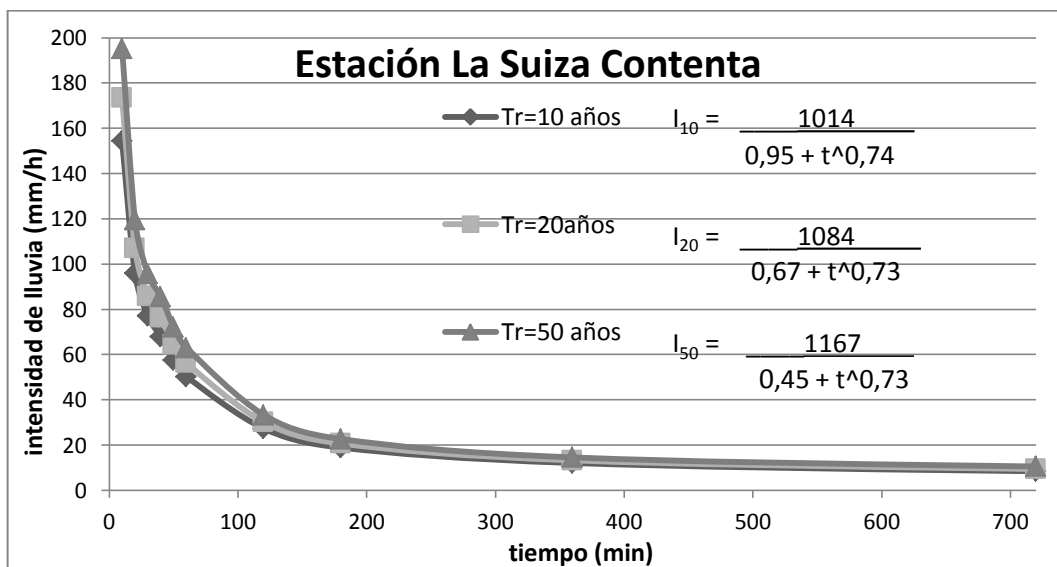
Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática La Suiza Contenta

Distribución Normal											
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	86,45	56,88	46,06	38,57	33,31	29,10	17,39	12,59	8,00	4,95	2,60
5	131,02	82,53	66,43	57,87	49,25	43,00	23,92	16,71	10,68	7,23	4,05
10	154,33	95,94	77,07	67,96	57,58	50,27	27,33	18,86	12,08	8,42	4,80
15	165,96	102,63	82,39	72,99	61,73	53,89	29,04	19,93	12,77	9,02	5,18
20	173,57	107,01	85,87	76,29	64,45	56,27	30,15	20,64	13,23	9,41	5,43
25	179,18	110,24	88,43	78,72	66,46	58,01	30,97	21,15	13,57	9,70	5,61
30	183,58	112,77	90,44	80,62	68,03	59,39	31,62	21,56	13,83	9,92	5,75
50	195,23	119,47	95,76	85,66	72,19	63,02	33,32	22,64	14,53	10,52	6,13
75	203,84	124,43	99,70	89,39	75,27	65,71	34,59	23,43	15,05	10,96	6,41
100	209,67	127,78	102,36	91,92	77,36	67,52	35,44	23,97	15,40	11,26	6,60

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Curvas IDF de la estación climática La Suiza Contenta, utilizando la distribución de frecuencias Normal



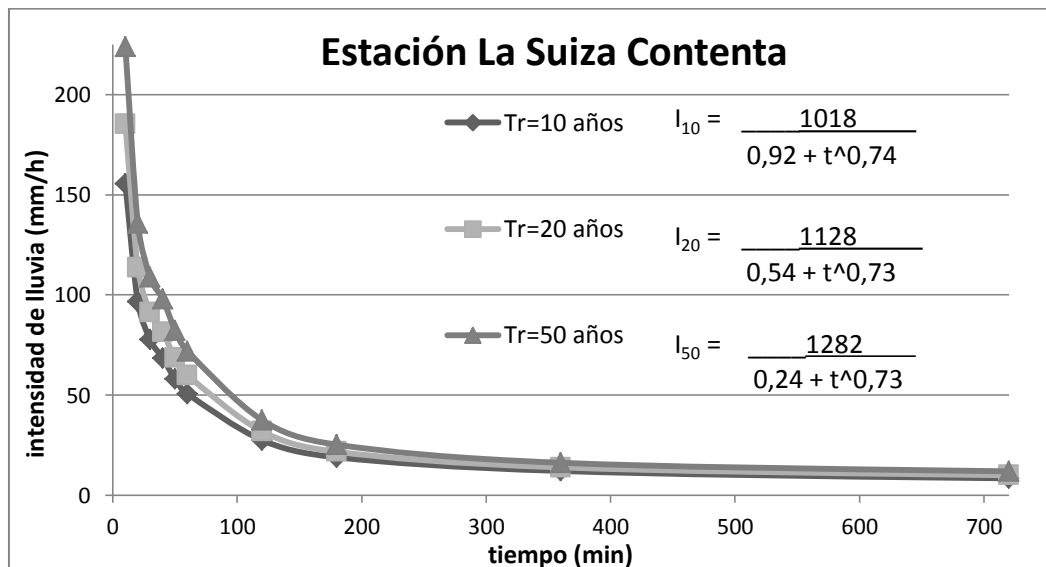
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática La Suiza Contenta**

Distribución de Gumbel											
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	77,75	51,88	42,09	34,81	30,20	26,39	16,11	11,79	7,48	4,50	2,32
5	124,56	78,81	63,47	55,07	46,94	40,98	22,97	16,11	10,29	6,90	3,84
10	155,55	96,64	77,63	68,49	58,01	50,65	27,51	18,97	12,15	8,49	4,84
15	173,03	106,70	85,62	76,06	64,26	56,10	30,07	20,59	13,20	9,38	5,41
20	185,28	113,75	91,21	81,36	68,64	59,92	31,87	21,72	13,93	10,01	5,81
25	194,71	119,17	95,52	85,44	72,01	62,86	33,25	22,59	14,50	10,49	6,11
30	202,38	123,59	99,03	88,76	74,75	65,25	34,37	23,30	14,96	10,89	6,36
50	223,76	135,89	108,79	98,01	82,39	71,91	37,50	25,27	16,24	11,98	7,05
75	240,64	145,60	116,51	105,32	88,43	77,18	39,98	26,83	17,26	12,85	7,60
100	252,59	152,48	121,97	110,50	92,70	80,91	41,73	27,93	17,97	13,46	7,99

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. **Curvas IDF de la estación climática La Suiza Contenta, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel**



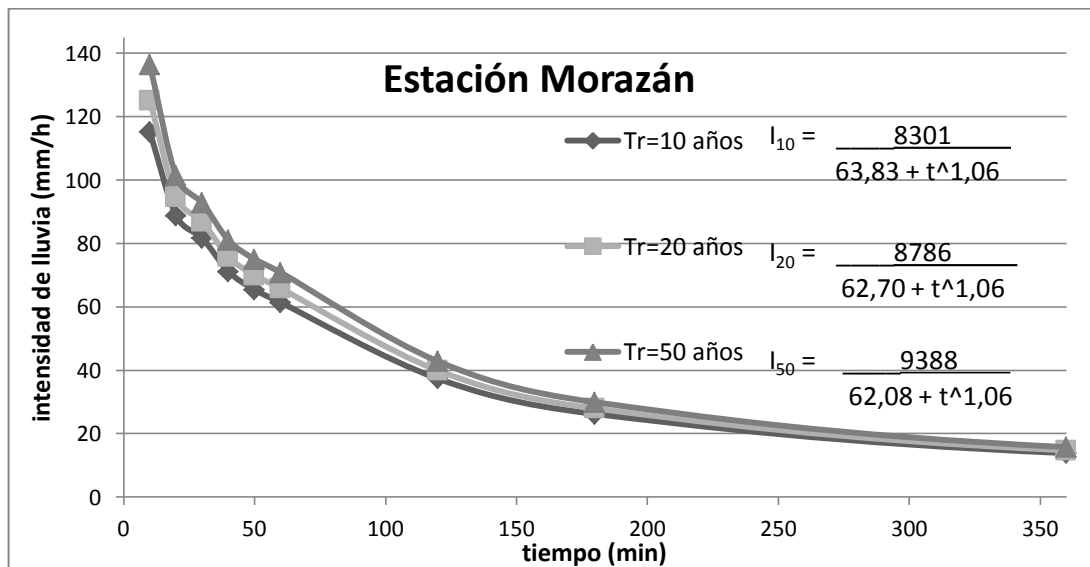
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Morazán**

Distribución Normal											
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	79,77	68,05	63,21	54,81	49,37	45,59	28,30	20,07	10,70	5,54	2,84
5	102,96	81,67	75,33	65,54	59,88	55,92	34,25	24,11	12,77	6,50	3,33
10	115,08	88,79	81,67	71,15	65,37	61,33	37,36	26,22	13,86	7,00	3,59
15	121,13	92,34	84,83	73,95	68,12	64,02	38,91	27,27	14,40	7,25	3,72
20	125,09	94,67	86,90	75,79	69,91	65,79	39,93	27,96	14,75	7,42	3,81
25	128,01	96,38	88,42	77,14	71,23	67,09	40,68	28,47	15,01	7,54	3,87
30	130,30	97,73	89,62	78,20	72,27	68,11	41,26	28,87	15,21	7,63	3,92
50	136,36	101,28	92,79	81,00	75,02	70,81	42,82	29,92	15,76	7,88	4,05
75	140,84	103,91	95,13	83,08	77,05	72,81	43,97	30,70	16,16	8,07	4,14
100	143,87	105,69	96,71	84,48	78,42	74,16	44,74	31,23	16,43	8,19	4,21

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Curvas IDF de la estación climática Morazán, utilizando la distribución de frecuencias Normal**



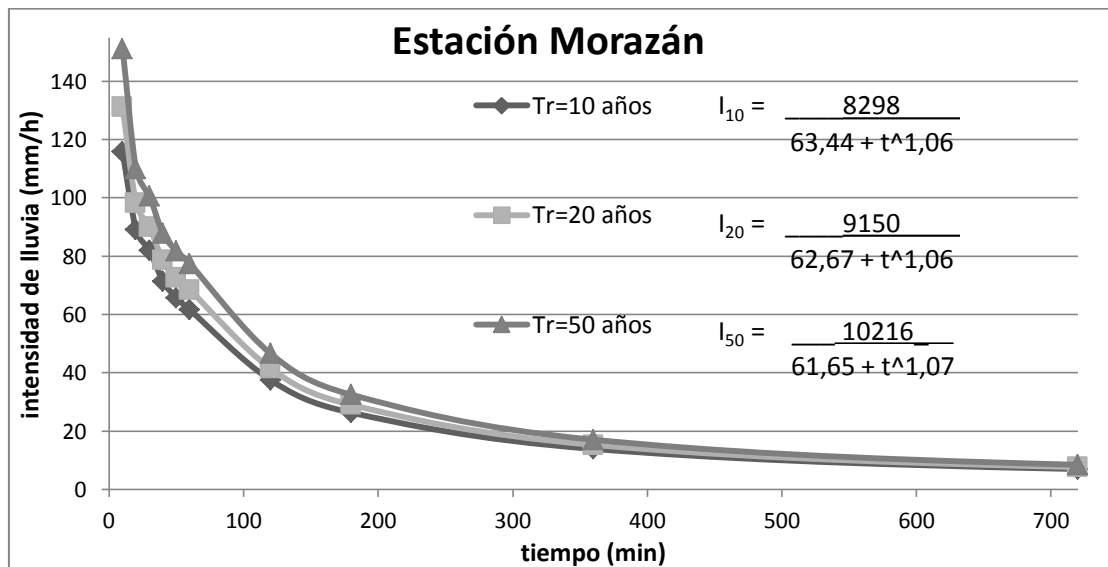
Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Morazán**

Período de retorno/ Duración	Distribución de Gumbel										
	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	75,24	65,40	60,85	52,71	47,32	43,57	27,14	19,28	10,30	5,36	2,74
5	99,59	79,69	73,57	63,98	58,36	54,42	33,39	23,52	12,47	6,36	3,26
10	115,72	89,16	82,00	71,45	65,66	61,61	37,52	26,33	13,91	7,03	3,61
15	124,81	94,50	86,75	75,66	69,78	65,66	39,86	27,91	14,72	7,40	3,80
20	131,18	98,24	90,08	78,60	72,67	68,50	41,49	29,02	15,29	7,67	3,93
25	136,09	101,12	92,64	80,88	74,89	70,69	42,75	29,88	15,73	7,87	4,04
30	140,08	103,47	94,73	82,72	76,70	72,47	43,77	30,57	16,09	8,03	4,12
50	151,20	110,00	100,54	87,87	81,74	77,42	46,62	32,51	17,08	8,49	4,36
75	159,98	115,16	105,13	91,94	85,72	81,34	48,88	34,04	17,87	8,86	4,55
100	166,20	118,81	108,38	94,82	88,54	84,11	50,47	35,12	18,42	9,11	4,68

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. **Curvas IDF de la estación climática Morazán, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel**



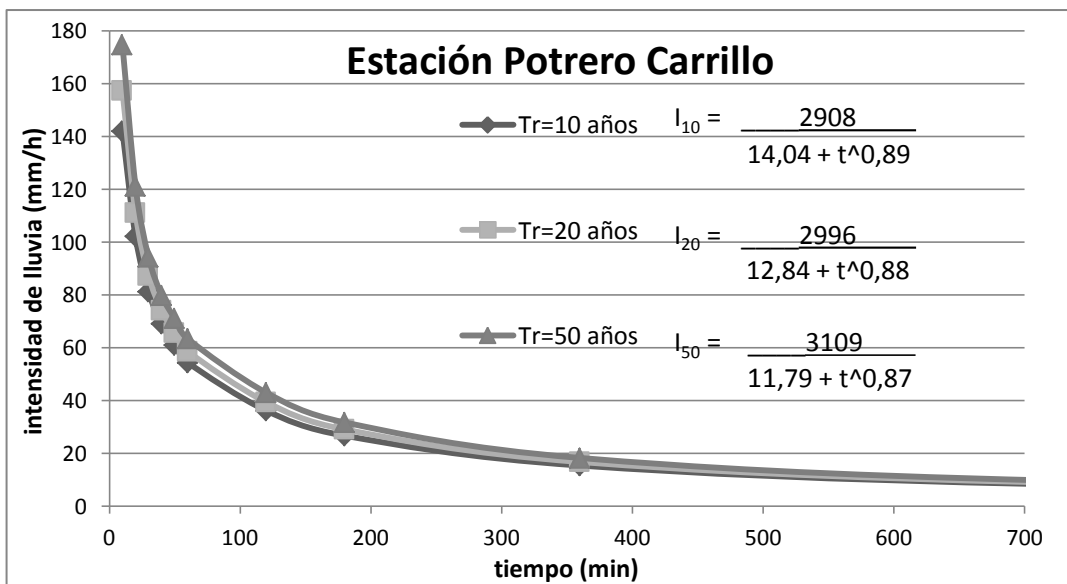
Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Potrero Carrillo**

Distribución Normal											
Periodo de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	88,00	70,44	59,33	51,04	44,53	39,51	24,91	18,32	10,61	5,92	3,00
5	123,53	91,25	73,64	62,84	55,39	49,28	32,32	23,81	13,75	7,47	3,80
10	142,10	102,12	81,13	69,00	61,06	54,38	36,18	26,69	15,39	8,28	4,22
15	151,37	107,55	84,86	72,08	63,89	56,93	38,12	28,12	16,20	8,69	4,43
20	157,44	111,11	87,31	74,09	65,74	58,60	39,38	29,06	16,74	8,96	4,57
25	161,91	113,72	89,11	75,58	67,11	59,83	40,31	29,75	17,13	9,15	4,67
30	165,42	115,78	90,52	76,74	68,18	60,79	41,04	30,29	17,44	9,31	4,75
50	174,70	121,22	94,26	79,82	71,02	63,35	42,98	31,72	18,26	9,71	4,96
75	181,57	125,24	97,03	82,10	73,11	65,23	44,41	32,79	18,87	10,01	5,11
100	186,21	127,96	98,90	83,64	74,53	66,51	45,37	33,50	19,28	10,22	5,22

Fuente: elaboración propia.

Figura 26. **Curvas IDF de la estación climática Potrero Carrillo, utilizando la distribución de frecuencias Normal**



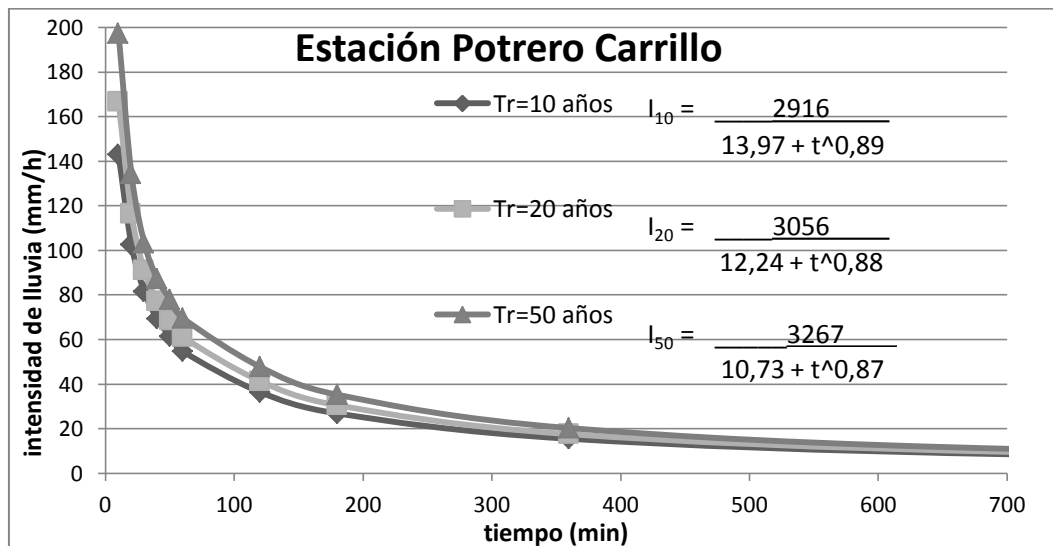
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Potrero Carrillo

Distribución de Gumbel												
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)											
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'	
2	81,07	66,38	56,53	48,74	42,41	37,60	23,47	17,25	10,00	5,61	2,84	
5	118,37	88,23	71,57	61,12	53,81	47,86	31,24	23,02	13,29	7,25	3,68	
10	143,08	102,69	81,52	69,32	61,36	54,65	36,39	26,84	15,47	8,33	4,24	
15	157,01	110,86	87,14	73,95	65,61	58,48	39,29	28,99	16,70	8,94	4,56	
20	166,77	116,57	91,07	77,19	68,59	61,16	41,32	30,50	17,56	9,37	4,78	
25	174,29	120,97	94,10	79,69	70,89	63,23	42,89	31,66	18,23	9,69	4,95	
30	180,40	124,55	96,56	81,72	72,76	64,91	44,16	32,61	18,77	9,96	5,08	
50	197,44	134,53	103,43	87,37	77,96	69,60	47,71	35,24	20,27	10,71	5,47	
75	210,90	142,42	108,85	91,84	82,07	73,30	50,52	37,32	21,46	11,30	5,77	
100	220,42	147,99	112,69	95,00	84,98	75,92	52,50	38,79	22,30	11,71	5,99	

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Curvas IDF de la estación climática Potrero Carrillo, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel



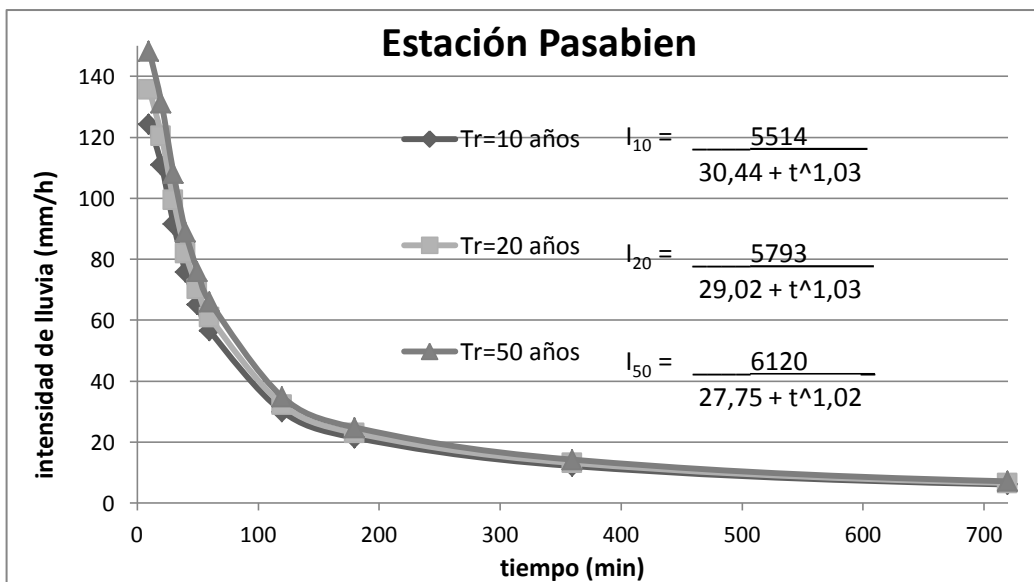
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Pasabien**

Distribución Normal											
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	84,75	77,25	64,25	53,81	47,09	40,65	22,14	15,89	8,67	4,35	2,18
5	110,77	99,39	82,23	68,22	58,90	51,05	27,32	19,53	10,95	5,49	2,75
10	124,37	110,96	91,62	75,75	65,08	56,48	30,03	21,44	12,14	6,09	3,04
15	131,16	116,73	96,31	79,51	68,16	59,20	31,38	22,39	12,74	6,39	3,19
20	135,61	120,51	99,38	81,97	70,18	60,97	32,27	23,01	13,13	6,58	3,29
25	138,88	123,29	101,64	83,78	71,66	62,28	32,92	23,47	13,42	6,72	3,36
30	141,45	125,48	103,42	85,21	72,83	63,31	33,43	23,83	13,64	6,84	3,42
50	148,25	131,26	108,12	88,97	75,92	66,03	34,79	24,78	14,24	7,13	3,57
75	153,28	135,54	111,59	91,75	78,20	68,03	35,79	25,49	14,68	7,35	3,68
100	156,68	138,43	113,94	93,63	79,74	69,39	36,47	25,96	14,98	7,50	3,75

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Curvas IDF de la estación climática Pasabien, utilizando la distribución de frecuencias Normal**



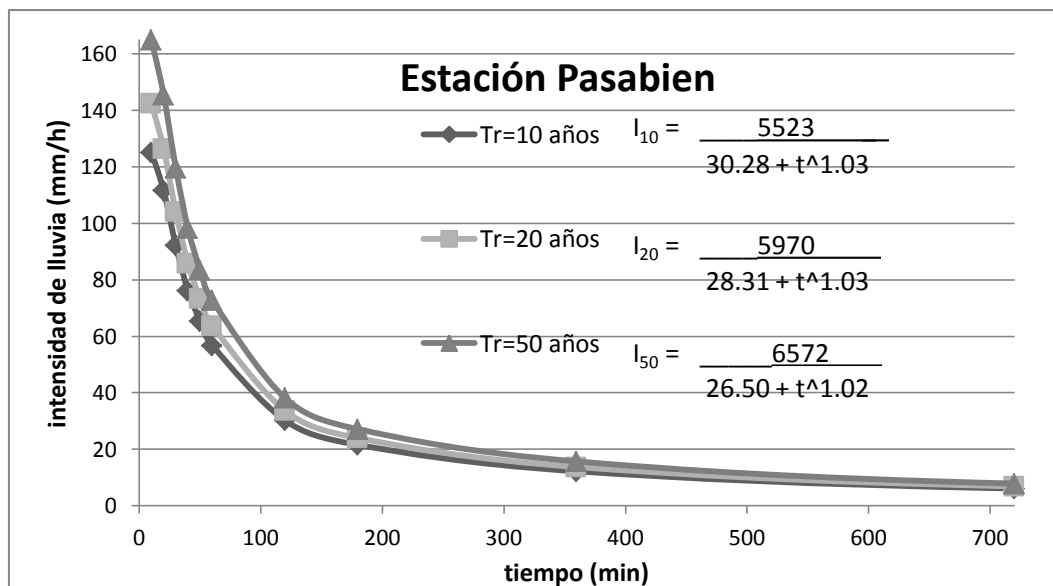
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Pasabien**

Distribución de Gumbel											
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	79,67	72,93	60,74	51,00	44,78	38,62	21,13	15,18	8,22	4,13	2,07
5	107,00	96,17	79,62	66,13	57,19	49,54	26,57	19,01	10,62	5,33	2,66
10	125,09	111,56	92,12	76,14	65,40	56,77	30,18	21,54	12,21	6,12	3,06
15	135,29	120,24	99,17	81,80	70,03	60,85	32,21	22,97	13,10	6,57	3,28
20	142,44	126,32	104,10	85,75	73,28	63,70	33,63	23,97	13,73	6,88	3,44
25	147,94	131,01	107,91	88,80	75,78	65,90	34,73	24,74	14,21	7,12	3,56
30	152,42	134,81	111,00	91,28	77,81	67,69	35,62	25,37	14,60	7,32	3,66
50	164,90	145,43	119,62	98,19	83,48	72,68	38,10	27,11	15,70	7,86	3,93
75	174,76	153,81	126,43	103,64	87,95	76,62	40,07	28,49	16,56	8,29	4,15
100	181,73	159,75	131,25	107,51	91,12	79,41	41,45	29,47	17,18	8,60	4,30

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Curvas IDF de la estación climática Pasabien, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel**



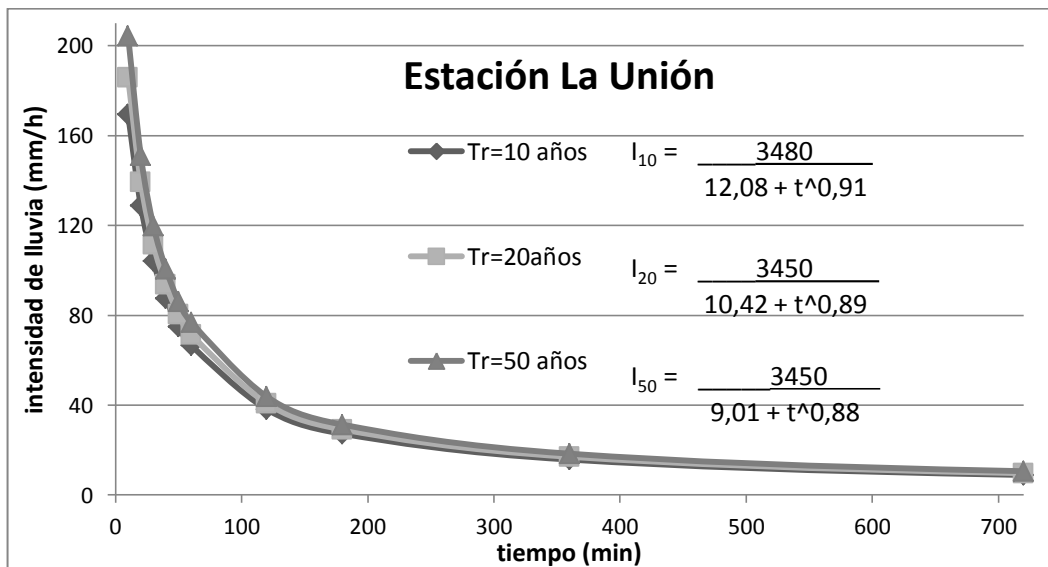
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática La Unión**

Distribución Normal											
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	111,32	91,74	77,79	65,49	56,51	49,54	28,87	20,48	11,41	6,12	3,14
5	149,38	116,10	95,03	79,88	68,65	60,73	34,96	24,92	14,27	7,96	4,14
10	169,28	128,84	104,05	87,40	75,00	66,58	38,15	27,25	15,77	8,92	4,66
15	179,21	135,19	108,55	91,15	78,17	69,49	39,74	28,41	16,51	9,40	4,92
20	185,71	139,36	111,49	93,61	80,24	71,41	40,78	29,16	17,00	9,71	5,09
25	190,50	142,42	113,66	95,42	81,77	72,81	41,55	29,72	17,36	9,94	5,21
30	194,26	144,83	115,36	96,84	82,97	73,92	42,15	30,16	17,64	10,12	5,31
50	204,20	151,19	119,87	100,60	86,14	76,84	43,74	31,32	18,39	10,60	5,57
75	211,56	155,90	123,20	103,38	88,49	79,00	44,92	32,18	18,94	10,96	5,76
100	216,53	159,09	125,45	105,26	90,07	80,46	45,72	32,76	19,32	11,20	5,89

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Curvas IDF de la estación climática La Unión, utilizando la distribución de frecuencias Normal**



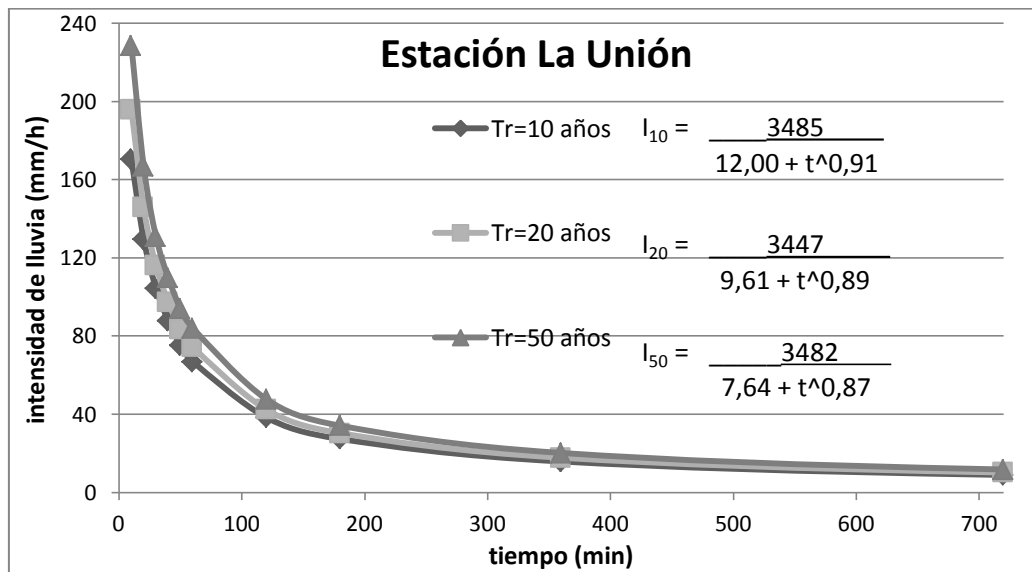
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática La Unión**

Distribución de Gumbel											
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	103,89	86,98	74,42	62,69	54,14	47,36	27,68	19,61	10,85	5,76	2,95
5	143,86	112,57	92,53	77,79	66,89	59,11	34,08	24,28	13,86	7,69	3,99
10	170,32	129,51	104,52	87,79	75,33	66,88	38,32	27,37	15,84	8,97	4,68
15	185,25	139,06	111,28	93,44	80,09	71,27	40,71	29,11	16,97	9,69	5,07
20	195,70	145,75	116,02	97,39	83,43	74,34	42,38	30,33	17,75	10,19	5,35
25	203,76	150,91	119,67	100,43	86,00	76,71	43,67	31,27	18,36	10,58	5,56
30	210,31	155,10	122,63	102,91	88,09	78,63	44,72	32,04	18,85	10,90	5,73
50	228,56	166,79	130,90	109,80	93,91	84,00	47,64	34,17	20,22	11,78	6,20
75	242,98	176,01	137,44	115,25	98,51	88,24	49,95	35,85	21,31	12,47	6,58
100	253,18	182,55	142,06	119,11	101,77	91,24	51,59	37,04	22,07	12,97	6,85

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Curvas IDF de la estación climática La Unión, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel**



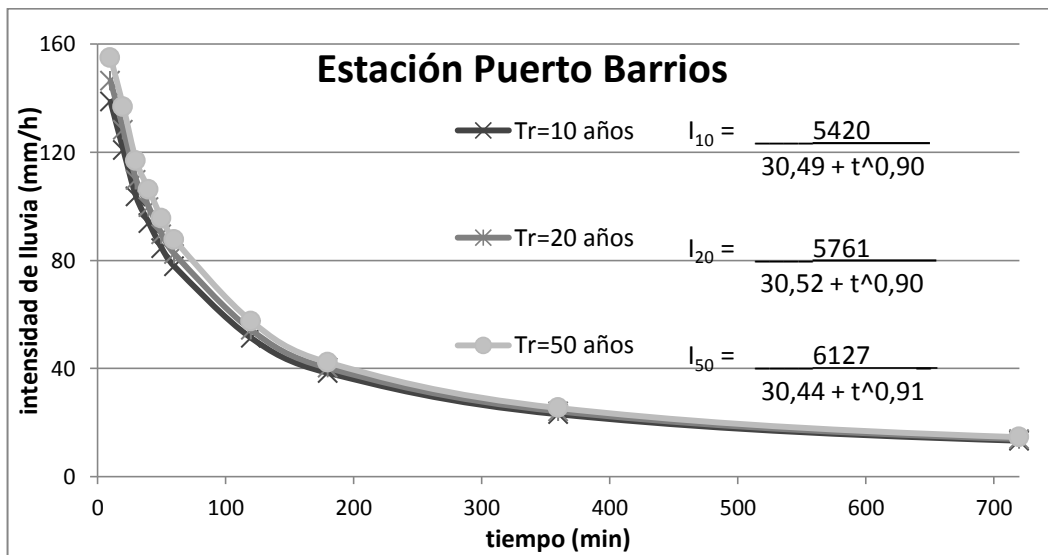
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Puerto Barrios

Distribución Normal											
Período de retorno/ Duración	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	111,53	94,28	81,63	73,38	66,42	61,26	40,89	32,01	19,22	11,10	6,02
5	129,33	111,69	96,03	86,78	78,31	72,04	47,69	36,18	21,75	12,54	6,93
10	138,64	120,79	103,57	93,79	84,52	77,68	51,24	38,36	23,07	13,29	7,41
15	143,29	125,33	107,32	97,28	87,63	80,49	53,01	39,45	23,72	13,66	7,65
20	146,33	128,30	109,79	99,57	89,66	82,33	54,18	40,17	24,15	13,91	7,80
25	148,57	130,49	111,60	101,26	91,15	83,69	55,03	40,69	24,47	14,09	7,92
30	150,33	132,21	113,02	102,58	92,33	84,75	55,70	41,10	24,72	14,23	8,01
50	154,98	136,76	116,79	106,08	95,43	87,57	57,48	42,19	25,38	14,61	8,25
75	158,42	140,12	119,57	108,67	97,73	89,65	58,79	43,00	25,87	14,89	8,42
100	160,75	142,40	121,45	110,42	99,28	91,06	59,68	43,55	26,20	15,08	8,54

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Curvas IDF de la estación climática Puerto Barrios, utilizando la distribución de frecuencias Normal



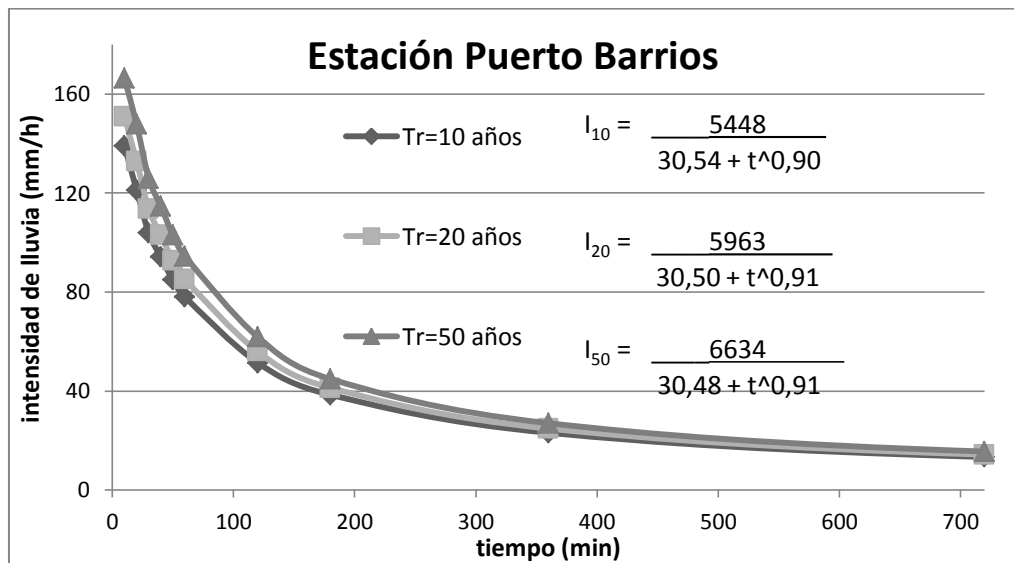
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Probabilidad de intensidad de lluvia en la estación climática Puerto Barrios**

Período de retorno/ Duración	Distribución de Gumbel										
	Precipitación (mm)										
	10'	20'	30'	40'	50'	60'	120'	180'	360'	720'	1440'
2	108,05	90,88	78,82	70,76	64,10	59,16	39,56	31,19	18,73	10,82	5,84
5	126,75	109,16	93,94	84,84	76,59	70,48	46,70	35,58	21,38	12,33	6,80
10	139,13	121,26	103,96	94,15	84,85	77,97	51,43	38,48	23,13	13,33	7,43
15	146,11	128,09	109,61	99,41	89,51	82,20	54,09	40,12	24,12	13,89	7,79
20	151,00	132,87	113,57	103,09	92,78	85,16	55,96	41,26	24,82	14,29	8,04
25	154,77	136,56	116,62	105,92	95,29	87,44	57,40	42,15	25,35	14,59	8,24
30	157,84	139,55	119,10	108,23	97,34	89,30	58,57	42,86	25,78	14,84	8,39
50	166,38	147,90	126,01	114,66	103,04	94,47	61,83	44,87	26,99	15,53	8,83
75	173,12	154,49	131,46	119,73	107,54	98,55	64,40	46,45	27,95	16,08	9,18
100	177,89	159,16	135,33	123,33	110,73	101,44	66,23	47,57	28,63	16,46	9,42

Fuente: elaboración propia.

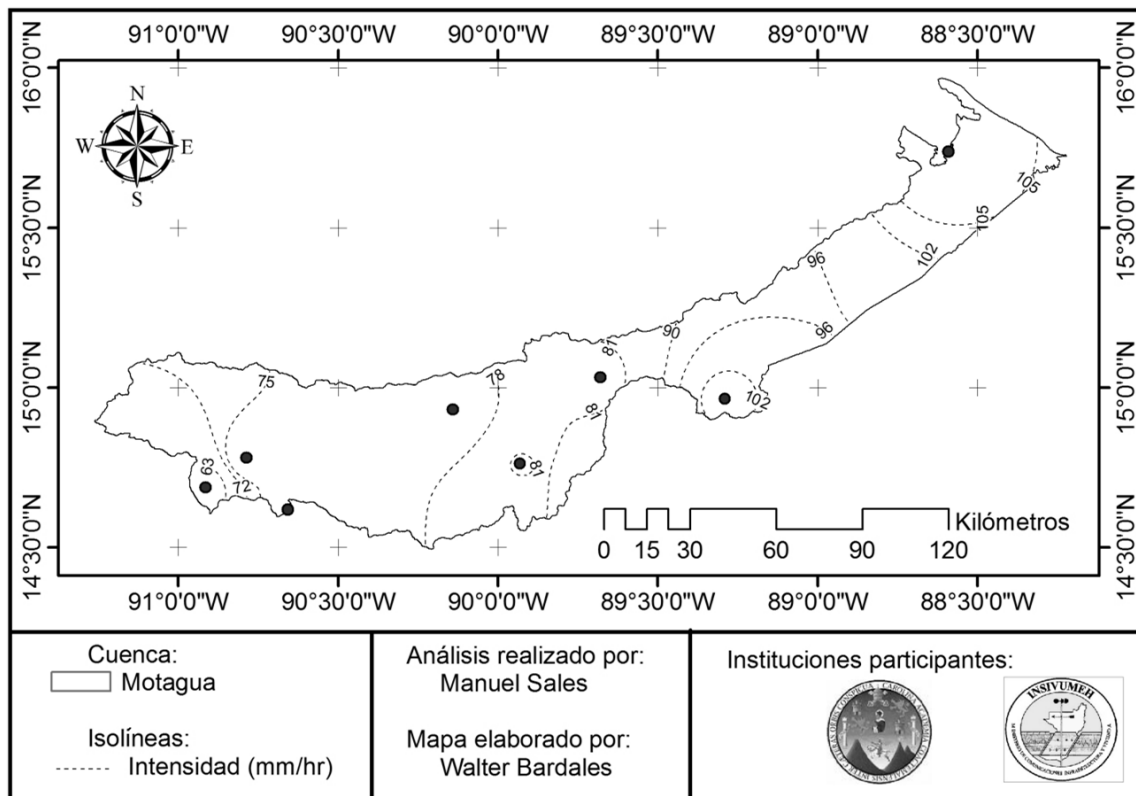
Figura 33. **Curvas IDF de la estación climática Puerto Barrios, utilizando la distribución de frecuencias de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

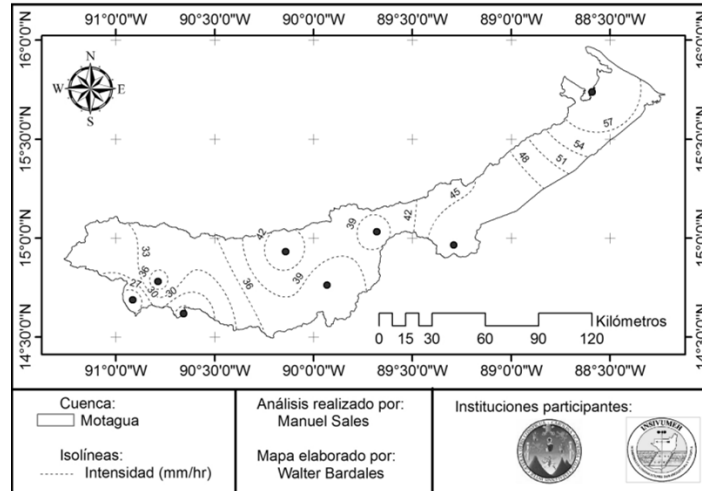
Los valores resultantes del análisis de frecuencia empleando la función de distribución de Gumbel pueden representarse mediante mapas de isólinas de intensidades de lluvia, lo cual facilita comprender el comportamiento de la intensidad de lluvia a lo largo de la cuenca del río Motagua, como se muestra a continuación.

Figura 34. **Mapa de isólinas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 2 años**



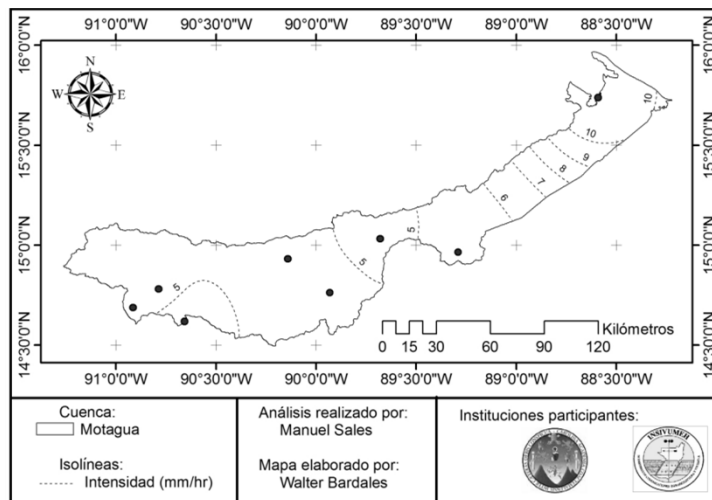
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 35. **Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 2 años**



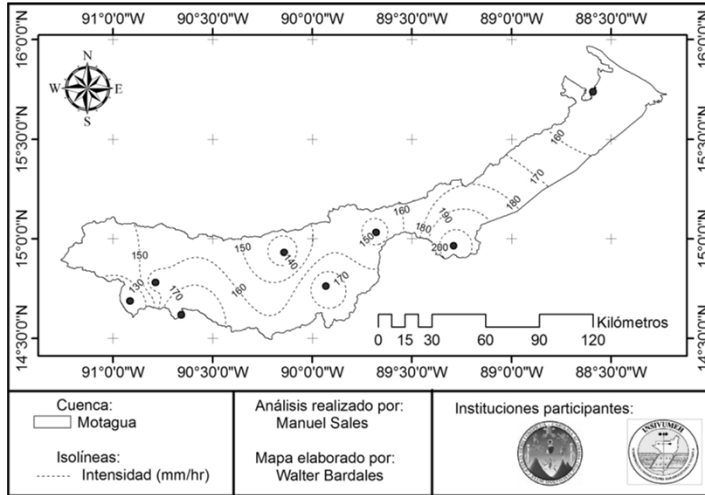
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 36. **Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 2 años**



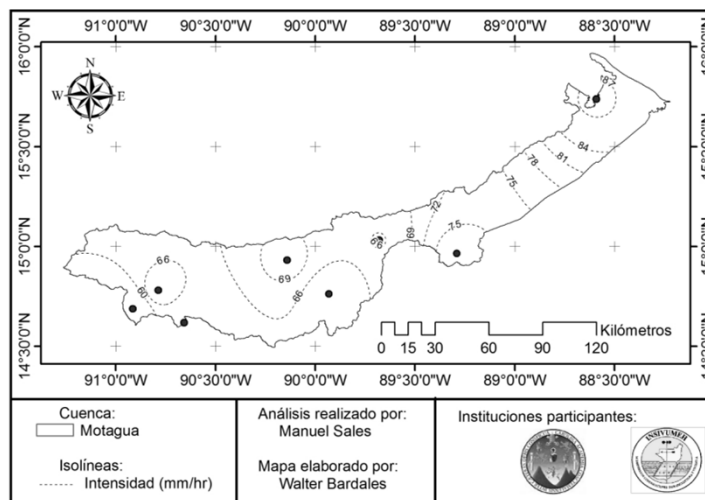
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 37. **Mapa de isólinas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 25 años**



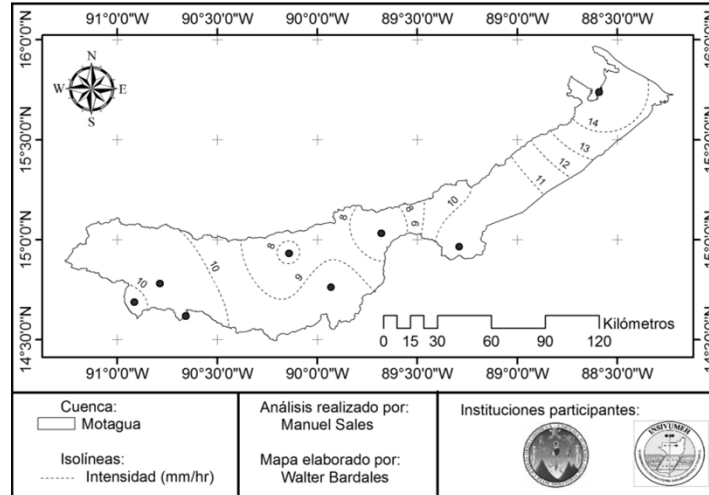
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 38. **Mapa de isólinas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 25 años**



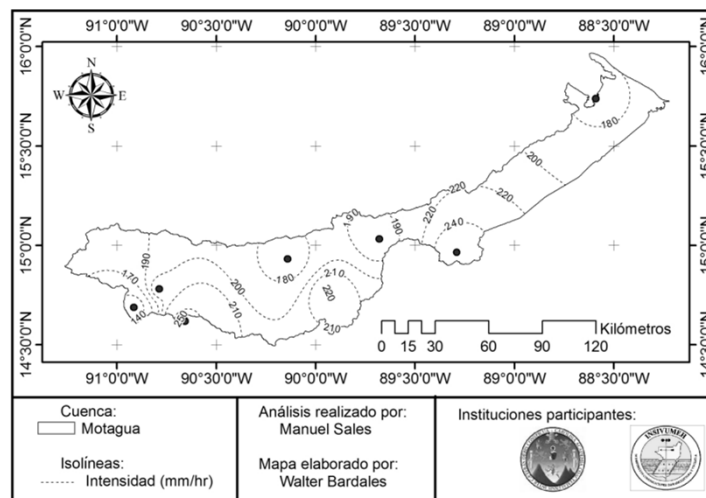
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 39. **Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 25 años**



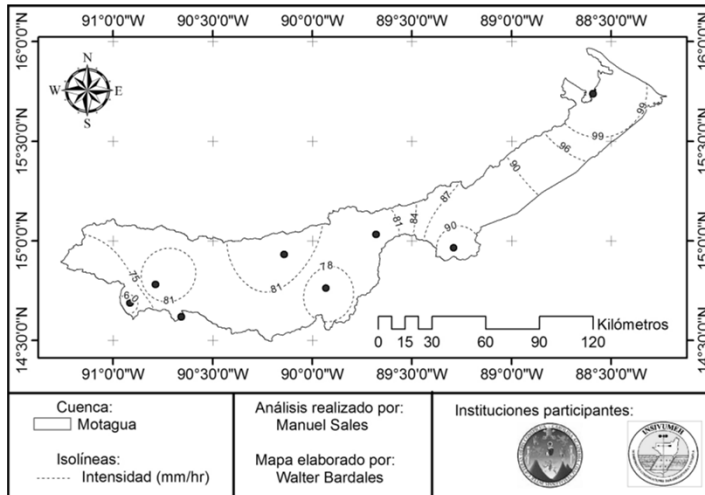
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 40. **Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 100 años**



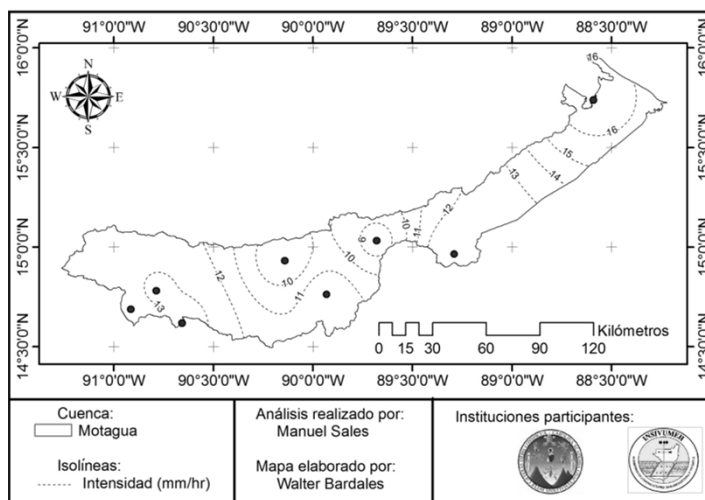
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 41. **Mapa de isólinas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 100 años**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

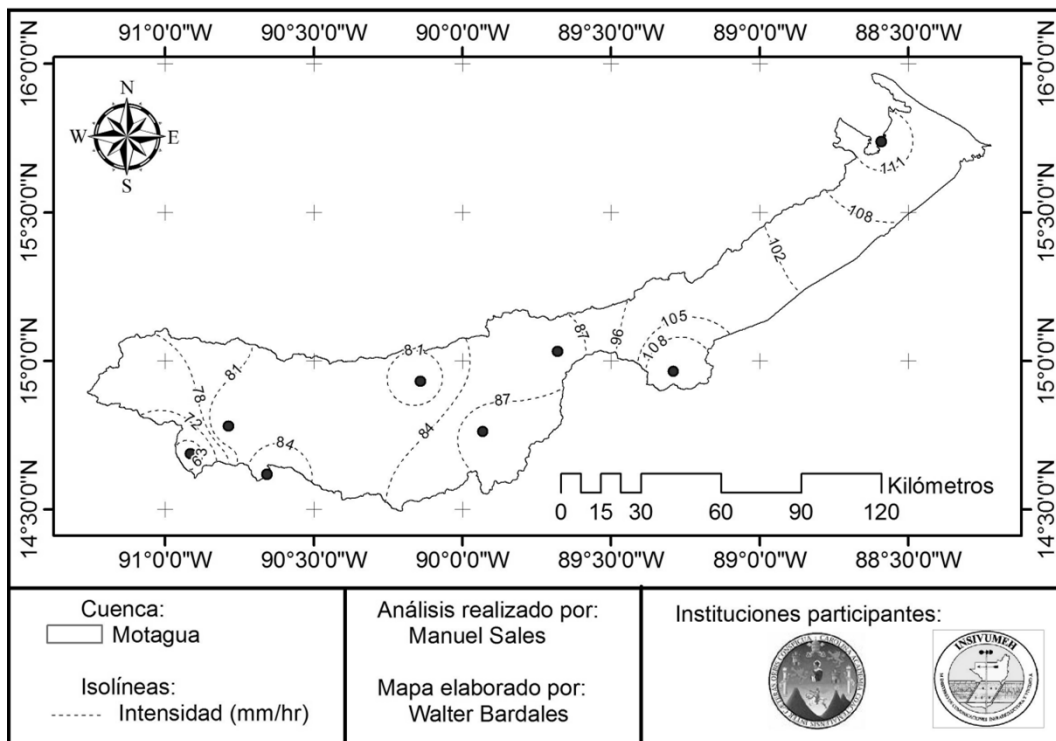
Figura 42. **Mapa de isólinas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 100 años**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

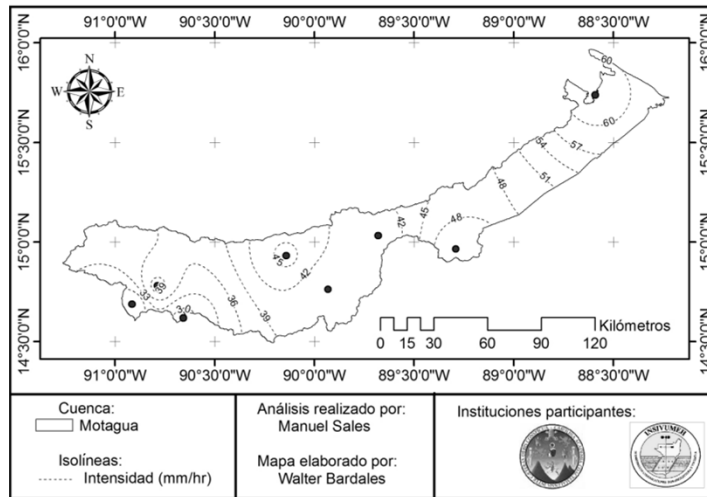
Los valores resultantes del análisis de frecuencia empleando la función de distribución Normal pueden representarse mediante mapas de isolíneas de intensidades de lluvia, lo cual facilita comprender el comportamiento de la intensidad de lluvia a lo largo de la cuenca del río Motagua, como se muestra a continuación.

Figura 43. Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 2 años



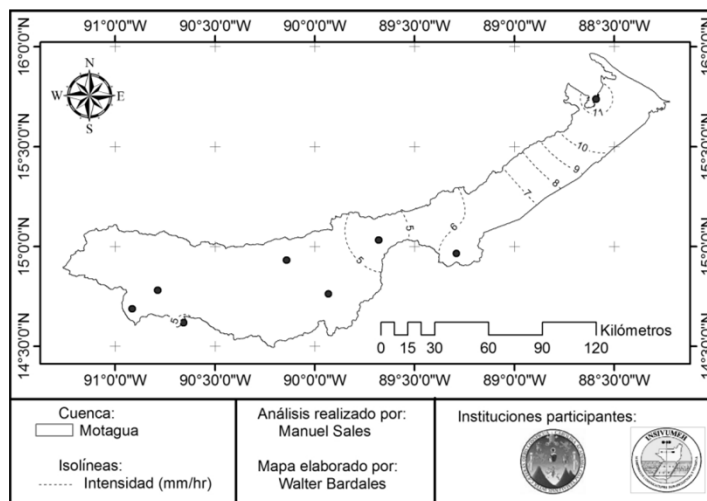
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 44. **Mapa de isólinas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 2 años**



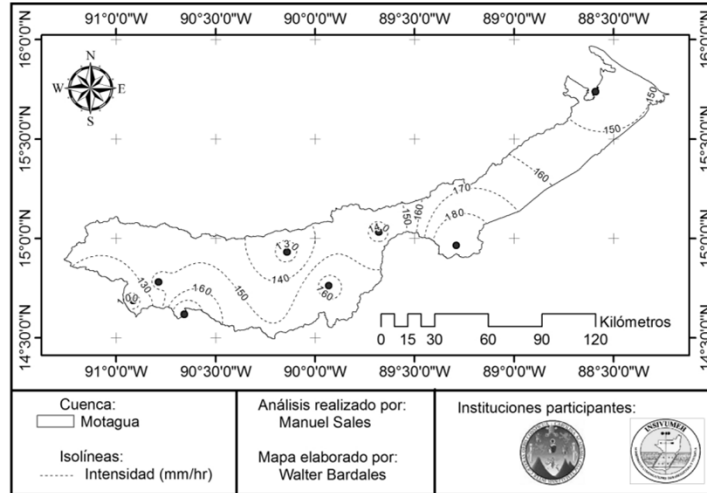
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 45. **Mapa de isólinas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 2 años**



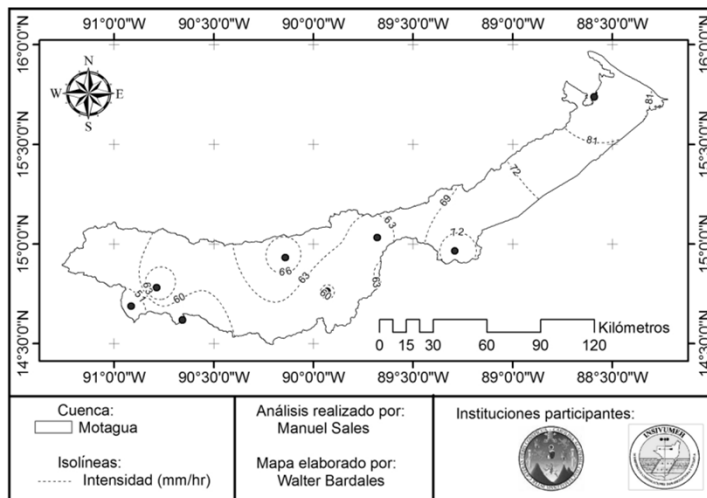
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 46. **Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 25 años**



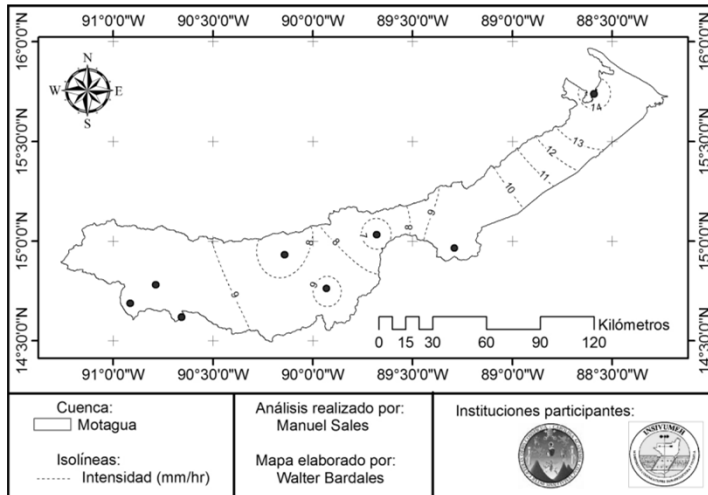
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 47. **Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 25 años**



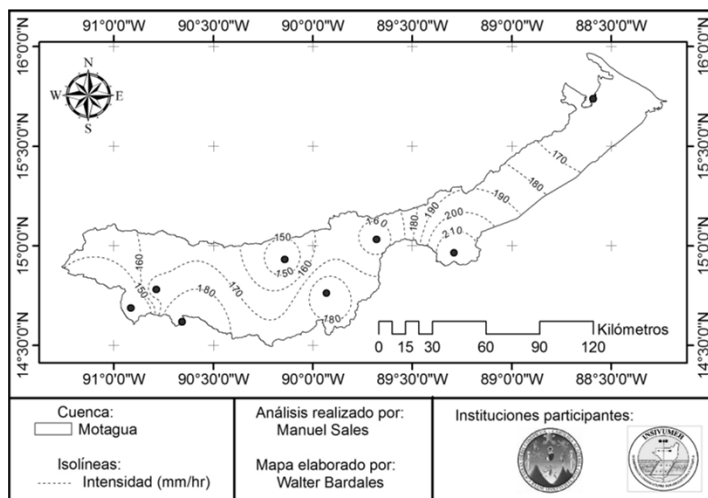
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 48. **Mapa de isólinas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 25 años**



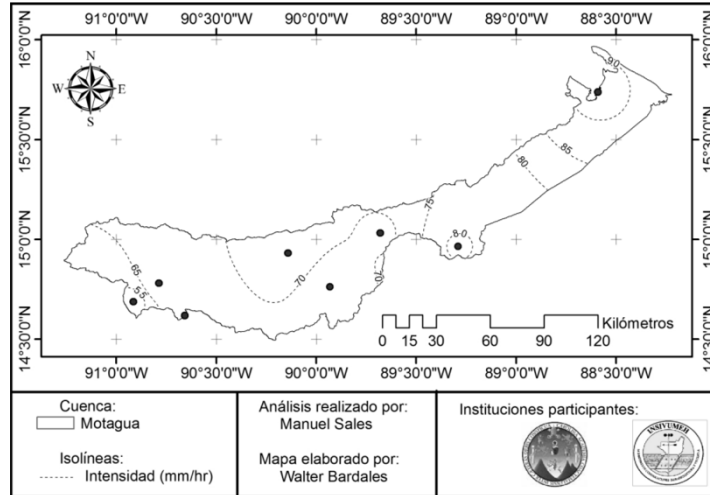
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 49. **Mapa de isólinas de intensidades de lluvia en 10 minutos y período de retorno de 100 años**



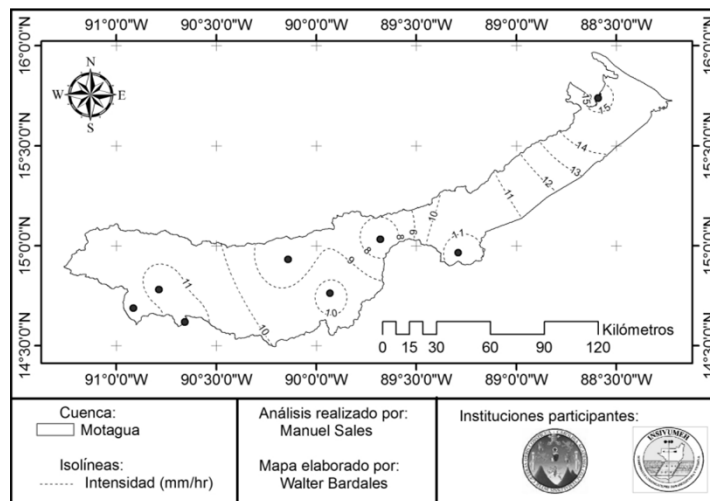
Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 50. **Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 60 minutos y período de retorno de 100 años**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

Figura 51. **Mapa de isolíneas de intensidades de lluvia en 720 minutos y período de retorno de 100 años**



Fuente: INSIVUMEH, mayo de 2012.

7. AJUSTE DE LAS INTENSIDADES DE LLUVIA A MODELOS ESTÁNDAR Y WENZEL

Con el fin de evitar la lectura de la intensidad de lluvia en una gráfica, los datos fueron ajustados a ecuaciones matemáticas o modelos, para esto se utilizó la página <http://www.zunzun.com>, donde siguiendo una serie de procedimientos como importar los datos de intensidad de lluvia para cada período de retorno y la ecuación matemática del modelo y seleccionar el error estadístico requerido y las variables tiempo (minutos) e intensidad (mm/h), se obtuvieron los parámetros A, B y n, que deben sustituirse en los siguientes modelos:

Modelo estándar:

$$I = \frac{A}{(D + B)^n}$$

Modelo *Wenzel*:

$$I = \frac{A}{D^n + B}$$

Tabla XIX. **Coefficientes del modelo *Wenzel* para la estación climática Santa Cruz Balanyá**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	1141	13,59	0,81	1,69E-02	1093	14,04	0,81	2,11E-02
5	1419	12,47	0,80	1,09E-02	1377	12,56	0,80	1,08E-02
10	1574	12,20	0,79	1,19E-02	1583	12,19	0,79	1,20E-02
15	1651	12,09	0,79	1,29E-02	1697	12,02	0,79	1,34E-02
20	1702	12,03	0,79	1,35E-02	1775	11,90	0,79	1,45E-02
25	1741	12,00	0,79	1,40E-02	1844	11,88	0,79	1,55E-02
30	1770	11,97	0,79	1,44E-02	1890	11,80	0,79	1,62E-02
50	1841	11,83	0,79	1,55E-02	2038	11,72	0,79	1,84E-02
75	1903	11,82	0,79	1,64E-02	2152	11,66	0,79	2,01E-02
100	1941	11,77	0,79	1,70E-02	2231	11,61	0,79	2,13E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Coefficientes del modelo estándar para la estación climática Santa Cruz Balanyá**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	849	23,83	0,77	2,31E-02	820	24,48	0,78	2,80E-02
5	1034	22,23	0,76	1,43E-02	1005	22,35	0,76	1,45E-02
10	1140	21,86	0,75	1,43E-02	1146	21,85	0,75	1,44E-02
15	1192	21,72	0,75	1,49E-02	1224	21,63	0,75	1,52E-02
20	1228	21,64	0,75	1,52E-02	1277	21,47	0,75	1,58E-02
25	1254	21,60	0,75	1,55E-02	1325	21,45	0,75	1,66E-02
30	1274	21,56	0,75	1,58E-02	1356	21,35	0,74	1,71E-02
50	1323	21,38	0,75	1,66E-02	1459	21,25	0,74	1,88E-02
75	1366	21,38	0,74	1,73E-02	1538	21,18	0,74	2,01E-02
100	1391	21,31	0,74	1,77E-02	1593	21,11	0,74	2,11E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Coefficientes del modelo *Wenzel* para la estación climática San Martín Jilotepeque**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	3002	26,63	0,95	2,43E-03	3035	29,52	0,96	3,25E-03
5	3004	18,00	0,90	3,46E-03	2985	18,80	0,91	2,93E-03
10	3077	15,63	0,89	5,27E-03	3081	15,53	0,89	5,39E-03
15	3132	14,78	0,88	6,33E-03	3165	14,30	0,88	6,96E-03
20	3161	14,23	0,88	6,94E-03	3225	13,58	0,87	8,11E-03
25	3190	13,89	0,88	7,52E-03	3275	13,08	0,87	8,88E-03
30	3214	13,65	0,87	7,93E-03	3310	12,68	0,87	9,55E-03
50	3269	13,01	0,87	8,97E-03	3433	11,83	0,86	1,14E-02
75	3316	12,61	0,87	9,72E-03	3522	11,21	0,86	1,28E-02
100	3345	12,34	0,86	1,02E-02	3599	10,87	0,85	1,37E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Coefficientes del modelo estándar para la estación climática San Martín Jilotepeque**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	2758	31,49	0,94	3,18E-03	2851	33,74	0,95	3,89E-03
5	2597	24,09	0,88	4,35E-03	2593	24,83	0,89	3,81E-03
10	2624	21,80	0,87	6,09E-03	2627	21,70	0,87	6,22E-03
15	2661	20,95	0,86	7,14E-03	2683	20,46	0,86	7,75E-03
20	2679	20,39	0,86	7,71E-03	2726	19,70	0,85	8,86E-03
25	2699	20,04	0,85	8,28E-03	2763	19,18	0,85	9,61E-03
30	2717	19,78	0,85	8,67E-03	2788	18,76	0,84	1,02E-02
50	2757	19,10	0,85	9,67E-03	2885	17,82	0,84	1,20E-02
75	2792	18,67	0,84	1,04E-02	2955	17,13	0,83	1,34E-02
100	2815	18,38	0,84	1,08E-02	3017	16,75	0,83	1,43E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Coefficientes del modelo Wenzel para la estación climática La Suiza Contenta**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	810	3,40	0,78	1,06E-02	798	4,21	0,79	1,09E-02
5	931	1,40	0,75	3,42E-02	909	1,57	0,75	2,99E-02
10	1014	0,95	0,74	5,02E-02	1018	0,92	0,74	5,12E-02
15	1056	0,77	0,74	5,81E-02	1082	0,68	0,73	6,25E-02
20	1084	0,67	0,73	6,29E-02	1128	0,54	0,73	7,01E-02
25	1105	0,61	0,73	6,65E-02	1167	0,46	0,73	7,55E-02
30	1123	0,57	0,73	6,90E-02	1196	0,39	0,73	7,99E-02
50	1167	0,45	0,73	7,59E-02	1282	0,24	0,73	9,11E-02
75	1201	0,38	0,73	8,07E-02	1349	0,14	0,72	9,91E-02
100	1224	0,33	0,73	8,39E-02	1397	0,08	0,72	1,05E-01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Coefficientes del modelo estándar para la estación climática La Suiza Contenta**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	718	6,15	0,77	1,11E-02	696	7,36	0,78	1,23E-02
5	881	2,96	0,74	3,28E-02	854	3,24	0,74	2,86E-02
10	982	2,18	0,74	4,87E-02	987	2,14	0,74	4,97E-02
15	1033	1,87	0,73	5,67E-02	1065	1,71	0,73	6,11E-02
20	1067	1,69	0,73	6,15E-02	1120	1,47	0,73	6,89E-02
25	1092	1,58	0,73	6,52E-02	1165	1,31	0,73	7,43E-02
30	1114	1,50	0,73	6,77E-02	1200	1,19	0,73	7,88E-02
50	1166	1,30	0,73	7,47E-02	1300	0,91	0,73	9,02E-02
75	1206	1,17	0,73	7,96E-02	1379	0,73	0,73	9,85E-02
100	1233	1,08	0,73	8,29E-02	1436	0,61	0,73	1,04E-01

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Coefficientes del modelo *Wenzel* para la estación climática Morazán**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	6562	69,58	1,06	4,53E-03	6372	71,13	1,07	5,02E-03
5	7689	65,22	1,06	6,88E-03	7515	65,62	1,06	6,22E-03
10	8301	63,83	1,06	9,83E-03	8298	63,44	1,06	1,01E-02
15	8608	63,25	1,06	1,15E-02	8793	62,91	1,06	1,25E-02
20	8786	62,70	1,06	1,26E-02	9150	62,67	1,06	1,42E-02
25	8950	62,60	1,06	1,34E-02	9392	62,24	1,06	1,56E-02
30	9066	62,41	1,06	1,40E-02	9630	62,23	1,07	1,67E-02
50	9388	62,08	1,06	1,57E-02	10216	61,65	1,07	1,98E-02
75	9650	62,04	1,06	1,69E-02	10682	61,28	1,07	2,21E-02
100	9790	61,72	1,06	1,78E-02	11036	61,20	1,07	2,37E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Coefficientes del modelo estándar para la estación climática Morazán**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	7536	55,47	1,08	6,04E-03	7311	56,41	1,08	6,77E-03
5	8959	52,67	1,08	7,44E-03	8735	52,95	1,08	6,90E-03
10	9733	51,75	1,09	1,00E-02	9705	51,56	1,08	1,03E-02
15	10119	51,36	1,09	1,15E-02	10348	51,12	1,09	1,25E-02
20	10325	51,04	1,09	1,25E-02	10819	50,91	1,09	1,40E-02
25	10542	50,94	1,09	1,33E-02	11115	50,64	1,09	1,54E-02
30	10685	50,80	1,09	1,39E-02	11437	50,57	1,09	1,64E-02
50	11097	50,56	1,09	1,55E-02	12178	50,15	1,09	1,92E-02
75	11449	50,48	1,09	1,65E-02	12770	49,90	1,09	2,14E-02
100	11613	50,29	1,09	1,74E-02	13233	49,78	1,09	2,29E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Coefficientes del modelo *Wenzel* para la estación climática Potrero Carrillo**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	2651	21,75	0,93	2,59E-03	2644	23,68	0,93	3,07E-03
5	2805	15,88	0,90	1,22E-02	2782	16,53	0,90	1,03E-02
10	2908	14,04	0,89	1,98E-02	2916	13,97	0,89	2,03E-02
15	2963	13,29	0,88	2,36E-02	2994	12,86	0,88	2,58E-02
20	2996	12,84	0,88	2,60E-02	3056	12,24	0,88	2,97E-02
25	3027	12,55	0,88	2,77E-02	3107	11,82	0,87	3,26E-02
30	3047	12,32	0,88	2,91E-02	3158	11,56	0,87	3,52E-02
50	3109	11,79	0,87	3,27E-02	3267	10,73	0,87	4,11E-02
75	3161	11,47	0,87	3,55E-02	3366	10,23	0,86	4,58E-02
100	3185	11,20	0,87	3,70E-02	3430	9,88	0,86	4,87E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Coefficientes del modelo estándar para la estación climática Potrero Carrillo**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	2342	27,25	0,91	3,21E-03	2342	28,86	0,92	3,13E-03
5	2463	21,80	0,88	1,54E-02	2446	22,46	0,88	1,32E-02
10	2545	19,87	0,87	2,40E-02	2551	19,80	0,87	2,45E-02
15	2588	19,05	0,87	2,82E-02	2612	18,57	0,86	3,07E-02
20	2614	18,54	0,86	3,09E-02	2662	17,85	0,86	3,50E-02
25	2639	18,21	0,86	3,29E-02	2704	17,35	0,86	3,82E-02
30	2654	17,94	0,86	3,44E-02	2747	17,03	0,85	4,10E-02
50	2705	17,31	0,86	3,83E-02	2834	16,01	0,85	4,75E-02
75	2748	16,92	0,85	4,14E-02	2915	15,37	0,84	5,25E-02
100	2766	16,60	0,85	4,30E-02	2965	14,91	0,84	5,55E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Coefficientes del modelo *Wenzel* para la estación climática Pasabien**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	4552	38,71	1,05	1,97E-02	4441	40,49	1,06	1,91E-02
5	5154	32,37	1,04	2,31E-02	5081	33,22	1,04	2,25E-02
10	5514	30,44	1,03	2,47E-02	5523	30,28	1,03	2,48E-02
15	5683	29,55	1,03	2,55E-02	5793	29,11	1,03	2,59E-02
20	5793	29,02	1,03	2,60E-02	5970	28,31	1,03	2,67E-02
25	5884	28,71	1,03	2,63E-02	6118	27,82	1,02	2,73E-02
30	5938	28,37	1,03	2,67E-02	6230	27,39	1,02	2,78E-02
50	6120	27,75	1,02	2,74E-02	6572	26,50	1,02	2,90E-02
75	6253	27,32	1,02	2,78E-02	6829	25,81	1,02	2,98E-02
100	6353	27,11	1,02	2,82E-02	7023	25,43	1,02	3,05E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Coefficientes del modelo estándar para la estación climática Pasabien**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	4819	32,15	1,06	2,18E-02	4741	33,21	1,06	2,14E-02
5	5287	28,23	1,04	2,46E-02	5240	28,77	1,04	2,40E-02
10	5608	26,96	1,03	2,59E-02	5611	26,87	1,03	2,60E-02
15	5754	26,38	1,03	2,66E-02	5853	26,08	1,03	2,70E-02
20	5849	26,02	1,03	2,71E-02	6007	25,55	1,03	2,77E-02
25	5934	25,81	1,03	2,74E-02	6142	25,21	1,02	2,82E-02
30	5975	25,59	1,03	2,77E-02	6240	24,93	1,02	2,86E-02
50	6140	25,17	1,02	2,83E-02	6557	24,30	1,02	2,97E-02
75	6261	24,88	1,02	2,87E-02	6789	23,83	1,02	3,05E-02
100	6357	24,72	1,02	2,90E-02	6970	23,56	1,02	3,11E-02

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Coefficientes del modelo Wenzel para la estación climática La Unión**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	4004	25,16	0,98	5,49E-03	4158	28,60	1,00	6,32E-03
5	3561	14,85	0,93	4,19E-03	3607	15,90	0,93	4,18E-03
10	3480	12,08	0,91	4,24E-03	3485	12,00	0,91	4,26E-03
15	3458	11,02	0,90	4,36E-03	3459	10,50	0,89	4,47E-03
20	3450	10,42	0,89	4,46E-03	3447	9,61	0,89	4,61E-03
25	3452	10,04	0,89	4,53E-03	3448	9,04	0,88	4,76E-03
30	3449	9,73	0,89	4,59E-03	3453	8,62	0,88	4,90E-03
50	3450	9,01	0,88	4,77E-03	3482	7,64	0,87	5,29E-03
75	3456	8,55	0,88	4,95E-03	3509	6,98	0,86	5,54E-03
100	3461	8,26	0,87	5,04E-03	3531	6,57	0,86	5,79E-03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Coefficientes del modelo estándar para la estación climática La Unión**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	3814	26,21	0,97	5,11E-03	4038	28,49	0,99	6,20E-03
5	3214	18,26	0,91	3,38E-03	3271	19,16	0,92	3,41E-03
10	3109	15,73	0,89	3,44E-03	3113	15,65	0,89	3,47E-03
15	3080	14,69	0,88	3,56E-03	3077	14,17	0,88	3,70E-03
20	3068	14,09	0,88	3,67E-03	3061	13,26	0,87	3,83E-03
25	3069	13,70	0,87	3,76E-03	3061	12,65	0,86	4,01E-03
30	3064	13,38	0,87	3,81E-03	3064	12,20	0,86	4,16E-03
50	3062	12,62	0,86	4,02E-03	3091	11,10	0,85	4,59E-03
75	3067	12,12	0,86	4,21E-03	3974	8,54	0,87	8,88E-03
100	3071	11,80	0,86	4,31E-03	4440	9,61	0,90	6,99E-03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Coefficientes del modelo *Wenzel* para la estación climática Puerto Barrios**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	4255	30,71	0,89	1,03E-03	4111	30,79	0,89	1,61E-03
5	5022	30,57	0,90	5,00E-04	4908	30,56	0,90	3,90E-04
10	5420	30,49	0,90	1,24E-03	5448	30,54	0,90	1,27E-03
15	5619	30,46	0,90	1,77E-03	5750	30,51	0,90	2,10E-03
20	5761	30,52	0,90	2,12E-03	5963	30,50	0,91	2,76E-03
25	5850	30,46	0,90	2,45E-03	6119	30,45	0,91	3,34E-03
30	5927	30,46	0,91	2,69E-03	6261	30,49	0,91	3,80E-03
50	6127	30,44	0,91	3,38E-03	6634	30,48	0,91	5,19E-03
75	6287	30,50	0,91	3,88E-03	6922	30,45	0,91	6,35E-03
100	6388	30,49	0,91	4,24E-03	7144	30,51	0,91	7,15E-03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. **Coefficientes del modelo estándar para la estación climática Puerto Barrios**

Período de retorno	Distribución Normal				Distribución de Gumbel			
	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado	A	B	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado
2	3342	42,73	0,86	2,18E-03	3228	43,12	0,86	3,08E-03
5	3952	41,32	0,87	3,96E-04	3860	41,48	0,87	4,36E-04
10	4269	40,73	0,87	6,14E-04	4294	40,75	0,87	6,36E-04
15	4427	40,47	0,87	9,13E-04	4535	40,38	0,87	1,13E-03
20	4544	40,38	0,87	1,15E-03	4706	40,17	0,87	1,59E-03
25	4613	40,23	0,87	1,36E-03	4828	39,96	0,87	2,01E-03
30	4675	40,15	0,87	1,54E-03	4945	39,87	0,88	2,37E-03
50	4835	39,95	0,87	2,04E-03	5244	39,56	0,88	3,46E-03
75	4966	39,86	0,88	2,42E-03	5473	39,32	0,88	4,41E-03
100	5047	39,77	0,88	2,71E-03	5654	39,22	0,88	5,09E-03

Fuente: elaboración propia.

7.1. Errores estadísticos

Al obtener una serie de valores de intensidad de lluvia, como resultado del análisis de distribución de frecuencias, es necesario que dichos datos se ajusten a una ecuación en particular, en el proceso de ajuste se generan errores estadísticos, para ello existen varias metodologías de las cuales únicamente dos se describen a continuación.

7.1.1. Error relativo

El error relativo es la división entre el error absoluto de la medida y el dato esperado, el cociente de dicha relación matemática, es adimensional y generalmente se presenta como porcentaje. Además, el error relativo ofrece un valor que mientras más cercano a cero indica que tiene menos error, la ecuación que representa lo anteriormente expuesto es la siguiente:

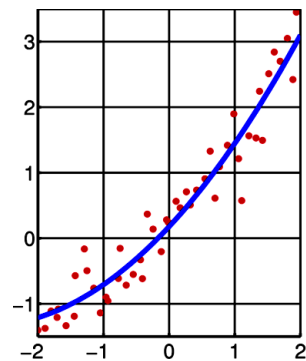
$$E. R. = \frac{D. O. - D. E.}{D. E.}$$

7.1.2. Mínimos cuadrados

Es una técnica de análisis numérico usada comúnmente para el ajuste de curvas, en la que con un conjunto de pares ordenados, es decir, variable independiente y variable dependiente y una familia de funciones, se intenta encontrar la función que mejor se aproxime a los datos, de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático. En su forma más simple, esta técnica intenta minimizar la suma de cuadrados de las diferencias ordenadas o residuos entre los puntos generados por la función y los correspondientes a los datos.

Desde el punto de vista estadístico, un requisito implícito para que funcione el método de mínimos cuadrados, es que los errores de cada medida estén distribuidos de forma aleatoria. El teorema de Gauss-Márkov prueba que los estimadores mínimos cuadrático carecen de sesgo y que el muestreo de datos no tiene que ajustarse, por ejemplo, a una distribución normal. También es necesario escoger debidamente los datos para que permitan visibilidad en las variables que han de ser resueltas para dar más peso a un dato en particular.

Figura 52. **Resultado del ajuste de un conjunto de datos a una función cuadrática**



Fuente: ALEXANDROV, Oleg. Mínimos cuadrados. es.wikipedia.org/wiki/M%C3%ADnimos_cuadrados. Consulta: abril de 2012.

7.2. Comparación de modelos para cada estación climatológica

Obtenidos los resultados del cálculo de las distribuciones de frecuencia, tanto Normal o de Gauss como de la distribución tipo I o de Gumbel para cada una de las estaciones climáticas ubicadas en la cuenca del río Motagua, fueron utilizados dos modelos para representar dichos datos, que son: el modelo estándar que es utilizado actualmente en el Instituto Nacional de Sismología,

Vulcanología, Meteorología, e Hidrología (INSIVUMEH) y el modelo propuesto por *Wenzel*.

En el proceso de ajustar los datos a una ecuación matemática o modelo, se generan errores estadísticos, dichos errores fueron calculados mediante la técnica de error relativo, por considerar que esta técnica le da el mismo peso a todos los datos que se han de ajustar al modelo, por el contrario, en la técnica de mínimos cuadrados es necesario seleccionar debidamente los datos para dar más peso a un dato en particular.

A continuación se presentan tablas comparativas entre los errores relativos obtenidos al ajustar los valores de intensidad de lluvia, tanto con la distribución de frecuencias Normal como con la distribución de frecuencias de Gumbel.

Tabla XXXV. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación La Unión**

Período de Retorno (años)	ESTACIÓN LA UNIÓN					
	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)
2	5,11E-03	5,49E-03	-3,73E-04	6,20E-03	6,32E-03	-1,20E-04
5	3,38E-03	4,19E-03	-8,06E-04	3,41E-03	4,18E-03	-7,73E-04
10	3,44E-03	4,24E-03	-8,06E-04	3,47E-03	4,26E-03	-7,91E-04
15	3,56E-03	4,36E-03	-7,98E-04	3,70E-03	4,47E-03	-7,69E-04
20	3,67E-03	4,46E-03	-7,92E-04	3,83E-03	4,61E-03	-7,73E-04
25	3,76E-03	4,53E-03	-7,72E-04	4,01E-03	4,76E-03	-7,57E-04
30	3,81E-03	4,59E-03	-7,71E-04	4,16E-03	4,90E-03	-7,42E-04
50	4,02E-03	4,77E-03	-7,55E-04	4,59E-03	5,29E-03	-7,02E-04
75	4,21E-03	4,95E-03	-7,38E-04	4,86E-03	5,54E-03	-6,88E-04
100	4,31E-03	5,04E-03	-7,27E-04	5,10E-03	5,79E-03	-6,84E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación Morazán**

Período de Retorno (años)	ESTACIÓN MORAZÁN					
	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)
2	6,04E-03	4,53E-03	1,51E-03	6,77E-03	5,02E-03	1,75E-03
5	7,44E-03	6,88E-03	5,55E-04	6,90E-03	6,22E-03	6,71E-04
10	1,00E-02	9,83E-03	2,04E-04	1,03E-02	1,01E-02	2,03E-04
15	1,15E-02	1,15E-02	5,53E-05	1,25E-02	1,25E-02	-2,01E-05
20	1,25E-02	1,26E-02	-2,44E-05	1,40E-02	1,42E-02	-1,80E-04
25	1,33E-02	1,34E-02	-9,50E-05	1,54E-02	1,56E-02	-2,66E-04
30	1,39E-02	1,40E-02	-1,35E-04	1,64E-02	1,67E-02	-3,56E-04
50	1,55E-02	1,57E-02	-2,62E-04	1,92E-02	1,98E-02	-5,45E-04
75	1,65E-02	1,69E-02	-3,64E-04	2,14E-02	2,21E-02	-6,84E-04
100	1,74E-02	1,78E-02	-4,03E-04	2,29E-02	2,37E-02	-7,77E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación Pasabien**

Período de Retorno (años)	ESTACIÓN PASABIEN					
	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)
2	2,18E-02	1,97E-02	2,12E-03	2,14E-02	1,91E-02	2,31E-03
5	2,46E-02	2,31E-02	1,43E-03	2,40E-02	2,25E-02	1,52E-03
10	2,59E-02	2,47E-02	1,21E-03	2,60E-02	2,48E-02	1,19E-03
15	2,66E-02	2,55E-02	1,11E-03	2,70E-02	2,59E-02	1,06E-03
20	2,71E-02	2,60E-02	1,05E-03	2,77E-02	2,67E-02	9,65E-04
25	2,74E-02	2,63E-02	1,01E-03	2,82E-02	2,73E-02	9,09E-04
30	2,77E-02	2,67E-02	9,70E-04	2,86E-02	2,78E-02	8,55E-04
50	2,83E-02	2,74E-02	9,00E-04	2,97E-02	2,90E-02	7,53E-04
75	2,87E-02	2,78E-02	8,49E-04	3,05E-02	2,98E-02	6,67E-04
100	2,90E-02	2,82E-02	8,26E-04	3,11E-02	3,05E-02	6,19E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación Potrero Carrillo**

Período de Retorno (años)	ESTACIÓN POTRERO CARRILLO					
	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)
2	3,21E-03	2,59E-03	6,14E-04	3,13E-03	3,07E-03	6,44E-05
5	1,54E-02	1,22E-02	3,19E-03	1,32E-02	1,03E-02	2,87E-03
10	2,40E-02	1,98E-02	4,24E-03	2,45E-02	2,03E-02	4,29E-03
15	2,82E-02	2,36E-02	4,68E-03	3,07E-02	2,58E-02	4,93E-03
20	3,09E-02	2,60E-02	4,95E-03	3,50E-02	2,97E-02	5,33E-03
25	3,29E-02	2,77E-02	5,13E-03	3,82E-02	3,26E-02	5,60E-03
30	3,44E-02	2,91E-02	5,27E-03	4,10E-02	3,52E-02	5,82E-03
50	3,83E-02	3,27E-02	5,61E-03	4,75E-02	4,11E-02	6,32E-03
75	4,14E-02	3,55E-02	5,85E-03	5,25E-02	4,58E-02	6,67E-03
100	4,30E-02	3,70E-02	6,00E-03	5,55E-02	4,87E-02	6,87E-03

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación San Martín Jilotepeque**

Período de Retorno (años)	ESTACIÓN SAN MARTIN JILOTEPEQUE					
	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)
2	3,18E-03	2,43E-03	7,56E-04	3,89E-03	3,25E-03	6,39E-04
5	4,35E-03	3,46E-03	8,85E-04	3,81E-03	2,93E-03	8,79E-04
10	6,09E-03	5,27E-03	8,19E-04	6,22E-03	5,39E-03	8,20E-04
15	7,14E-03	6,33E-03	8,06E-04	7,75E-03	6,96E-03	7,81E-04
20	7,71E-03	6,94E-03	7,69E-04	8,86E-03	8,11E-03	7,55E-04
25	8,28E-03	7,52E-03	7,58E-04	9,61E-03	8,88E-03	7,26E-04
30	8,67E-03	7,93E-03	7,49E-04	1,02E-02	9,55E-03	6,95E-04
50	9,67E-03	8,97E-03	7,07E-04	1,20E-02	1,14E-02	6,44E-04
75	1,04E-02	9,72E-03	6,84E-04	1,34E-02	1,28E-02	5,80E-04
100	1,08E-02	1,02E-02	6,61E-04	1,43E-02	1,37E-02	5,57E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación San Santa Cruz Balanyá**

ESTACIÓN SANTA CRUZ BALANYÁ						
Período de Retorno (años)	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)
2	2,31E-02	1,69E-02	6,21E-03	2,80E-02	2,11E-02	6,95E-03
5	1,43E-02	1,09E-02	3,41E-03	1,45E-02	1,08E-02	3,71E-03
10	1,43E-02	1,19E-02	2,40E-03	1,44E-02	1,20E-02	2,36E-03
15	1,49E-02	1,29E-02	1,98E-03	1,52E-02	1,34E-02	1,73E-03
20	1,52E-02	1,35E-02	1,73E-03	1,58E-02	1,45E-02	1,33E-03
25	1,55E-02	1,40E-02	1,55E-03	1,66E-02	1,55E-02	1,08E-03
30	1,58E-02	1,44E-02	1,42E-03	1,71E-02	1,62E-02	8,60E-04
50	1,66E-02	1,55E-02	1,04E-03	1,88E-02	1,84E-02	3,60E-04
75	1,73E-02	1,64E-02	8,49E-04	2,01E-02	2,01E-02	1,73E-05
100	1,77E-02	1,70E-02	6,78E-04	2,11E-02	2,13E-02	-2,06E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación La Suiza Contenta**

ESTACIÓN LA SUIZA CONTENTA						
Período de Retorno (años)	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 - 2)
2	1,11E-02	1,06E-02	4,76E-04	1,23E-02	1,09E-02	1,41E-03
5	3,28E-02	3,42E-02	-1,39E-03	2,86E-02	2,99E-02	-1,30E-03
10	4,87E-02	5,02E-02	-1,46E-03	4,97E-02	5,12E-02	-1,46E-03
15	5,67E-02	5,81E-02	-1,41E-03	6,11E-02	6,25E-02	-1,37E-03
20	6,15E-02	6,29E-02	-1,36E-03	6,89E-02	7,01E-02	-1,26E-03
25	6,52E-02	6,65E-02	-1,31E-03	7,43E-02	7,55E-02	-1,18E-03
30	6,77E-02	6,90E-02	-1,28E-03	7,88E-02	7,99E-02	-1,09E-03
50	7,47E-02	7,59E-02	-1,17E-03	9,02E-02	9,11E-02	-8,62E-04
75	7,96E-02	8,07E-02	-1,08E-03	9,85E-02	9,91E-02	-6,70E-04
100	8,29E-02	8,39E-02	-1,01E-03	1,04E-01	1,05E-01	-5,34E-04

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLII. **Sumatoria de errores relativos al cuadrado en la estación Puerto Barrios**

Período de Retorno (años)	ESTACIÓN PUERTO BARRIOS					
	Distribución Normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 – 2)	Modelo ESTÁNDAR (1)	Modelo WENZEL (2)	Diferencia (1 – 2)
2	2,18E-03	1,03E-03	1,16E-03	3,08E-03	1,61E-03	1,47E-03
5	3,96E-04	5,00E-04	-1,04E-04	4,36E-04	3,90E-04	4,59E-05
10	6,14E-04	1,24E-03	-6,21E-04	6,36E-04	1,27E-03	-6,37E-04
15	9,13E-04	1,77E-03	-8,54E-04	1,13E-03	2,10E-03	-9,69E-04
20	1,15E-03	2,12E-03	-9,76E-04	1,59E-03	2,76E-03	-1,17E-03
25	1,36E-03	2,45E-03	-1,08E-03	2,01E-03	3,34E-03	-1,33E-03
30	1,54E-03	2,69E-03	-1,16E-03	2,37E-03	3,80E-03	-1,44E-03
50	2,04E-03	3,38E-03	-1,34E-03	3,46E-03	5,19E-03	-1,73E-03
75	2,42E-03	3,88E-03	-1,45E-03	4,41E-03	6,35E-03	-1,94E-03
100	2,71E-03	4,24E-03	-1,53E-03	5,09E-03	7,15E-03	-2,06E-03

Fuente: elaboración propia.

Al analizar las tablas anteriores, donde se presentan los errores relativos generados en el proceso de ajustar los valores de intensidad de lluvia máxima utilizando ambos modelos se determina lo siguiente:

Los errores relativos empleando el modelo estándar fueron menores que los generados con el modelo propuesto por *Wenzel* en cuatro estaciones climáticas siendo éstas: La Unión, La Suiza Contenta, Morazán y Puerto Barrios.

A su vez los errores relativos generados al utilizar el modelo propuesto por *Wenzel* fueron menores que los generados por el modelo estándar en las cuatro estaciones climáticas restantes que son: Pasabien, Potrero Carrillo, San Martín Jilotepeque y Santa Cruz Balanya.

Los modelos estándar y el propuesto por *Wenzel* generan errores relativos en las ocho estaciones climáticas analizadas, indiferentemente del régimen de lluvia registrado en cada una de ellas.

Sin embargo, el resultado de la sumatoria de los errores relativos generados en las ocho estaciones climáticas es menor al utilizar el modelo propuesto por *Wenzel* que al utilizar el modelo estándar, lo cual indica que el modelo que ajustó mejor los datos de intensidades de lluvia fue el propuesto por *Wenzel*, comprobándose así la hipótesis planteada.

CONCLUSIONES

1. Las intensidades de lluvias muy altas consideradas como eventos extremos no ocurren con frecuencia, pero cuando ocurren suelen ocasionar inundaciones y deslizamientos de laderas.
2. Se elaboraron las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de ocho estaciones climáticas localizadas en la cuenca del río Motagua, utilizando los modelos estándar y *Wenzel*.
3. La falta de bandas pluviográficas en los registros de algunas estaciones climáticas es debido a la falta de calibración del equipo pluviográfico y al deterioro provocado por el transcurrir del tiempo.
4. La función de distribución de Gumbel es apropiada para el diseño de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia cuando se analizan intensidades de lluvia máximas.
5. El modelo propuesto por *Wenzel* se ajustó a los valores de probabilidad de intensidad de lluvia en cuatro estaciones climáticas y el modelo estándar a su vez a las cuatro estaciones climáticas restantes, sin embargo, el resultado de la sumatoria de los errores es menor con el modelo *Wenzel*.

RECOMENDACIONES

1. Los desastres naturales provocados por intensidades de lluvia muy altas pueden evitarse mediante el diseño de obras hidráulicas adecuadas derivadas del conocimiento de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia propias de la región de interés.
2. Es necesario elaborar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en cada cuenca del país ya que constituyen la base para el diseño de obras hidráulicas enfocadas a evitar o mitigar daños provocados por eventos con intensidades de lluvia máxima.
3. Para facilitar la lectura y discretización de las bandas pluviográficas es necesario que el equipo pluviográfico esté calibrado para registrar eventos diarios y no semanales en especial en zonas donde la precipitación de lluvia es frecuente.
4. Al diseñar curvas Intensidad-Duración-Frecuencia con valores de intensidad de lluvia máxima es conveniente utilizar la función de distribución de frecuencias tipo I o de Gumbel.
5. Deben implementarse más estudios enfocados a la elaboración de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para poder determinar el modelo que mejor se ajusta a los resultados de intensidades de lluvia máxima.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Atlas Temático de la República de Guatemala*. Guatemala: MAGA, Laboratorio de Información Geográfica, 2002. 127 p.
2. CHEN, Cheng. *Rainfall intensity-duration-frequency formulas*. Inglaterra: ASCE, 1983. 1621 p.
3. CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David; MAYS, Larry. *Hidrología aplicada*. Colombia: McGraw-Hill, 1994. 584 p.
4. *Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la zona centro sur de Chile*. Uruguay: Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe, 1992. 126 p.
5. LINSLEY, Ray; KOHLER, Max; PAULUS, Joseph. *Hidrología para ingenieros*. Colombia: McGraw-Hill, 1977. 300 p.
6. MAGGIO, Giovanni. *Análisis estadístico de valores extremos, aplicaciones en hidrología*. Argentina: McGraw-Hill, 1983. 253 p.
7. *Método estándar de cálculo de curvas duración-intensidad-frecuencia*. Guatemala: INSIVUMEH, 1988. 77 p.
8. MINTEGUI, Juan Ángel; LÓPEZ, Fermin Unzu. *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. España: Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, 1990. 306 p.

9. PIZARRO, Roberto; ABARZA, A.; FLORES, J. *Determinación de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, para 6 estaciones pluviográficas de la VII Región*. Uruguay: Revista Virtual de UNESCO, 2001. 48 p.
10. REMENIERA, G. *Tratado de hidrología aplicada*. España: Editores Asociados, 1971. 515 p.
11. TÉMEZ, José Ramón. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. España: Dirección General de Carreteras, 1978. 111p.
12. WENZEL, Harry. *Rainfall for urban stormwater design*. Washington DC,: American Geophysical Union, 1982. 67 p.