



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

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS ESTÁNDAR Y WENZEL EN CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAZ, OSTÚA-GÜIJA, OLOPA Y LOS ESCLAVOS

Wilder Eduardo González Raxjal

Asesorado por el Ing. Sergio Antonio López Dubón

Guatemala, abril de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS ESTÁNDAR Y WENZEL EN CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAZ, OSTÚA-GÜIJA, OLOPA Y LOS ESCLAVOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WILDER EDUARDO GONZÁLEZ RAXJAL
ASESORADO POR EL ING. SERGIO ANTONIO LÓPEZ DUBÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

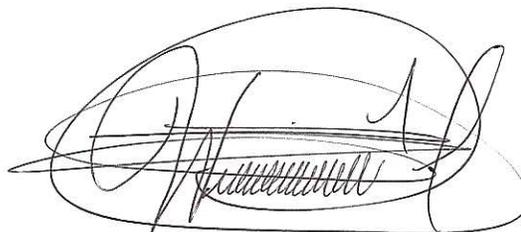
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Ing. José Mauricio Arriola Donis
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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 DE LOS MODELOS ESTÁNDAR Y WENZEL EN CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAZ, OSTÚA-GÜIJA, OLOPA Y LOS ESCLAVOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha abril de 2013.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a large, loopy oval shape. The signature is stylized and appears to read 'Wilder Eduardo González Raxjal'.

Wilder Eduardo González Raxjal

Guatemala, 17 de septiembre de 2013

Ing. Pedro Aguilar Polanco
Jefe del Departamento Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Pedro Aguilar:

De manera atenta me dirijo hacia su persona, informándole que he asesorado el trabajo de graduación del alumno WILDER EDUARDO GONZÁLEZ RAXJAL. El cual se titula: ***“COMPARACIÓN DE LOS MODELOS ESTÁNDAR Y WENZEL EN CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAZ, OSTÚA-GÜIJA, OLOPA Y LOS ESCLAVOS”***.

También hago de su conocimiento que he revisado el trabajo, realizando las correcciones necesarias, por lo que doy mi aprobación y solicito se le de continuidad a los trámites correspondientes.

Agradeciendo su fina y amable atención, atentamente:



Ing. Sergio Antonio López Dubón.

Colegiado. No. 9,914

Asesor

Sergio Antonio López Dubón
Ingeniero Civil
Col. No.9914



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>



Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala,
25 de febrero de 2014

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 DE LOS MODELOS ESTÁNDAR Y WENZEL EN CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAZ, OSTÚA-GÜIJA, OLOPA Y LOS ESCLAVOS**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Wilder Eduardo González Raxjal, quien contó con la asesoría del Ing. Sergio Antonio López Dubón.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento 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

[Handwritten signature]
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



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 Wilder Eduardo González Raxjal, titulado **COMPARACIÓN DE LOS MODELOS ESTÁNDAR Y WENZEL EN CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAZ, OSTÚA-GUIJA, OLOPA Y LOS ESCLAVOS**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, abril 2014.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Contínua





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 DE LOS MODELOS ESTÁNDAR Y WENZEL EN CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAZ, OSTÚA-GÜIJA, OLOPA Y LOS ESCLAVOS**, presentado por el estudiante universitario: **Wilder Eduardo González Raxjal**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, abril de 2014

ACTO QUE DEDICO A:

Mi Señor Jesús

Por amarme primero, perdonarme, instruirme y darme una nueva y mejor forma de vivir la vida, totalmente la honra y la gloria son para El que dio su vida por salvar la mía, a ti Jesús, gracias por tu perfecto amor, creo en ti, guíame siempre, mí amado Señor.

Mis padres

Eduardo González Sirín y María Fidelina Raxjal de González, por todo su amor, por darnos lo que todo hijo o hija desea en la vida, amor, gracias por siempre apoyarme y alentarme a tomar buenas decisiones, Dios me dio un preciosísimo regalo y son ustedes, los amo, son los mejores.

Mi hermana

Nuria Emelina González Raxjal, sigue sonriendo siempre, ¡aleluya! la alegría siempre esta en casa, gracias por todo tu apoyo, Dios siempre esta contigo, nunca dejes de tocar el piano, nos sentimos tan contentos de ti hermana.

Mis abuelos (q.e.p.d.)

Por atreverse a soñar, difícilmente este trabajo se hubiese escrito sin su legado de sacrificio a la familia, gracias abuelos.

Mis tíos

A todos en general, pero especialmente a José Benjamín Sirín y Lesby de Sirín, gracias por cada palabra de aliento y apoyo en mi vida, son un ejemplo claro de la bondad y fidelidad de Dios en la tierra, también a Mario Raxjal, gracias por cada consejo que nace de la palabra de Dios y es de enorme bendición en mi vida.

Mis primos

A todos en general, pero especialmente a Blanca Azucena Cruz, Benjamín y Emanuel Sirín y Steve Raxjal, gracias por compartir momentos especiales juntos, Dios bendiga siempre sus vidas, los aprecio mucho.

Mi familia en general

*“Todo lo puedo en Cristo que me fortalece.”
Filipenses 4:13, la Santa Biblia.*

AGRADECIMIENTOS A:

Dios

Todo lo realizado en este trabajo es por tu favor y misericordia Señor, nada se hubiese podido realizar sin tu dirección y ayuda, gracias por tu amor incondicional y por darle razón a mi vida.

Mis padres

Por todo su amor, cariño, corrección, y apoyo incondicional, los amo, respeto y valoro demasiado, gracias por introducirme en el maravilloso mundo del estudio.

Mi hermana

Tu alegría es contagiosa, creo que en lugar de enseñarte a ti, nos sigues enseñando a todos, te amamos y apreciamos mucho hermana.

Mis abuelos

Por todo su esfuerzo y determinación, por el legado de trabajo y perseverancia, por correr en la vida aun en contra de la corriente, gracias abuelos de ambas familias.

Mis amigos

Gracias a Dios por ponerlos en mi camino, se que son pocos, lejos o cerca gracias por valorarme como soy, no hace falta dar sus nombres ni apellidos, también los valoro grandemente, gracias por ser como son, que nuestra sonrisa y alegría cambie el mundo.

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Dios cumplió uno de mis sueños al estudiar aquí, un eterno agradecimiento a mi querida universidad.

Facultad de Ingeniería

Los momentos en la facultad han sido inolvidables, gracias a todas las personas que forman parte de esta especial familia, en especial a los profesores que con entusiasmo y sinceridad nos compartieron ciencia y sabiduría.

**Ing. Sergio Antonio
López Dubón**

Por exhortarme a realizar las cosas bien y por su enorme ayuda en asesorar el presente trabajo.

INSIVUMEH

Por permitirme utilizar la materia prima para elaborar el presente trabajo, un agradecimiento sincero a la sección de Hidrología.

**Ing. Claudio César
Castañón Contreras**

Por sus consejos de gran ayuda, gracias a Dios por su vida y gracias también por ser mi padrino de graduación.

**Licda. Ana Rosales y
Diana Salguero**

Agradecimiento sincero por revisar la gramática del trabajo.

A usted

Querido lector o lectora, gracias por tomarse el tiempo de leer este trabajo, mi deseo más profundo es que pueda serle de utilidad.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. DEFINICIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA.....	1
1.1. ¿Qué es una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia?... ..	2
1.2. Aplicaciones de las curvas IDF.....	3
1.2.1. Obras hidráulicas.....	4
2. FORMAS DE MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EN GUATEMALA.....	7
2.1.1. Tipos de estaciones climatológicas.....	15
2.1.2. Instrumentos de medición de la precipitación	17
2.1.2.1. Banda del pluviógrafo.....	21
3. DESCRIPCIÓN DE LAS REGIONES EN ESTUDIO.....	23
3.1. Características de las estaciones climáticas utilizadas.....	26
3.1.1. Estación climática Asunción Mita.....	27
3.1.2. Estación climática Esquipulas.....	28
3.1.3. Estación climática La Ceibita.....	29
3.1.4. Estación climática Los Esclavos.....	30

3.1.5.	Estación climática Montúfar.....	31
4.	METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA ELABORACIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA.....	33
4.1.	Recolección de información.....	33
4.2.	Criterio de selección de intensidades.....	35
4.3.	Lectura de las bandas pluviográficas.....	37
4.4.	Organización de la información.....	39
4.5.	Cálculo de las curvas IDF.....	40
4.6.	Análisis de los resultados.....	43
5.	ESTADÍSTICA UTILIZADA PARA EL CÁLCULO DE LAS CURVAS IDF.....	45
5.1.	Probabilidad.....	45
5.2.	Parámetros estadísticos.....	46
5.2.1.	Media aritmética.....	47
5.2.2.	Mediana.....	47
5.2.3.	Media geométrica.....	47
5.2.4.	Varianza.....	48
5.2.5.	Desviación estándar.....	48
5.2.6.	Coeficiente de variación.....	48
5.2.7.	Coeficiente de asimetría.....	49
5.3.	Distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas en Hidrología.....	50
5.3.1.	Distribución normal.....	50
5.3.2.	Distribución lognormal.....	51
5.3.3.	Distribución exponencial.....	52
5.3.4.	Distribución gamma.....	53
5.3.5.	Distribuciones extremas.....	54

5.3.5.1.	Distribución de Gumbel.....	54
5.3.5.2.	Periodo de retorno.....	55
6.	CÁLCULO DE LAS CURVAS IDF PARA CADA ESTACIÓN CLIMÁTICA Y SU REPRESENTACIÓN GRÁFICA.....	57
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	79
7.1.	Comparación de modelos.....	79
7.1.1.	Error relativo	89
7.2.	Importancia del estudio en la región.....	101
	CONCLUSIONES	103
	RECOMENDACIONES.....	105
	BIBLIOGRAFÍA	107

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Pluviómetro	18
2.	Pluviógrafo	20
3.	Banda del pluviógrafo.....	21
4.	Estación climática Asunción Mita.	27
5.	Estación climática Esquipulas.	28
6.	Estación climática La Ceibita.	29
7.	Estación climática Los Esclavos.	30
8.	Estación climática Montúfar	31
9.	Banda diaria del pluviógrafo.....	34
10.	Banda semanal del pluviógrafo.	35
11.	Banda diaria con grandes precipitaciones.....	36
12.	Segmento de la banda del pluviógrafo.	38
13.	Curvas IDF de una estación.....	41
14.	Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Asunción Mita, aplicando la distribución normal	59
15.	Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Asunción Mita, aplicando la distribución de Gumbel	61
16.	Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Esquipulas, aplicando la distribución normal	63
17.	Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Esquipulas, aplicando la distribución de Gumbel	65
18.	Gráfico de las curvas IDF para la estación climática La Ceibita, aplicando la distribución normal	67

19.	Gráfico de las curvas IDF para la estación climática La Ceibita, aplicando la distribución de Gumbel	69
20.	Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Los Esclavos, aplicando la distribución normal.....	71
21.	Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Los Esclavos, aplicando la distribución de Gumbel	73
22.	Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Montúfar, aplicando la distribución normal.....	75
23.	Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Montúfar, aplicando la distribución de Gumbel	77

TABLAS

I.	Características morfométricas resumidas de las 4 cuencas.	25
II.	Probabilidades de lluvia máxima para distribución normal en la estación climática Asunción Mita	58
III.	Probabilidades de lluvia máxima para distribución de Gumbel en la estación climática Asunción Mita	60
IV.	Probabilidades de lluvia máxima para distribución normal en la estación climática Esquipulas	62
V.	Probabilidades de lluvia máxima para distribución de Gumbel en la estación climática Esquipulas	64
VI.	Probabilidades de lluvia máxima para distribución normal en la estación climática La Ceibita	66
VII.	Probabilidades de lluvia máxima para distribución de Gumbel en la estación climática La Ceibita	68
VIII.	Probabilidades de lluvia máxima para distribución normal de la estación climática Los Esclavos.....	70

IX.	Probabilidades de lluvia máxima para distribución de Gumbel en la estación climática Los Esclavos.....	72
X.	Probabilidades de lluvia máxima para distribución normal en la estación climática Montúfar.....	74
XI.	Probabilidades de lluvia máxima para distribución de Gumbel en la estación climática Montúfar.....	76
XII.	Variables del modelo Estándar para la estación climática Asunción Mita.....	80
XIII.	Variables del modelo Wenzel para la estación climática Asunción Mita.....	81
XIV.	Variables del modelo Estándar para la estación climática Esquipulas.....	82
XV.	Variables del modelo Wenzel para la estación climática Esquipulas. ..	83
XVI.	Variables del modelo Estándar para la estación climática La Ceibita.....	84
XVII.	Variables del modelo Wenzel para la estación climática La Ceibita.....	85
XVIII.	Variables del modelo Estándar para la estación climática Los Esclavos.....	86
XIX.	Variables del modelo Wenzel para la estación climática Los Esclavos.....	87
XX.	Variables del modelo Estándar para la estación climática Montúfar.....	88
XXI.	Variables del modelo Wenzel para la estación climática Montúfar.....	89
XXII.	Sumatoria de los errores relativos al cuadrado en la estación climática Asunción Mita.....	90
XXIII.	Sumatoria de los errores relativos al cuadrado en la estación climática Esquipulas.....	91

XXIV.	Sumatoria de los errores relativos al cuadrado en la estación climática la Ceibita.....	92
XXV.	Sumatoria de los errores relativos al cuadrado en la estación climática Los Esclavos.....	93
XXVI.	Sumatoria de los errores relativos al cuadrado en la estación climática Montúfar.....	94
XXVII.	Ecuaciones más apropiadas para utilizar en la estación climática Esquipulas.....	96
XXVIII.	Ecuaciones más apropiadas para utilizar en la estación climática La Ceibita.....	97
XXIX.	Ecuaciones más apropiadas para utilizar en la estación climática Montúfar.....	98
XXX.	Ecuaciones más apropiadas para utilizar en la estación climática Asunción Mita	99
XXXI.	Ecuaciones más apropiadas para utilizar en la estación climática Los Esclavos.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
γ	Coefficiente de asimetría
CV	Coefficiente de variación
$f(x)$	Densidad de probabilidad
S	Desviación estándar
ΔP	Diferencia de precipitación
ΔT	Diferencia de tiempo
Z	Distribución normal
e	Exponencial
$\Gamma(\beta)$	Función Gamma
°	Grado sexagesimal
$\int_{-\infty}^{\infty} x$	Integral de la variable independiente
i	Intensidad
τ	Intervalo de ocurrencia
μ	Media aritmética
'	Minutos
α	Parámetro en la función
β	Parámetro en la función
T	Periodo de retorno
P	Probabilidad de un evento
(X_1)	Producto de un número
“	Segundos
λ	Tasa media de ocurrencia de eventos

σ^3

Tercer momento alrededor de la media

σ^2

Varianza

GLOSARIO

Arandelas	Anillo metálico para evitar el roce entre dos piezas.
Arbustales	Arbustos.
Cárcava	Zanja que suelen hacer las corrientes de agua al erosionar un terreno.
Latifoliadas	Árboles con troncos de ramificación desordenada, sus hojas son anchas.
Vástago	Varilla, barra que transmite el movimiento a algún mecanismo.
Webster's New Collegiate Dictionary	Diccionario británico.

RESUMEN

A continuación se presenta una herramienta muy poco conocida en el medio nacional, pero su aplicación es de suma importancia para la elaboración de diseños hidráulicos.

Es una opción de apoyo para realizar diseños hidráulicos adecuados a la realidad del país, basado en el comportamiento de la lluvia, es decir, se presentan como una herramienta de ayuda las curvas IDF para cuatro cuencas. Uno de los fines del presente trabajo es brindar una referencia del comportamiento de la lluvia, para que pueda ser tomada en cuenta en los diseños relacionados con el tema del agua.

Este estudio se enfoca en cuatro cuencas ubicadas en el oriente del país, se trata de las cuencas de los ríos Paz, Ostúa-Güija, Olopa y Los Esclavos, las cuales pertenecen a la vertiente del Pacífico, su posición en la región es muy importante, ya que brinda el recurso hídrico a las poblaciones aledañas, pero también pueden convertirse en peligro cuando se presentan crecidas en los ríos. Por lo cual es importante generar modelos que ayuden a estudiar mejor el comportamiento de la lluvia en la región.

El estudio se basó en dos modelos: el Estándar, utilizado por el INSIVUMEH y el propuesto por Wenzel ambos tuvieron la tarea de determinar cuál se adecuaba más a cada región, asimismo, se generaron las curvas IDF para cada estación climática, utilizando la metodología propuesta por Temez, la cual consiste en seleccionar y analizar las bandas de registro del pluviógrafo que presentaban mayores valores de precipitación para tiempos determinados.

OBJETIVOS

General

Elaborar las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para las cuencas de los ríos Paz, Ostúa-Güija, Olopa y Los Esclavos.

Específicos

1. Calcular las intensidades de lluvia para los distintos periodos de retorno en las regiones bajo estudio.
2. Construir las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia utilizando el modelo Estándar, el cual es utilizado como base por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, y el modelo propuesto por Wenzel.
3. Comparar los resultados de los dos modelos, para obtener la representación del que más se ajusta a la realidad de cada río.

INTRODUCCIÓN

Estudiar el agua ha sido uno de los temas de mucha importancia para todas las personas alrededor del mundo, específicamente en su abastecimiento, aprovechamiento y manejo. Como bien se sabe existen varias vías por las cuales se puede obtener el agua, entre ellas: subterráneas, superficial y de precipitación.

Guatemala se caracteriza por ser un país que presenta diferentes zonas geográficas en su territorio, lo cual hace que el estudio de la precipitación sea muy importante para cada región, principalmente en temas de agricultura, que es donde mayor incidencia tiene el agua de lluvia, pero también, otro punto importante lo tiene el tema relacionado con el diseño de obras de protección, el cual se enfoca en el presente trabajo.

El estudio de la precipitación, en cierta manera se vuelve complejo, ya que no se puede determinar con exactitud la cantidad de lluvia que caerá en la época de invierno en cada región del país, lo cual genera la realización de un análisis del historial de la precipitación en los últimos años, para poder obtener una referencia del comportamiento de la misma.

Este análisis del historial de lluvia se basa en tres parámetros de la precipitación: intensidad, el tiempo de duración y la frecuencia con que ocurre; y con base en estos tres parámetros se desarrollan las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia.

La aportación que brindan las curvas IDF es grande, ya que genera un aporte al mejor manejo del recurso hídrico en temas como: diseños hidráulicos, sistemas de drenajes e infraestructura del país, por mencionar solo algunas aplicaciones.

En el presente estudio se elaborarán las curvas IDF para la zona fronteriza en el oriente de Guatemala, con la intención de poder aportar el mejor aprovechamiento del agua y su manejo, especialmente en situaciones donde pueden presentarse intensidades muy fuertes.

Dentro del desarrollo de este trabajo se presenta la definición de las curvas IDF, las formas de medir la precipitación en el país, una descripción de las regiones estudiadas, la metodología utilizada para la elaboración de las curvas IDF.

Asimismo, trata sobre el estudio de la estadística que se utilizó para el cálculo de las curvas IDF, y por último se presenta el análisis de resultados.

Cabe destacar que para el estudio se tomaron como base cinco estaciones climatológicas, las cuales pertenecen a la red del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). Esperando contribuir al país, con estudios del recurso hídrico, ya sean presentes o para futuras investigaciones.

1. DEFINICIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA

El estudio de la lluvia cada vez se torna de mayor importancia para cada comunidad, ya que la misma afecta el entorno, la economía y el desarrollo integral del lugar.

Al estudiar la lluvia se sabe que la misma es difícil de predecirla con exactitud, en cuanto a cuál será su duración, la intensidad con que se precipita, y a cada cuánto lo hará en una temporada de lluvia, ya que si bien existen registros históricos, se puede notar que cada lluvia que cae es totalmente diferente una de la otra.

Su estudio ha requerido de numerosas investigaciones sobre su comportamiento. Debido a la importancia del tema, cada una ha presentado diferentes criterios, pero todas han tenido como parámetros en común: la intensidad, duración y la frecuencia de ocurrencia.

Es de la intensidad, duración y la frecuencia de la lluvia, de donde parte el presente estudio de investigación, ya que es necesario conocer a profundidad las principales características que hacen que el estudio de la lluvia sea cada vez más relevante para el país.

Las situaciones son variadas, por lo cual al analizar la lluvia es necesario presentar información que pueda ser útil, para toda persona que necesite conocer el comportamiento de la misma, por tal razón es importante estudiar las

curvas que relacionan la intensidad, duración y la frecuencia, es decir, las curvas IDF.

1.1. ¿Qué es una curva de Intensidad-Duración-Frecuencia?

Estas resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno.

Junto con la definición de las curvas surgen otros elementos a considerar, como: la intensidad de precipitación, frecuencia o la probabilidad de excedencia de un determinado evento. Por ello, es de suma importancia tener claro el concepto de cada una de estas variables.

En este sentido se debe destacar que la intensidad i , según (Chow 1994), se define como: “La tasa temporal de precipitación, o sea, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h o pulg/h)”¹, se expresa de la siguiente manera:

$$i = \frac{P}{T_d}$$

En donde P es la profundidad de lluvia en mm o pulg, y T_d es la duración, dada usualmente en hr. Es importante señalar que cuando sólo se dispone de un pluviómetro en una estación, es evidente que, en general, sólo se podrá conocer la intensidad media en 24 horas o del periodo de lectura que se esté estudiando.

¹ CHOW VEN TE, *Hidrología aplicada*. P.584.

Como se comprenderá, esta información puede inducir a grandes errores por defecto, por cuanto las lluvias de corta duración son, en general, las más intensas. Es justamente entonces que las determinaciones de intensidades de lluvia se hagan a partir de los registros proporcionados por los pluviógrafos.

Un parámetro importante de las curvas IDF es la frecuencia o periodo de retorno, debido a que para establecer este, se deben considerar varios factores, tales como: la vida útil de la obra y su costo de construcción, protección de la vida humana, tipo de estructura y facilidad de reparación de la obra, por mencionar los más importantes.

Por lo cual, uno de los criterios que se ha tomado para establecer el periodo de retorno, es que dependerá del grado de seguridad ante las inundaciones que requiera la comunidad, del comportamiento de las precipitaciones, de los caudales involucrados y de la consecuencia que estos excedan la capacidad de las obras, como también, el costo asociado a las obras.

La frecuencia de la lluvia de diversas magnitudes es importante en la aplicación de modelos matemáticos para sintetizar datos hidrológicos, determinar la capacidad requerida en pequeñas estructuras de control de agua y en otras aplicaciones.

1.2. Aplicaciones de las curvas IDF

Las curvas IDF son una herramienta importante para diseños hidráulicos, máximo cuando se refiere a caudales o a la utilización de modelos lluvia-escorrentía, como los hidrogramas unitarios o el método racional.

El uso de las curvas IDF puede ayudar a la estimación de crecidas de los ríos en las cuencas hidrográficas, gracias a los parámetros de la intensidad, duración y frecuencia de la precipitación.

Además, es importante señalar que uno de los primeros pasos que deben seguirse en muchos proyectos de diseños hidráulicos, como un drenaje urbano o el aprovechamiento de recursos hídricos en la generación de energía eléctrica, es la determinación del evento o eventos de lluvia que deben usarse, para lo cual el autor Ven Te Chow lo define de la siguiente manera:

“La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia, la duración y las frecuencias o períodos de retorno. Esta relación se denomina curvas IDF, que son determinadas para cada sitio en particular”².

1.2.1. Obras hidráulicas

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia tienen un gran número de aplicaciones, tales como: diseño de evacuadores de crecidas, construcción de puentes, de redes de drenaje y construcción de obras de control de erosión, entre otras.

Otra aplicación de las curvas IDF es en la construcción de obras de control y recuperación de suelos degradados, además pueden aplicar en obras de zanjas de infiltración, canales de desviación, diques de postes, gaviones y cárcavas.

² CHOW VEN TE, *Hidrología aplicada*. P.584.

También de las aplicaciones importantes que se pueden obtener de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, es que por medio de las mismas pueden realizarse estudios de riesgos de inundaciones.

La aplicación, en general, representa un interés para todo tipo de obras hidráulicas que se necesite realizar en determinada región, con el objetivo principal de realizar mejores diseños hidráulicos.

2. FORMAS DE MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EN GUATEMALA

Guatemala es un país con diferentes microclimas en todo su territorio y por tal razón es de suma importancia tener conocimiento de la precipitación en cada región del país.

El estudio de la precipitación inicia en el ciclo del agua, el cual se asemeja a un ecosistema, que en su interior circula agua, la cual da vueltas en su entorno y lo hace empezando a través de la evaporación del agua en los océanos, la superficie terrestre y la vegetación.

Luego continúa con la formación de nubes, para después formar el fenómeno principal, es decir, la precipitación, que luego termina por escurrir superficialmente, infiltrarse en el suelo y viajar a través de cadenas subterráneas que llegan finalmente, otra vez a donde inició el ciclo.

La importancia que tiene la precipitación para el país es demasiada, por lo que es importante medirla, para luego llegar a realizar estudios en los cuales se pueda aprovechar, distribuirla o tener planes de alerta cuando la cantidad de precipitación es grande, esto para ayudar a poblaciones vulnerables a inundaciones en el país.

Una definición bastante acertada acerca de la medición de la precipitación la brinda la Organización Mundial Meteorológica en la siguiente frase:

“Es entonces que el objetivo principal de cualquier método de medición de las precipitaciones es obtener muestras representativas de la precipitación en la zona a que se refiera la medición.”³

Por ello es que existe una red de estaciones meteorológicas que pertenecen al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, el cual monitorea las diferentes áreas del territorio nacional; un paso muy importante en el estudio de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, es empezar definiendo qué es una estación meteorológica.

La estación meteorológica es el lugar donde se efectúan observaciones y evaluaciones de uno o varios elementos meteorológicos. Es importante destacar que el corazón de una buena información radica en varios factores, entre ellos destacan dos: la coherente toma de datos por parte del observador encargado de la estación y el buen funcionamiento de los instrumentos.

Si los mismos se mantienen en buenas condiciones, la información proporcionada será la adecuada para desarrollar proyectos de investigación o diferentes estudios. Por tal motivo es de vital importancia que las observaciones que se efectúen en dichas estaciones sean normalizadas, sistemáticas y con la mayor precisión posible, de modo que los valores que se obtengan sean homogéneos y más acordes a la realidad.

Las estaciones meteorológicas se clasifican en las siguientes categorías, dependiendo del tipo de observaciones que en ella se realizan:

³ OMM, *Vocabulario meteorológico internacional*, Suiza

- Sinópticas
- Meteorológicas agrícolas
- Meteorológicas aeronáuticas
- Especiales
- Climatológicas

Estaciones sinópticas: quiere decir que es visto al mismo tiempo o instante, en estas estaciones se realizan observaciones simultáneas en horarios comunes, internacionalmente aceptados y basados en el tiempo medio de Greenwich, GTM, luego se transportan al respectivo Centro Meteorológico Nacional, donde los datos de las estaciones seleccionadas son enviados por el Sistema Mundial de Comunicaciones para su concentración, intercambio y distribución a los Centros Meteorológicos Regionales y Mundiales.

Existe una clasificación para las estaciones sinópticas, la cual es:

- o Terrestres
- o Marítimas

Estaciones sinópticas terrestres: estas se clasifican de acuerdo a los elementos meteorológicos observados, que pueden ser los siguientes:

- De superficie
- Aerológicas

De superficie: este tipo de estaciones registra datos desde la superficie terrestre, a la capa atmosférica adyacente a esta y a niveles más elevados de la atmósfera, los cuales son vistos desde la superficie terrestre.

Aerológicas: también conocidas como de altitud, miden lo mismo que las estaciones de superficie, pero también brindan información de elementos meteorológicos relacionados a los diferentes niveles de la atmósfera. También se le conocen a estas estaciones con el nombre de sondeo atmosférico, las mismas pueden utilizar elementos electrónicos, equipo óptico, balón óptico, radiosonda, radioviento o radio viento sonda.

Estaciones sinópticas marítimas: se encuentran instaladas en los puertos marítimos fijos o móviles y trabajan la misma clasificación y funcionamiento que las terrestres.

Los elementos de observación de una estación sinóptica son los siguientes: presión atmosférica, temperatura, viento, precipitación, humedad relativa del aire, tiempo presente, tiempo pasado, nubosidad, tipo de nubes, altitud de la base de las nubes, visibilidad. Otros elementos que mide, los cuales son auxiliares, son: la insolación, evaporación y transpiración y, por último la radiación solar.

Estaciones meteorológicas agrícolas: su objetivo principal es proporcionar información que permita establecer lo que puede generar uno o varios elementos meteorológicos sobre las actividades agrícolas. Esto motiva a que, se deban incluir observaciones de naturaleza biológica paralelas a las que se refieren al medio físico; meteorológicas, para que proporcionen datos que ayuden a determinar las relaciones que existe entre el tiempo y la vida natural de las plantas y animales.

Las estaciones meteorológicas agrícolas se clasifican en:

- o Principal
- o Ordinaria
- o Auxiliar
- o Para fines especiales

Estación meteorológica agrícola principal: proporciona conjuntamente información de carácter meteorológico y biológico; también se realizan investigaciones sobre agrometeorología que dependen, principalmente de medios instrumentales; el alcance y la frecuencia de las observaciones meteorológicas y biológicas, a su vez del personal técnico profesional capacitado.

Estación meteorológica agrícola ordinaria: proporciona de manera conjunta información meteorológica y biológica. Puede estar equipada para realizar investigaciones de problemas como: cosechas reales o potenciales, producción, producción animal, etc. Un punto importante es que al final dependerá de las condiciones climáticas de la estación.

Estación meteorológica agrícola auxiliar: proporciona información meteorológica y biológica. La información meteorológica puede medir: la temperatura, humedad del suelo, evapotranspiración potencial, sondeos detallados de capas bajas de la atmósfera, etc. La información biológica se trata de lo relacionado a los factores climáticos y seres vivos y al desarrollo de enfermedades que puedan afectar a los vegetales.

Estación meteorológica para fines especiales: tiene una característica que las distingue, la cual es que pueden ser de carácter temporal o permanente, para programas de investigación de uno o varios eventos, o dirigidos a determinados eventos, tales como: variaciones en la temperatura,

velocidad y dirección del viento, humedad anual del suelo, etc. Los elementos que mide este tipo de estación son: humedad del aire y suelo, temperatura del aire y suelo, viento en superficie, radiación y brillo solar, evaporación y evapotranspiración.

Estaciones meteorológicas aeronáuticas: su función es recolectar información meteorológica necesaria para la seguridad de la navegación aérea.

Este tipo de estaciones se instalan en aeropuertos y deben realizar observaciones regulares y especiales. Las observaciones regulares se llevan a cabo en intervalos de una hora, de acuerdo al tiempo medio de Greenwich, GTM, durante todo el día o bien parte de mismo, según lo requieran las necesidades aeronáuticas, en cambio las observaciones especiales se llevan a cabo cuando las condiciones meteorológicas varían durante intervalos que median entre las observaciones regulares.

Una característica fundamental que distingue a estas estaciones es que tienen instalado equipo de comunicación, para llevar a cabo intercambio de datos con otras oficinas u estaciones meteorológicas, destinadas exclusivamente al uso aeronáutico, asimismo, para la transmisión de información a las aeronaves en vuelo.

La mayoría opera las 24 horas del día y tienen grandes aplicaciones en las estaciones climatológicas y sinópticas, los elementos principales que registra son: viento en superficie, nubosidad, tiempo presente, alcance visual en pista, temperatura del aire y presión atmosférica. Los elementos auxiliares que registra son: precipitación, humedad relativa del aire y temperaturas máxima y mínima.

Estaciones meteorológicas especiales: en estas se incluyen todas las estaciones destinadas a realizar observaciones de elementos especiales para responder a las necesidades de investigaciones de interés local, regional o mundial, la lista incluye las siguientes estaciones:

- o Ozonométricas
- o Micrometeorológicas
- o Hidrológicas
- o Parásitos atmosféricos
- o Electricidad atmosférica
- o Localización con radar de nubes o hidrometeoros

Por último, en las estaciones que registran la precipitación aparecen las estaciones climatológicas, las cuales son como el eje de la información de este trabajo, ya que de las mismas se obtiene la información para elaborar las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia.

Estaciones climatológicas: son las destinadas a la obtención de datos meteorológicos, para dar a conocer el clima de todos los tipos de terreno que en una región o país se requiera, terrenos tales como: mesetas, cordilleras, llanuras, costas, islas, valles, montañas, etc.

Este tipo de estaciones, también son conocidas como climáticas, por lo cual es importante saber el concepto de clima, que etimológicamente significa: inclinación.

El concepto de clima surge debido a que el mismo variará según la inclinación en que llega la radiación solar. Es decir, que gracias a la inclinación del planeta se puede contar con una gran variedad de climas.

Una definición bastante clara de clima la brinda la Organización Mundial Meteorológica (OMM) en la siguiente frase: “El estado medio de la atmósfera en un instante dado, definido por los diversos elementos meteorológicos.”⁴

Al tener claro el concepto de clima se puede continuar con una descripción más centrada de la función de este tipo de estaciones, las cuales deben situarse en lugares estratégicos y condiciones que garanticen un funcionamiento adecuado y continuo durante un periodo mínimo de diez años, solo en el caso que se justifique su uso para fines especiales, su funcionamiento podrá tener un periodo de tiempo de menor duración.

Se diferencian de las sinópticas, ya que sus horarios establecidos no siguen, necesariamente, el tiempo medio de Greenwich, GMT, solo si fuera establecido en su horario de trabajo.

Las estaciones del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología tienen un horario establecido para la medición de la precipitación, que es una vez al día, por medio del pluviómetro y del pluviógrafo. Las estaciones climatológicas se clasifican en:

- o Primer orden
- o Segundo orden
- o Tercer orden
- o Observación de precipitaciones
- o Para fines especiales

⁴ OMM, *Vocabulario meteorológico internacional*, Suiza

Estaciones climatológicas de primer orden: en estas se llevan a cabo lecturas horarias u observaciones, por lo menos tres veces al día, además de los registros de las lecturas horarias efectuadas automáticamente.

Estaciones climatológicas de segundo orden: en este tipo se realizan observaciones de temperatura, humedad, viento y nubosidad del cielo, se efectúan al menos dos veces al día y en las que se observa diariamente las temperaturas máxima y mínima, la cantidad de lluvia diaria y la duración del brillo solar.

Estaciones climatológicas de tercer orden: tienen las mismas características que una estación de segundo orden, pero sus mediciones se efectúan, una sola vez al día y a horas que no son fijadas.

Estaciones de observación de precipitación: esta efectúa solo observaciones de precipitación.

Estaciones para fines precisos: en estas se efectúan estaciones de uno o varios elementos determinados.

2.1.1. Tipos de estaciones climatológicas

El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología tiene una clasificación especial para las estaciones, de la siguiente manera:

- Tipo A
- Tipo B
- Tipo C
- Tipo D

En donde la principal diferencia radica en los instrumentos que posee cada estación y por consiguiente, el número de elementos meteorológicos que se observa.

Estaciones climatológicas tipo A: en estas se registran los siguientes fenómenos meteorológicos: temperatura, precipitación, humedad relativa del aire, presión atmosférica, temperatura del subsuelo y visibilidad, es de las estaciones más completas, al igual que las automáticas, estas últimas utilizan equipo electrónico que permite tener información en el momento preciso.

Estaciones climatológicas tipo B: llevan registros de precipitación, temperaturas, humedad relativa del aire y velocidad de viento.

Estaciones climatológicas tipo C: miden temperatura y precipitación.

Estaciones climatológicas tipo D: se llevan registros únicamente de precipitación.

2.1.2. Instrumentos de medición de la precipitación

Los dos instrumentos principales que se utilizan para la medición de la precipitación en el país son los que utiliza el INSIVUMEH, es decir, el pluviómetro y pluviógrafo.

- **Pluviómetro:** este instrumento consiste en un cilindro cuya boca receptora tiene un área de 200 centímetros cuadrados, perfectamente, delimitados por un anillo de bronce, con borde biselado. La forma del pluviómetro es la que se muestra en la figura 1.

El pluviómetro está conformado interiormente por dos partes: un receptor en la parte superior, unido al borde biselado, en el fondo tiene forma de embudo y ocupa un espacio aproximado de la mitad del cilindro, el agua recolectada por el mismo, va a través del embudo a un recipiente de boca estrecha llamado colector, que ocupa la parte inferior y que, para evitar la evaporación por calentamiento, está aislada del cilindro exterior.

Para recolectar el agua depositada dentro del pluviómetro se utiliza una probeta de vidrio o de plástico, especialmente graduada, y en su escala se obtienen directamente en milímetros o pulgadas, según el sistema de medida que tenga la probeta, la altura que habría alcanzado el espejo de agua sobre el terreno, suponiendo que fuese horizontal y sin que hubiere movimiento, ni pérdida de agua, escurrimiento, evaporación, filtración, etc.

La escala contiene divisiones marcadas con rayitas largas que definen milímetros y otras más cortas que definen décimas de milímetro. Al fijarse en la probeta se ve que estas divisiones no son naturales sino ampliadas, cada espacio que representa un milímetro tiene varios centímetros.

En la parte inferior aparecen las décimas sucesivas, mucho más ampliadas, esto se consigue disminuyendo la sección de la probeta, la cual es también, bastante menor que la del pluviómetro.

En la figura 1 se puede observar un pluviómetro utilizado en la estación Quesada, en jurisdicción de Quesada en Jutiapa, este instrumento se puede encontrar en la mayoría de estaciones climáticas.

Figura 1. **Pluviómetro**



Fuente: Quesada, Jutiapa.

- Pluviógrafo: también conocido como pluviómetro registrador, este instrumento funciona para registrar la precipitación en forma continua. El receptor del mismo consiste en un cilindro, cuya boca receptora tiene un

área de 200 centímetros cuadrados, perfectamente delimitado por un anillo de bronce, con borde biselado. Su forma se muestra en la figura 2.

El receptor es el mismo que utiliza el pluviómetro, va unido a una caja cilíndrica de mayor diámetro y a una altura de 1,10 metros, en la que se aloja, el sistema registrador del aparato debidamente protegido, y un recipiente recolector.

La precipitación pluvial recogida por el receptor pasa por un embudo y por un tubo al mecanismo registrador, constituido por un cilindro, en cuyo interior hay un flotador que se desplaza verticalmente al subir el nivel del agua en el cilindro, siguiendo unas guías que ayudan a realizar este movimiento y no permiten cualquier otro tipo de movimiento.

En el centro tiene unido un vástago dispuesto verticalmente, donde va el sistema inscriptor, un brazo de palanca con una pluma que registra las precipitaciones recolectadas en la banda colocada sobre un cilindro con un sistema de relojería. El sistema de descarga del cilindro en que se aloja el flotador es de sifón, el cual es ajustable y va unido a la parte inferior del cilindro, el sistema de ajuste es un tapón de rosca y dos arandelas, una metálica muy fina y otra de goma.

Teniendo ya calibrado el sistema de descarga, cuando la precipitación llegue a 10 milímetros, el sifón actúa desalojando toda el agua del cilindro y la pluma del inscriptor baja con el flotador volviendo a la posición de cero. Cuando la precipitación continúa, vuelve a entrar el agua y el flotador sube conforme el nivel del agua que se va recogiendo, continuando el ascenso de la pluma, también sube.

En los casos donde ya no se registre la precipitación, el pluviógrafo marca únicamente una línea horizontal a lo largo de la banda y sube nuevamente hasta en el momento que vuelve a registrar lluvia.

Cuando el mecanismo del sifón está bien ajustado debe actuar en menos de 15 segundos, asimismo, el flujo debe empezar y terminar rápidamente. El agua evacuada por el sifón se colecta en una jarra que va colocada en la parte inferior del instrumento. Así se puede medir con la probeta graduada en milímetros la cantidad de agua recogida y comprobar con la lectura obtenida en el pluviómetro.

La figura 2 muestra un pluviógrafo utilizado en la estación climática Montúfar, en el departamento de Jutiapa, en este estudio, es el instrumento que provee la materia prima para el análisis.

Figura 2. **Pluviógrafo**



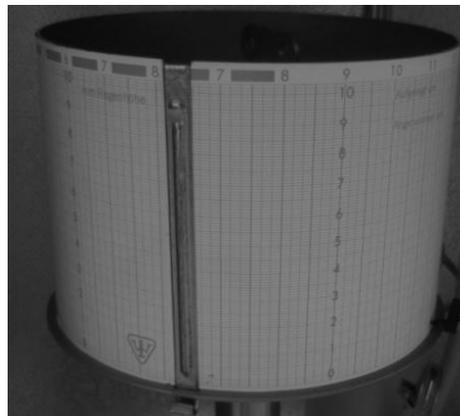
Fuente: Montúfar, Jutiapa.

2.1.2.1. Banda del pluviógrafo

La banda del pluviógrafo es donde se registra el comportamiento de la precipitación. Cabe destacar que existen dos tipos de bandas, las cuales pueden ser diarias y semanales. La banda registra en las ordenadas, la altura de la precipitación en milímetros y, en las abscisas, el tiempo de duración de la lluvia en horas y minutos.

Cabe destacar que 1 milímetro de agua en el pluviógrafo equivale a 1 Litro/metro², la forma de la banda se muestra en la figura 3, en la cual se observa una banda ya colocada en el pluviógrafo.

Figura 3. Banda del pluviógrafo



Fuente: Montúfar, Jutiapa.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS REGIONES EN ESTUDIO

El punto de estudio se desarrolló en la región oriental de Guatemala, específicamente en cuatro cuencas de los ríos: Ostúa-Güija, Los Esclavos, Olopa, y Paz.

Estas cuencas ocupan cuatro departamentos del país: Jutiapa, Chiquimula, Santa Rosa y Jalapa. Cada parte del país es totalmente diferente, desde las costumbres, hábitos, geografía, etc. En este caso la región del oriente es muy marcada por presentar un clima bastante caluroso, pero a su vez muestra grandes riquezas naturales, tales como lagos, estanques, humedales, pantanos y ríos, además de colindar con el océano Pacífico.

Es decir, las regiones en estudio pertenecen a la vertiente del océano Pacífico, cabe destacar que el país posee tres vertientes, siendo estas: del Atlántico, del Golfo de México y la del Pacífico, a esta última pertenecen las cuatro cuencas analizadas.

La vertiente del Pacífico se destaca por poseer ríos con longitudes cortas, siendo el promedio de 110 kilómetros. Estos ríos nacen a una altura media de 3 000 MSNM, se caracterizan por presentar pendientes fuertes en la parte alta de las cuencas, aproximadamente entre 10 por ciento y 20 por ciento tendiendo a cambiar de manera repentina en la parte baja de la cuenca, debido a que las pendientes son menores en las regiones costeras.

Al presentar cambios tan bruscos y sumados a la precipitación intensa que puede ocasionar una tormenta, temporal, depresión tropical o huracán ha ocasionado inundaciones en el área, es decir, la zona costera de esta vertiente es susceptible a inundaciones, produciendo así crecidas de grandes magnitudes.

La precipitación en la parte del Pacífico, tiende a producir periodos de gran intensidad, lo cual es algo típico en las regiones costeras del país, su precipitación media anual es de 2 200 milímetros.

Otra de las características de esta región es que sus ríos acarrear grandes cantidades de volúmenes de material, principalmente de origen volcánico, debido a la cadena volcánica que se encuentra entre los límites de la vertiente.

En cuanto a las características fisiográficas y geomorfológicas, la región en estudio, presenta en su mayoría: tierras altas volcánicas, pendientes volcánicas recientes y llanuras costeras del pacifico, es decir, el denominador común en esta región son las tierras volcánicas.

En cuanto a la cobertura forestal, la región presenta áreas sin cobertura forestal, pero también posee bosques secundarios o arbustales, manglares y asociaciones de latifoliadas con cultivos, asimismo, asociación de bosque mixto y cultivos, asociación de bosque secundario o arbustal y también, una región muy pequeña de bosque de latifoliadas.

También es importante mencionar algunas características de los ríos en estudio, que pueden servir para tener una mejor idea de su comportamiento y

respuesta ante precipitaciones de gran magnitud. A continuación se presenta la tabla con estos datos.

Asimismo, información resumida de las características morfométricas de las cuencas de los ríos Paz, Ostúa-Güija, Olopa y Los Esclavos, ubicadas en la región oriental del país.

Tabla I. **Características morfométricas resumidas de las 4 cuencas**

Río	Perímetro (Km)	Longitud del cauce (Km)	Área (Km ²)	Densidad de drenaje (Km/Km ²)	Frecuencia de corrientes (No. Corrientes/Km ²)	Pendiente media (m/Km)	Elevación Media (m)
Paz	285,7	60,5	1 765,2	0,30	0,30	221,3	850
Ostúa-Güija	333,2	91,4	2 238,3	0,25	0,0366	234,3	1 000
Olopa	93,2	23,8	311,4	0,22	0,0450	311,5	1 250
Los Esclavos	294,4	133,9	2 309,4	0,34	0,0450	256,3	1 100

Fuente: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

Por último, cabe destacar que la zona de estudio es fronteriza con los países vecinos, Honduras y El Salvador, región que se caracteriza por el comercio entre Guatemala y países vecinos, también hay zonas turísticas, y en algunos casos, como en el departamento de Santa Rosa, sobre el río Los Esclavos está ubicado un puente, siendo este el único paso que comunica a Guatemala y El Salvador.

Las comunidades, en general, se dedican a la pesca, agricultura y turismo, las llanuras son las que prevalecen, aunque desde el inicio de la zona

costera hacia el norte del país, se puede sentir un clima bastante agradable, dando así una característica única a la región.

3.1. Características de las estaciones climáticas utilizadas

La información que se utilizará para desarrollar las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia tiene un origen, y se trata de las estaciones climáticas; estas proveen los datos necesarios para realizar estudios climatológicos y meteorológicos. Como se mencionó en el capítulo anterior, la red de estaciones utilizadas, pertenecen al Instituto Nacional de Sismología, Volcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH).

Cabe destacar que las estaciones utilizadas fueron: una de clase A automática, una de clase A y tres de clase B; la lectura la realiza diariamente un observador. Es importante resaltar la labor de los mismos, ya que son los encargados de cada estación y constantemente tienen que estar pendientes durante el día de cada instrumento de la estación, para su medición y así poder enviar los datos a la sede del INSIVUMEH, que permitirá contar con el material para realizar los análisis correspondientes en cada área, en este caso el desarrollo de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.

A continuación se presenta información de las cinco estaciones que proveyeron la materia prima para realizar este análisis.

3.1.1. Estación climática Asunción Mita

Es una estación climática tipo B, ubicada en jurisdicción del municipio de Asunción Mita, en el departamento de Jutiapa, su elevación sobre el nivel del mar es de 478 metros, sus coordenadas geográficas son latitud $14^{\circ} 20' 04''$ y longitud $89^{\circ} 42' 21''$.

La estación Asunción Mita pertenece a la cuenca del río Ostúa-Güija, ocupa 222 840,30 hectáreas, de las cuales el porcentaje de área con respecto a la cuenca del municipio de Asunción Mita equivale a un 22,62 por ciento del área total de la cuenca. El municipio cuenta con 91 poblados y con una población aproximada de 40 391 personas.

Figura 4. Estación climática Asunción Mita



Fuente: Asunción Mita, Jutiapa.

3.1.2. Estación climática Esquipulas

Es una estación climática tipo A automática, ubicada en jurisdicción del municipio de Esquipulas, en el departamento de Chiquimula, su elevación sobre el nivel del mar es de 1 000 metros, sus coordenadas geográficas son latitud 14° 33` 32” y longitud 89° 20` 31”.

La estación Esquipulas pertenece a la cuenca del río Olopa, ocupa 31 004,05 hectáreas, de las cuales el porcentaje de área con respecto a la cuenca del municipio de Esquipulas equivale a un 16,04 por ciento del área total de la cuenca. El municipio cuenta con 61 poblados y con una población aproximada de 28 756 personas.

Figura 5. Estación climática Esquipulas



Fuente: Esquipulas, Chiquimula.

3.1.3. Estación climática La Ceibita

Es una estación climática tipo B, ubicada en jurisdicción del municipio de Monjas, en el departamento de Jalapa, su elevación sobre el nivel del mar es de 960 metros, sus coordenadas geográficas son latitud 14° 29` 34" y longitud 89° 52` 32".

La estación La Ceibita pertenece a la cuenca del río Ostúa-Güija, ocupa 222 840,30 hectáreas, de las cuales el porcentaje de área con respecto a la cuenca del municipio de Monjas, equivale a un 6,44 por ciento del área total de la cuenca. El municipio cuenta con 39 poblados y con una población aproximada de 20 946 personas.

Figura 6. **Estación climática La Ceibita**



Fuente: Monjas, Jalapa.

3.1.4. Estación climática Los Esclavos

Es una estación climática tipo B, ubicada en jurisdicción del municipio de Cuilapa, en el departamento de Santa Rosa, su elevación sobre el nivel del mar es de 737 metros, sus coordenadas geográficas son latitud $14^{\circ} 15' 10''$ y longitud $90^{\circ} 16' 42''$.

La estación Los Esclavos pertenece a la cuenca del río Los Esclavos, ocupa 229 910,78 hectáreas, de las cuales el porcentaje de área con respecto a la cuenca del municipio de Cuilapa, equivale a un 9,29 por ciento del área total de la cuenca. El municipio cuenta con 67 poblados y con una población aproximada de 30 951 personas.

Figura 7. Estación climática Los Esclavos



Fuente: Cuilapa, Santa Rosa.

3.1.5. Estación climática Montúfar

Es una estación climática tipo A, ubicada en jurisdicción del municipio de Moyuta, en el departamento de Jutiapa, su elevación sobre el nivel del mar es de 29 metros, sus coordenadas geográficas son latitud $13^{\circ} 48' 19,90''$ y longitud $90^{\circ} 09' 16,05''$.

La estación Montúfar pertenece a la cuenca del río Paz, ocupa 175 739,70 hectáreas, de las cuales el porcentaje de área con respecto a la cuenca del municipio de Moyuta, equivale a un 21,24 por ciento del área total de la cuenca. El municipio cuenta con 68 poblados y con una población aproximada de 28 539 personas.

Figura 8. Estación climática Montúfar



Fuente: Moyuta, Jutiapa.

4. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA ELABORACIÓN DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA

En este capítulo se da a conocer la forma en la cual se construyeron las curvas de Intensidad- Duración-Frecuencia de cada estación climática.

La palabra metodología tiene su origen del griego, *metá*, que quiere decir: más allá, *odós*: camino y *logos*: estudio, es decir, bien se puede entender a la metodología como la forma o principios elementales para obtener un determinado resultado, en este caso la obtención de modelos de comparación para curvas IDF en cuatro cuencas.

En este trabajo, la metodología utilizada para la obtención de las curvas IDF será con base en la selección de bandas del pluviógrafo que registren lluvias extremas, esta metodología es propuesta por Temez (1978), y cabe destacar que la misma, también es utilizada en otros países, como Chile.

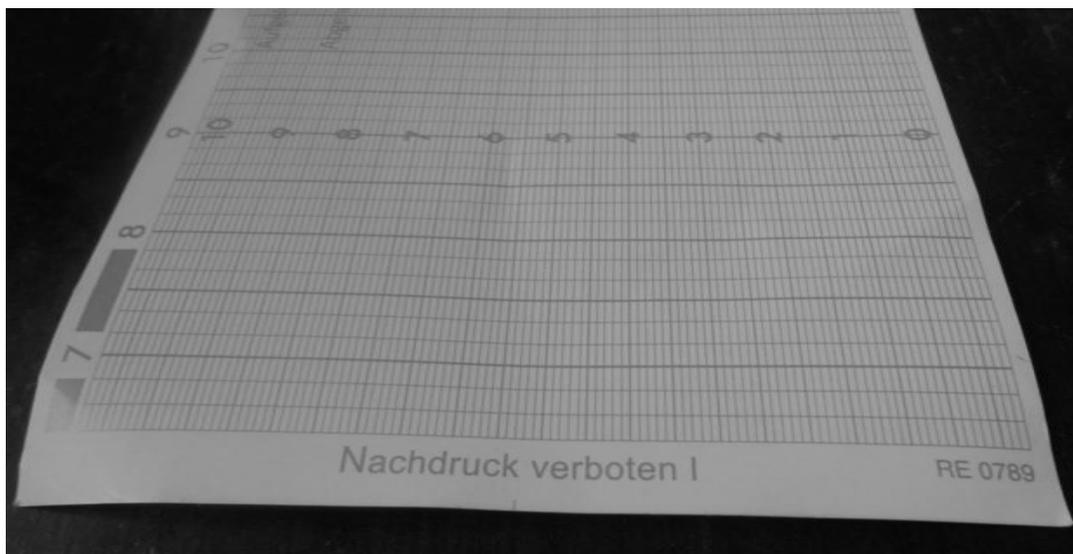
4.1. Recolección de la información

La información fue recolectada en la red de estaciones climáticas del INSIVUMEH que opera en esta región, la cual a través de cinco estaciones que posee en las cuencas en estudio, se obtuvo los datos de las bandas de los pluviógrafos.

Es importante destacar que todas las bandas leídas para este trabajo son de tipo diario, ya que también existen bandas semanales, estas últimas son bastante difíciles de leer.

En la figura 9 se puede notar la banda del pluviógrafo, la cual es de tipo diaria, marcada por horas de tiempo y milímetros en su altura, este tipo de banda se cambia todos los días a las 7 de la mañana.

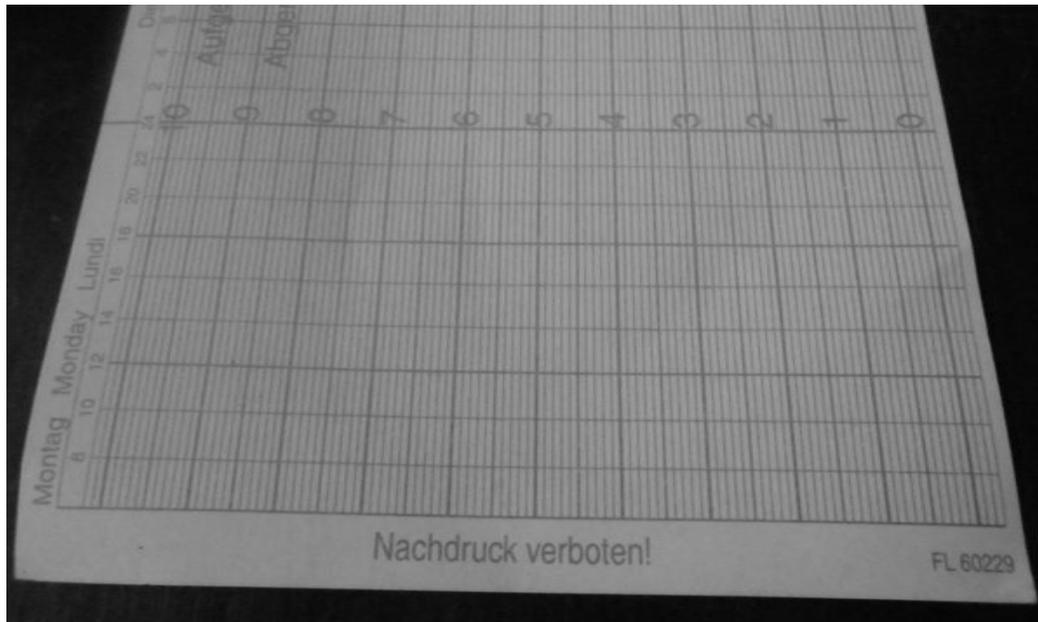
Figura 9. **Banda diaria del pluviógrafo**



Fuente: Santa Cruz Balanyá, Chimaltenango.

En la figura 10 se puede notar la banda del pluviógrafo, la cual es de tipo semanal, marcada por horas de tiempo y milímetros en su altura, este tipo de banda se cambia todos los días lunes a las 7 de la mañana.

Figura 10. **Banda semanal del pluviógrafo**



Fuente: Santa Cruz Balanyá, Chimaltenango.

Al tener las bandas, por ejemplo anualmente, el observador envía las bandas hacia las oficinas centrales de INSIVUMEH, para realizar diversos estudios con las bandas, en este caso el desarrollo de curvas IDF, para cuatro cuencas del país.

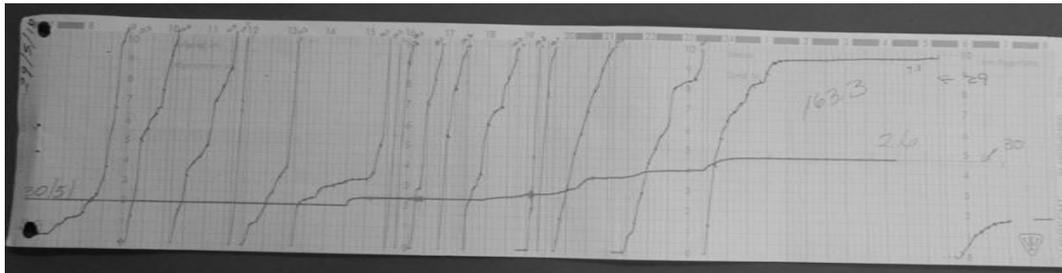
4.2. Criterio de selección de intensidades

El criterio que se utilizó para formar las curvas IDF, fue con base en las intensidades mayores, es decir, se escogieron como base las bandas del pluviógrafo que presentaban grandes intensidades en periodos cortos de tiempo o grandes intensidades que fueran constantes en periodos más largos de tiempo.

Las mediciones se realizan de las 7:00 de la mañana para las 7:00 de la mañana del siguiente día, motivo por el cual la metodología para la elaboración de la curvas IDF, es solo tomar las intensidades máximas. Se pudo obviar un buen porcentaje de bandas en donde el pluviógrafo registró poco o no tuvo registros durante ese día.

La figura 11 muestra un segmento de la banda del pluviógrafo, la cual es diaria, se puede notar la forma en que se discretizan las bandas, estos datos son de la estación Los Esclavos.

Figura 11. **Banda diaria con grandes precipitaciones**



Fuente: Cullapa, Santa Rosa.

El total fue un aproximado de 9 472 bandas leídas, se menciona aproximadamente, porque en dos estaciones, la cantidad de bandas leídas no se tomó el recuento final de las mismas en el momento de terminar de discretizar toda la estación, sino que solamente se marcaron la cantidad de bandas por cada año analizado, la cual está registrada en el archivo del Departamento de Investigación y Servicios Climatológicos del INSIVUMEH, así que los datos descritos a continuación son un buen parámetro de lo ocurrido en estas dos estaciones.

Las cinco estaciones registraron grandes cantidades de datos, basados en aproximadamente 20 años de registro, a excepción de la estación la Ceibita que tuvo un aproximado de 30 años, se menciona aproximado, ya que de algunos años no hay registros, las cinco estaciones se distribuyen de la siguiente manera:

Asunción Mita	1 670 bandas leídas.
Esquipulas	1 500 bandas leídas aproximadamente.
La Ceibita	2 811 bandas leídas.
Montúfar	1 791 bandas leídas.
Los Esclavos	1 700 bandas leídas aproximadamente.

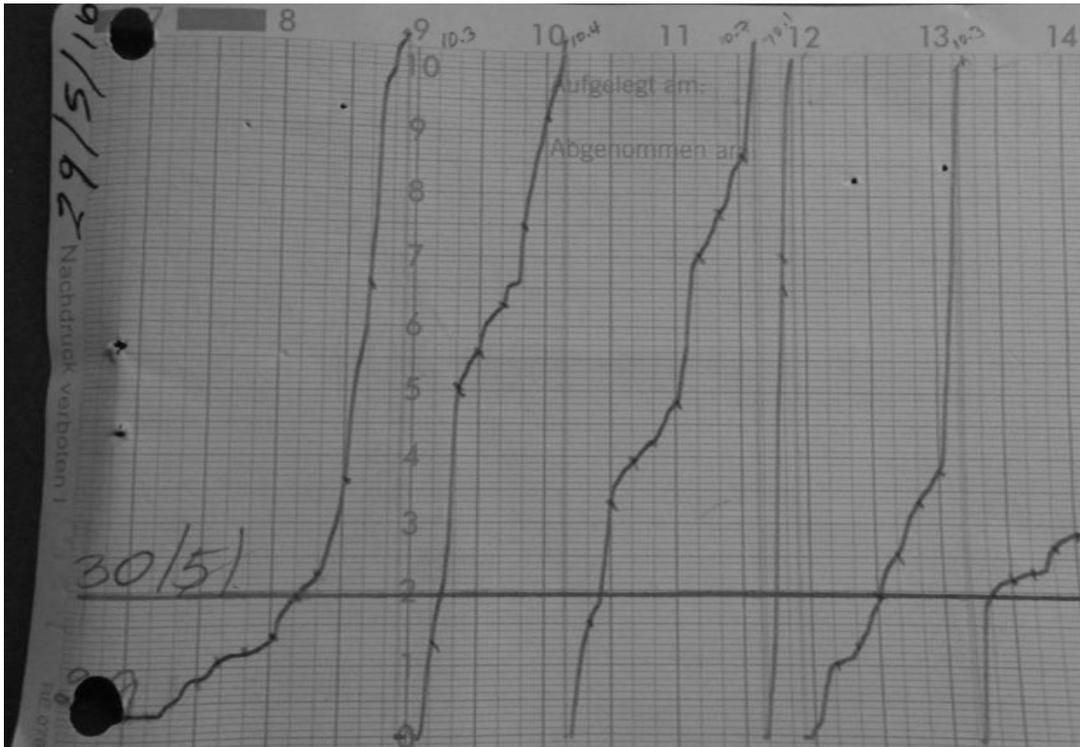
4.3. Lectura de las bandas pluviográficas

La lectura de las bandas pluviográficas comienza desde que se empieza a registrar lluvia en el pluviógrafo, hasta donde ya no se registre, esto es muy importante, ya que se podría decir que es igual a analizar una tormenta, pero en realidad es totalmente distinto, puesto que, para analizar una tormenta se puede tomar solo la parte más intensa de la lluvia registrada.

En cambio en el análisis de curvas IDF se debe tomar todo el periodo de tiempo del evento, incluso en donde el evento paró, pero prosiguió nuevamente, dando lugar así a que se pudiera continuar registrando el evento en la banda del pluviógrafo.

En la figura 12 se presenta un segmento de una banda del pluviógrafo de la estación Los Esclavos, con fecha 29/05/2010, en la cual se puede ver claramente la forma en que se registra un evento.

Figura 12. **Segmento de la banda del pluviógrafo**



Fuente: Cuilapa, Santa Rosa.

Un punto importante a destacar de las bandas, estas están divididas por horas, pero asimismo, están divididas por minutos, por ejemplo: la primera hora de registro es de 7:00 am a 8:00 am, claramente se puede observar que entre ambas, justo en la mitad, hay una línea marcada fuertemente, la cual indica que son las 7:30 am, las demás líneas son más débiles y las mismas indican 10 minutos transcurridos.

Teniendo ya las bandas del pluviógrafo que presentan las mayores intensidades, se procede a discretizar las mismas de la siguiente manera:

- a) Elección de un tiempo de discretización, en este caso se eligió 10 minutos, pueden ser menos o más, por ejemplo: 20 minutos.
- b) Elaboración de un cuadro en donde se incluya el nombre de la estación, fecha, altura inicial del pluviómetro (en caso de que ya se registrara alguna cantidad), otros datos importantes para anotar son: la hora de inicio del evento y de finalización del mismo.
- c) Se procede a discretizar cada diez minutos, la forma más sencilla de hacerlo es marcando una pequeña diagonal a 45 grados, similar a las de un acotado de los planos, en donde la línea del evento intercepte las líneas del pluviograma y así se registra todo el evento desde el inicio hasta su finalización, la anotación del evento descrito en el paso b, debe de ir paralelo a cada discretización de la banda, todo se realiza manualmente.

Prácticamente, estos son los tres pasos para poder discretizar las bandas del pluviógrafo, pero, aun hay que organizar la información.

4.4. Organización de la información

Luego de tener discretizado las bandas del pluviógrafo, hay que organizar toda la información para su posterior análisis, por lo cual se debe transcribir toda la información hacia la computadora.

Cabe destacar que no todas las estaciones tenían sus años completos de registro, la cantidad de años incompletos era mínima, pero sí se trabajó con el máximo de años disponibles con el que disponía cada estación, lo cual se

puede observar en el capítulo de cálculo de las curvas IDF, teniendo así valores muy certeros de las curvas.

4.5. Cálculo de las curvas IDF

Contando ya con los valores máximos de precipitación para cada año y diversas duraciones, se procede a calcular la intensidad horaria, la misma se obtiene entre el cociente de la diferencia de la precipitación por duración y el intervalo de tiempo transcurrido de la precipitación, la siguiente ecuación describe la intensidad horaria:

$$i = \frac{\Delta P}{\Delta T}$$

Donde:

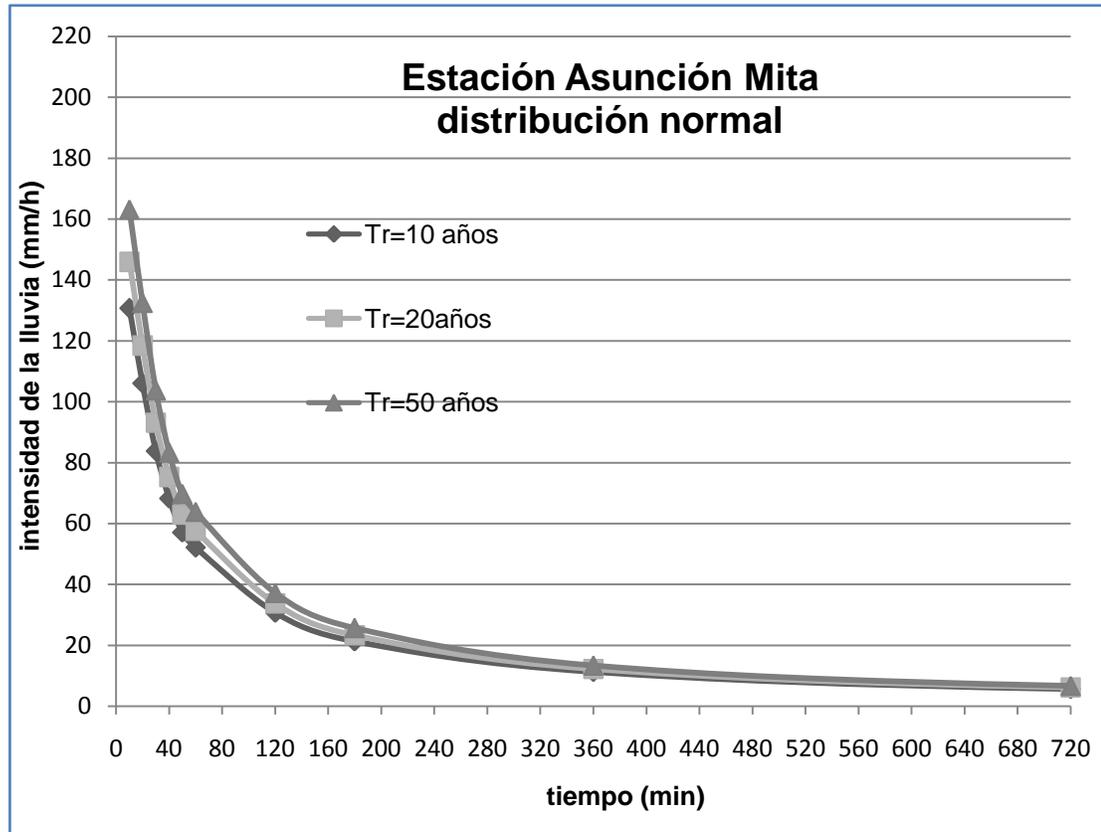
i = intensidad de la precipitación (mm/h)

ΔP = diferencial de precipitación (mm)

ΔT = diferencia de tiempo (h)

Luego de tener la intensidad de la precipitación, el siguiente paso es graficar las mismas, como se muestra en la figura 13, esta describe el comportamiento de una curva IDF.

Figura 13. Curvas IDF de una estación



Fuente: elaboración propia.

Como se puede notar, entre mayor sea el tiempo de duración, menor será la intensidad, pero entre menor sea el tiempo de duración, mayor será la intensidad del evento, también se puede observar que, cuando el periodo de retorno es más alto, los valores de intensidad pueden, de igual manera, alcanzar valores mayores.

Por ejemplo: que se necesite tener la intensidad de la lluvia para un periodo de retorno de 50 años, teniendo como base un registro de 30 años de registro, la misma puede hacerse realizando un gráfico en el que se muestre las

intensidades máximas anuales contra sus respectivos periodos de retorno, en la cual se podrá notar una tendencia más o menos definida.

El problema es que puede presentarse una subjetividad al ver la gráfica, ya que se debe tener un poco de práctica para leer la gráfica, por lo cual es necesario ajustar los datos medidos a una función que ayude a interpretarla mejor, y es en este punto donde las funciones de probabilidad juegan un papel importante.

Entre las funciones de probabilidad más utilizadas en Hidrología están las siguientes:

- Normal
- Lognormal
- Pearson III
- Gumbel
- Funciones para dos poblaciones

Para el presente estudio se utilizaron dos funciones de probabilidad: distribución normal y de Gumbel.

Se utilizó la función normal, ya que es apropiada para variables aleatorias que cubren todo el rango de valores, de los resultados posibles que puedan presentarse en un experimento que se esté analizando.

La función de Gumbel se utilizó debido a que la misma fue desarrollada para analizar valores extremos, en este caso, las intensidades máximas registradas en un periodo anual.

Teniendo ya ajustados los datos de las curvas IDF, es necesario realizar otro ajuste, el cual consiste en generar un modelo matemático que represente la curva IDF de cada estación, este se puede realizar con la página web <http://zunzún.com>, que presenta diversas funciones que sirven de ayuda para obtener valores como el error relativo al cuadrado (dato muy importante para este análisis).

4.6. Análisis de los resultados

El último paso en un estudio de curvas IDF es dar un informe sobre cómo las curvas pueden ayudar al estudio que se está realizando, en este caso, se busca determinar qué modelo se ajusta más a cada estación climática, entre: Estándar, utilizado por INSIVUMEH, o el propuesto por Wenzel.

Puede establecerse haciendo un análisis entre la sumatoria de los errores relativos al cuadrado de cada modelo y sus dos respectivas funciones de probabilidad.

5. ESTADÍSTICA UTILIZADA PARA EL CÁLCULO DE LAS CURVAS IDF

Es importante conocer el concepto de estadística, según el Webster's New Collegiate Dictionary define a la estadística como: "Rama de las matemáticas que estudia la recolección, análisis, interpretación y presentación de masas de información numérica."

El concepto anterior encaja muy bien en el presente capítulo, ya que todos los días se presentan sucesos en donde la estadística es una herramienta útil para poder resolver los mismos, aunque no sea la última palabra, pero si un buen parámetro.

5.1. Probabilidad

Término que se usa comúnmente y al pronunciarla se puede imaginar a la misma como una medida de que algo pueda ocurrir más adelante, por ejemplo: los meteorólogos dan el pronóstico del clima y que en las siguientes horas habrá una tormenta, pero al final, siempre mencionan la palabra probabilidad de lluvia para tal región, es decir, se espera que algo suceda, pero no se sabe si exactamente ese acontecimiento sucederá, pero sí se toma en cuenta, por la frecuencia con que han sucedido.

Otro ejemplo: cuando un científico está tratando de descubrir algo que pueda ser de beneficio para todos, en ese proceso se invierte tiempo y dinero en el proyecto de investigación, el hecho de que lo pueda descubrir en su

primer intento no se sabe, quizá sea en el primero o en el tercero, pero no se sabe a ciencia cierta, y es ahí donde nuevamente entra la palabra probabilidad.

Los eventos anteriores, que describen estas acciones, reciben el nombre de eventos aleatorios o estocásticos, de ahí la importancia de definir el concepto de probabilidad.

La probabilidad de un evento A es un número real no negativo de AUB es $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$, porque si A y B son excluyentes, entonces la probabilidad de $A \cap B = 0$

La probabilidad de un evento A es un número real no negativo, que representa la probabilidad de ocurrencia del evento A y que satisface lo siguiente: $0 \leq P(A) \leq 1$

Si A y B son eventos excluyentes, probabilidad de AUB es P.

5.2. Parámetros estadísticos

Uno de los principales objetivos de la estadística es trabajar con números grandes, para convertirlos en números pequeños, por tal razón, se elige una muestra del evento, la cual representa a todos los números, buscando que la misma, muestre las características más importantes del evento analizado, es decir, que presente sus parámetros estadísticos, como la media, moda, desviación estándar, por mencionar algunos.

5.2.1. Media aritmética

La media aritmética μ se trata del valor esperado de la variable aleatoria. Para una variable aleatoria X , su media será $E(X)$, y se calcula como el producto de x y la correspondiente densidad de probabilidad $f(x)$, integrado sobre el rango aceptable de la variable aleatoria:

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx$$

$E(X)$ es una medida del punto medio de la distribución.

5.2.2. Mediana

Una medida importante es la mediana de la muestra, la cual tiene como propósito mostrar la tendencia central de la misma, de manera que no esté influida por los valores extremos. Se puede definir a la mediana como:

$$x \text{ tal que } F(x) = 0,5$$

5.2.3. Media geométrica

La media geométrica puede utilizarse para promediar porcentajes, índices y cifras relativas, también, para determinar el incremento porcentual promedio en ventas, producción u otras actividades que sean tipo series económicas de un periodo a otro. Se representa de la siguiente manera:

$$MG = \sqrt[n]{(X_1)(X_2) \dots (X_n)}$$

La media geométrica de un conjunto de n números positivos se define como la raíz n – ésima del producto de los n números.

5.2.4. Varianza

La varianza mide la variabilidad de la información, también es el segundo momento alrededor de la media y se representa de la siguiente manera:

$$\sigma^2 = E[(x - \mu)^2]$$

5.2.5. Desviación estándar

La desviación estándar, sencillamente se define como la raíz cuadrada de la varianza y se representa de la siguiente manera:

$$\sigma = \{E[(x - \mu)^2]\}^{1/2}$$

5.2.6. Coeficiente de variación

El coeficiente de variación se utiliza, generalmente, para comparar la variabilidad entre dos grupos de datos referidos a distintos sistemas de unidades de medida, también compara la variabilidad entre dos grupos de datos obtenidos por dos o más personas distintas, otro dato importante es que compara dos grupos de datos que tienen distinta media y es utilizado también, para determinar si cierta media es consistente con cierta varianza, esta se representa de la siguiente manera:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu}$$

Es importante mencionar que el coeficiente de variación es una medida adimensional de la variabilidad.

5.2.7. Coeficiente de asimetría

El coeficiente de asimetría está incluido en las medidas de forma, las cuales son medidas que determinan numéricamente algunas características de la forma en que están distribuidos los datos.

Muchas veces una distribución no es simétrica alrededor de ningún valor, pero en lugar de ello se tiene que los datos están más proyectados o distribuidos hacia los extremos.

La asimetría, generalmente se construye en forma adimensional dividiendo la asimetría de oblicuidad, la cual es el tercer momento alrededor de la media dentro de σ^3 para así obtener el coeficiente de asimetría γ . El cual se representa de la siguiente manera:

$$\gamma = \frac{E[(x - \mu)^3]}{\sigma^3}$$

La simetría de una distribución alrededor de la media se mide utilizando la asimetría de oblicuidad, la cual se representa de la siguiente manera:

$$\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 dx = E[(x - \mu)^3]$$

5.3. Distribuciones de probabilidad comúnmente utilizadas en Hidrología

En hidrología existe una gran cantidad de funciones de distribución de probabilidad teóricas. Pero como toda buena herramienta tiene una aplicación en la que funciona mejor, de igual manera lo hacen las distribuciones de probabilidad, hay funciones que se encajan o se ajustan mejor a los datos medidos en el trabajo.

5.3.1. Distribución normal

La distribución normal es una de las funciones más utilizadas en estadística debido a varias razones, tales como: numerosas variables continuas de fenómenos aleatorios tienden a comportarse probabilísticamente mediante esta distribución. La función de densidad de probabilidad normal se representa de la siguiente manera:

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

Donde μ y σ son los parámetros de la distribución, los mismos determinan la forma de la función $f(x)$ y su posición en el eje x . La función de distribución de probabilidad puede definirse como:

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

Actualmente, la ecuación anterior no es muy conocida, sin embargo, existen métodos numéricos para valuar la función, lo cual implica que se

puedan utilizar tablas de valores para μ y σ , es por eso que se ha formulado una variable estandarizada que represente la distribución normal, la cual es la siguiente:

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

Está normalmente distribuida con media cero y desviación estándar 1. De esta forma se puede llegar a una nueva forma de expresión de la función de distribución de probabilidad normal, siendo esta:

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

5.3.2. Distribución lognormal

La función de distribución de probabilidad lognormal es más utilizada para variables aleatorias que cubren todo el rango de valores de los resultados posibles del experimento que se esté analizando.

En la función de distribución de probabilidad lognormal, los logaritmos naturales de la variable aleatoria se distribuyen normalmente. La función de densidad de probabilidad se representa de la siguiente manera:

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

Donde α y β son los parámetros de la distribución, se puede decir que, también representan respectivamente a la media y la desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria.

La función de distribución de probabilidad puede también representarse de la siguiente manera:

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

Aunque, también se ha formulado una variable estandarizada que representa la distribución de probabilidad lognormal, la cual es la siguiente:

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

5.3.3. Distribución exponencial

La distribución exponencial es una función de gran ayuda para la resolución de varios problemas, como en los de confiabilidad, esta distribución está muy ligada a la distribución gamma.

La distribución exponencial se utiliza también, para describir los tiempos de interarribo de choques aleatorios a sistemas hidrológicos, solo por citar un ejemplo. La distribución exponencial puede representarse de la siguiente manera:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

Donde el rango es $x \geq 0$

Una de las ventajas que ofrece esta distribución es lo fácil de estimar λ a partir de la información observada y, también que se adapta de buena manera a estudios teóricos, por el contrario, tiene sus desventajas como requerir que la ocurrencia de cada evento sea completamente independiente de sus vecinos, lo cual podría decirse que puede ser un supuesto no válido para el proceso en estudio, un ejemplo puede ser el ingreso al país de un frente frío, que pueda generar muchos cambios en el clima.

5.3.4. Distribución gamma

La función gamma deriva su nombre de la función matemática gamma, pero en este caso la distribución es una suma de β variables aleatorias independientes, distribuidas de forma exponencial.

La distribución gamma también incluye la función gamma $\Gamma(\beta)$, la misma está dada por $\Gamma(\beta) = (\beta - 1)! = (\beta - 1)(\beta - 2) \dots 3 \cdot 2 \cdot 1$ para un entero positivo β , y en general por

$$\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} u^{\beta-1} e^{-u} du$$

Es importante notar que la distribución gamma de dos parámetros, siendo estos, β y λ , tienen como límite inferior cero, lo cual es una desventaja para la aplicación a variables hidrológicas que tienen un límite inferior o superior a cero (Chow 1994).

5.3.5. Distribuciones extremas

Las distribuciones extremas son valores máximos o mínimos que se seleccionan de conjuntos de datos. Fisher y Tippett (1928) han demostrado que las distribuciones de valores extremos seleccionados en conjuntos de muestras de cualquier distribución de probabilidad convergen en tres distribuciones de valor extremo.

Estas distribuciones reciben el nombre de tipo I, II y III, cuando el número de valores extremos es grande. En este estudio se trabajó con la distribución extrema tipo I, o también conocida como de la distribución de Gumbel.

5.3.5.1. Distribución de Gumbel

Esta función es de gran importancia en Hidrología, generalmente ha sido utilizada para representar el comportamiento de crecientes y sequías, es decir, máximos y mínimos. La distribución de Gumbel se describe a continuación:

Suponiendo que se tienen N muestras, cada una de las cuales contiene n eventos. Si se selecciona el máximo x de los n eventos de cada muestra, es posible demostrar que, a medida que n aumenta, la función de distribución de probabilidad de x tiende a:

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

La función de densidad de probabilidad es:

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

Donde α y β son los parámetros de la función.

Los parámetros α y β se estiman de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{1.2825}{S}$$

$$\beta = \text{Media} - 0.45 S$$

5.3.5.2. Periodo de retorno

Existen situaciones extremas en las que muy raras veces se piensa que puedan ocurrir, pero en el momento menos esperado se puede estar ante una gran tormenta, crecidas de ríos, inundación de ciudades o sequías, por mencionar algunos sucesos.

Como no se puede determinar con exactitud cuándo pueda ocurrir un evento de este tipo, se recurre a los registros históricos, por ejemplo de crecidas de un río, en el cual se puede analizar la frecuencia en que este río se ha desbordado y afectado a la zona donde transita.

Ven Te Chow (1994) describe este suceso en su libro Hidrología aplicada, en la cual cita lo siguiente: “La magnitud de un evento extremo está inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia.”⁵

⁵ CHOW VEN TE, *Hidrología aplicada*. P.584.

Es decir, que los eventos que son de gran magnitud se dan pocas veces, no son consecuentes, son espontáneos, pero cuando ocurren, pueden causar serios problemas a la región en donde ocurra.

Es muy importante dar una definición de un parámetro que ayude a tener en cuenta la ocurrencia de un evento extremo, es decir, se describe entonces el periodo de retorno, que se define de la siguiente manera:

El periodo de retorno T de un evento $X \geq x\tau$ es el valor esperado $\tau, E(\tau)$, su valor promedio medido sobre un número de ocurrencias suficientemente grande. El intervalo de ocurrencia τ es el tiempo de ocurrencia entre $X \geq x\tau$ y $E(\tau) = T = \frac{1}{p}$, es decir, la probabilidad de ocurrencia de un evento en cualquier observación es el inverso de su periodo de retorno.

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

6. CÁLCULO DE LAS CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA PARA CADA ESTACIÓN CLIMÁTICA Y SU REPRESENTACIÓN GRÁFICA

En el capítulo cuatro se presentó la metodología para la elaboración de las curvas IDF de las cuatro cuencas, en este capítulo únicamente se presentarán las tablas de probabilidad de lluvia para cada estación, con su respectiva representación gráfica de las curvas para cada periodo de retorno.

Cabe destacar que en la representación gráfica únicamente aparecerán las ecuaciones para los periodos de retorno de 10, 20 y 50 años del modelo Wenzel, si se necesitara conocer las variables para utilizar las ecuaciones con otros periodos de retorno, se puede consultar en el capítulo 7, en el cual se encuentran las variables para los periodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50, 75 y 100 años, esto con el fin de tener ambas opciones, tanto la gráfica, como también la de un modelo matemático, para su utilización.

En la tabla II se presenta la cantidad de precipitación en milímetros, para los distintos periodos de retorno, utilizando la distribución normal en la estación climática Asunción Mita, ubicada en jurisdicción de la cuenca del río Ostúa-Güija, en el municipio de Moyuta en Jutiapa.

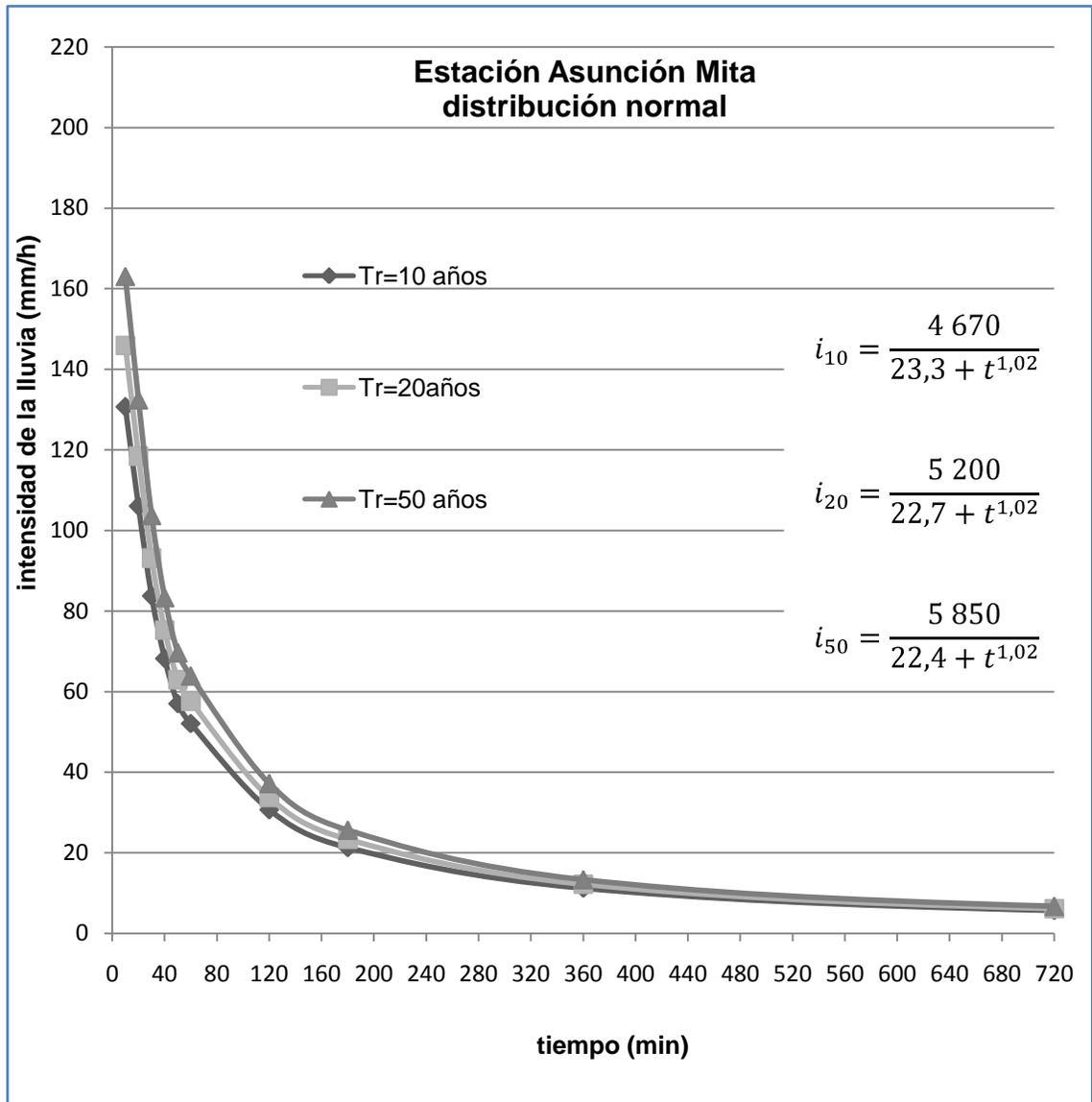
Tabla II. **Probabilidades de lluvia máxima para distribución normal en la estación climática Asunción Mita**

Probabilidad	Periodo de retorno	Distribución normal										
		Precipitación (mm)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	76,88	62,19	50,59	43,09	36,11	32,53	19,89	14,01	7,72	3,94	1,97
0,80	5	112,21	90,99	72,36	59,57	49,85	45,37	26,97	18,78	10,02	5,08	2,54
0,90	10	130,68	106,04	83,74	68,19	57,04	52,09	30,68	21,27	11,22	5,67	2,83
0,93	15	139,90	113,55	89,42	72,49	60,62	55,44	32,52	22,51	11,82	5,96	2,98
0,95	20	145,94	118,47	93,14	75,30	62,97	57,63	33,73	23,33	12,21	6,16	3,08
0,96	25	150,38	122,09	95,88	77,37	64,70	59,25	34,63	23,93	12,50	6,30	3,15
0,97	30	153,88	124,94	98,03	79,00	66,06	60,52	35,33	24,40	12,73	6,41	3,20
0,98	50	163,11	132,46	103,72	83,31	69,65	63,87	37,18	25,64	13,33	6,70	3,35
0,99	75	169,93	138,02	107,92	86,49	72,30	66,35	38,54	26,57	13,77	6,92	3,46
0,99	100	174,55	141,78	110,77	88,65	74,10	68,03	39,47	27,19	14,07	7,07	3,54

Fuente: elaboración propia.

La figura 14 representa la curva de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la distribución normal para la estación climática Asunción Mita.

Figura 14. **Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Asunción Mita, aplicando la distribución normal**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla III se presenta la cantidad de precipitación en milímetros para los distintos periodos de retorno, utilizando la distribución de Gumbel en la estación climática Asunción Mita.

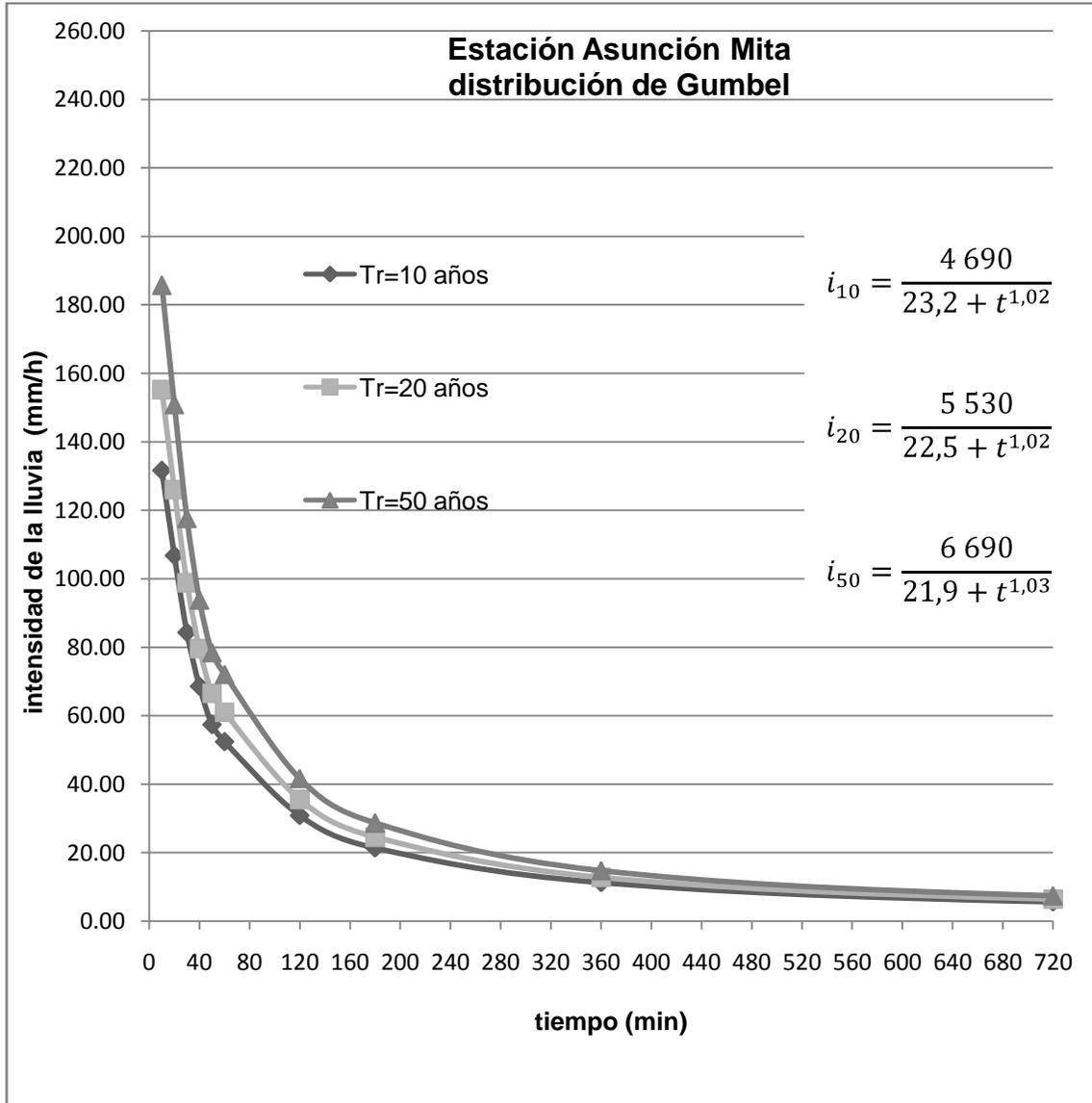
Tabla III. Probabilidades de lluvia máxima para distribución de Gumbel en la estación climática Asunción Mita

Probabilidad	Periodo de retorno	Distribución de Gumbel										
		Precipitación (mm)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	69,98	56,58	46,34	39,87	33,42	30,02	18,51	13,08	7,27	3,72	1,86
0,80	5	107,08	86,81	69,20	57,18	47,86	43,51	25,95	18,09	9,68	4,91	2,46
0,90	10	131,65	106,83	84,34	68,64	57,41	52,44	30,87	21,40	11,28	5,70	2,85
0,93	15	145,51	118,12	92,88	75,10	62,80	57,48	33,65	23,27	12,18	6,14	3,07
0,95	20	155,22	126,03	98,86	79,63	66,58	61,00	35,59	24,58	12,81	6,45	3,23
0,96	25	162,69	132,12	103,46	83,12	69,49	63,72	37,09	25,59	13,30	6,69	3,35
0,97	30	168,77	137,07	107,21	85,95	71,85	65,93	38,31	26,41	13,70	6,89	3,44
0,98	50	185,72	150,88	117,65	93,86	78,44	72,09	41,71	28,70	14,80	7,43	3,71
0,99	75	199,10	161,79	125,90	100,10	83,65	76,96	44,39	30,50	15,67	7,86	3,93
0,99	100	208,58	169,51	131,73	104,52	87,33	80,40	46,29	31,78	16,28	8,16	4,08

Fuente: elaboración propia.

La figura 15 representa la curva de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la distribución de Gumbel para la estación climática Asunción Mita.

Figura 15. **Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Asunción Mita, aplicando la distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla IV se presenta la cantidad de precipitación en milímetros para los distintos periodos de retorno, utilizando la distribución normal en la estación climática Esquipulas, ubicada en jurisdicción de la cuenca del río Olopa, municipio Esquipulas en el departamento de Chiquimula.

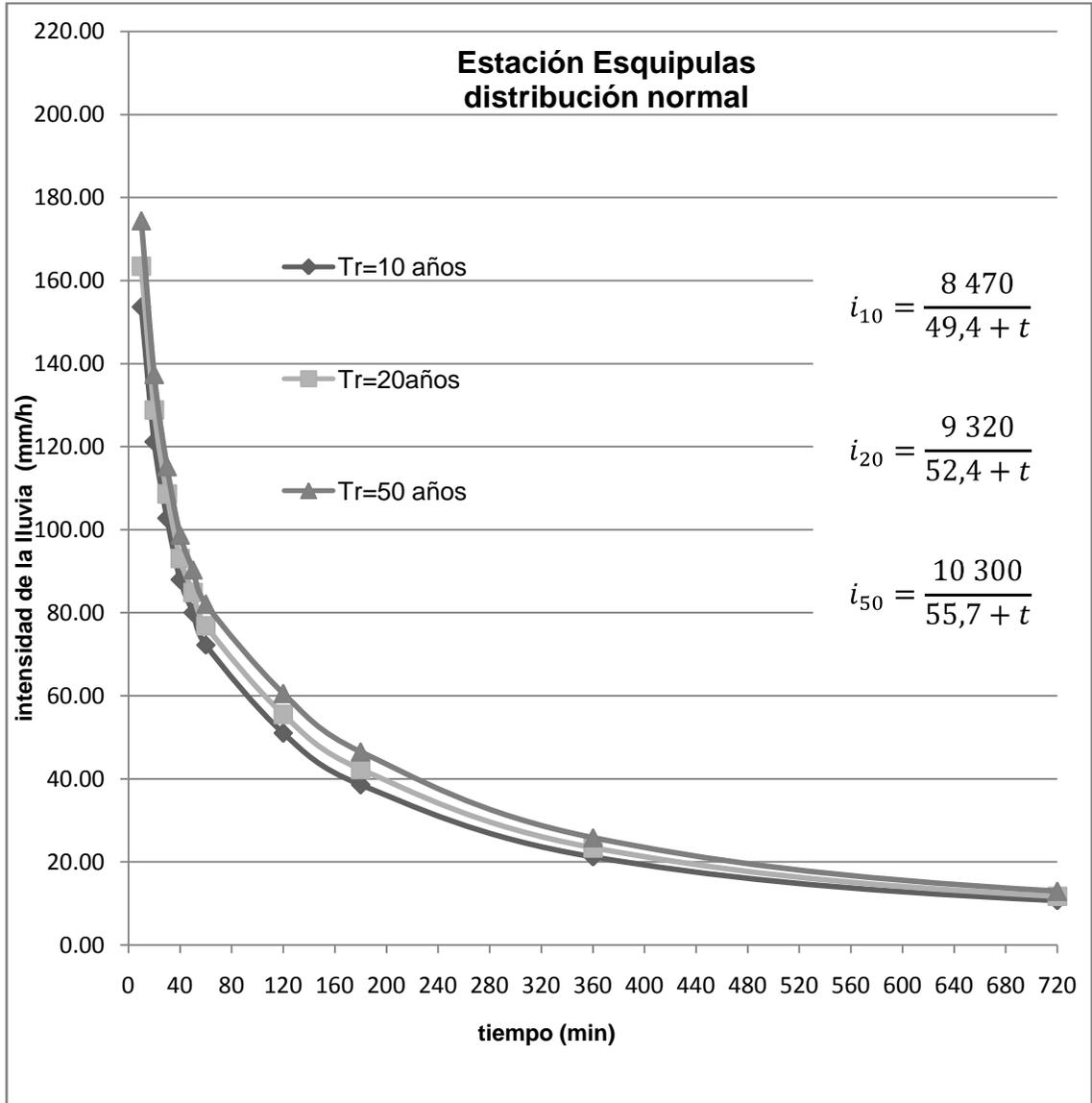
Tabla IV. **Probabilidades de lluvia máxima para distribución normal en la estación climática Esquipulas**

Probabilidad	Periodo de retorno	Distribución normal										
		Precipitación (mm)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	119,21	94,37	82,18	70,11	62,94	55,95	35,14	25,32	13,62	7,01	3,54
0,80	5	141,85	112,02	95,71	81,86	74,19	66,67	45,58	34,03	18,64	9,45	4,74
0,90	10	153,69	121,24	102,79	88,00	80,07	72,27	51,03	38,59	21,26	10,72	5,37
0,93	15	159,59	125,84	106,32	91,07	83,01	75,06	53,75	40,86	22,57	11,36	5,68
0,95	20	163,46	128,86	108,63	93,07	84,93	76,89	55,53	42,35	23,43	11,77	5,89
0,96	25	166,31	131,08	110,33	94,55	86,34	78,24	56,84	43,44	24,06	12,08	6,04
0,97	30	168,54	132,82	111,67	95,71	87,46	79,30	57,88	44,30	24,55	12,32	6,16
0,98	50	174,46	137,43	115,21	98,78	90,40	82,10	60,60	46,58	25,86	12,96	6,48
0,99	75	178,83	140,84	117,82	101,05	92,57	84,17	62,62	48,26	26,83	13,43	6,71
0,99	100	181,79	143,15	119,59	102,59	94,04	85,57	63,98	49,40	27,49	13,75	6,87

Fuente: elaboración propia.

La figura 16 representa la curva de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la distribución normal para la estación climática Esquipulas.

Figura 16. **Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Esquipulas, aplicando la distribución normal**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla V se presenta la cantidad de precipitación en milímetros para los distintos periodos de retorno, utilizando la distribución de Gumbel en la estación climática Esquipulas.

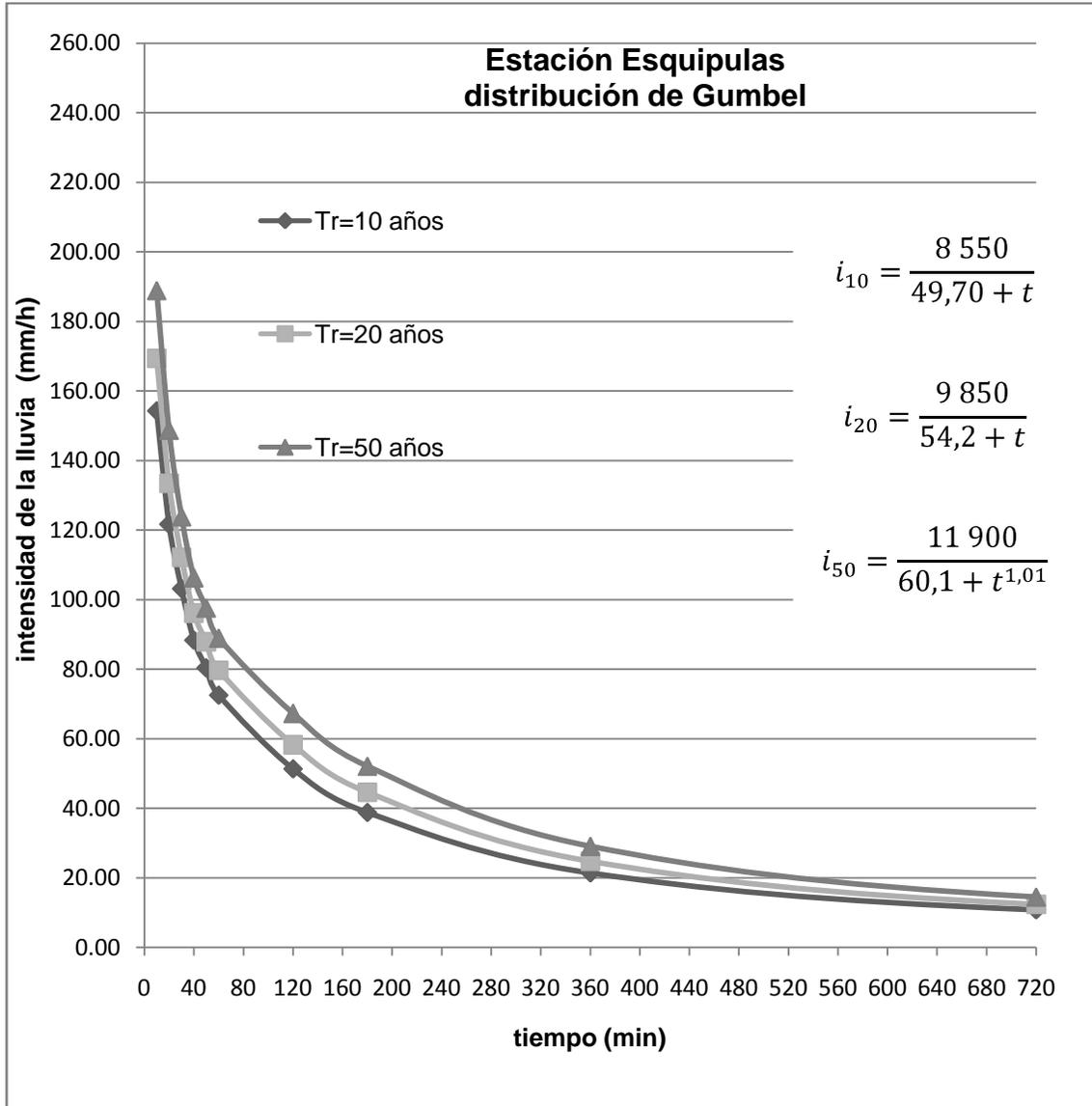
Tabla V. Probabilidades de lluvia máxima para distribución de Gumbel en la estación Climática Esquipulas

Probabilidad	Periodo de retorno	Distribución de Gumbel										
		Precipitación (mm)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	114,79	90,93	79,54	67,81	60,75	53,86	33,11	23,62	12,64	6,54	3,30
0,80	5	138,57	109,46	93,75	80,15	72,56	65,11	44,06	32,77	17,91	9,10	4,57
0,90	10	154,31	121,72	103,16	88,32	80,38	72,56	51,32	38,83	21,40	10,79	5,40
0,93	15	163,19	128,65	108,47	92,93	84,79	76,76	55,41	42,24	23,37	11,75	5,88
0,95	20	169,40	133,49	112,19	96,16	87,88	79,70	58,27	44,63	24,74	12,41	6,21
0,96	25	174,19	137,22	115,05	98,64	90,26	81,97	60,48	46,48	25,80	12,93	6,46
0,97	30	178,09	140,26	117,38	100,67	92,20	83,81	62,27	47,98	26,67	13,35	6,67
0,98	50	188,95	148,72	123,87	106,30	97,59	88,95	67,28	52,15	29,07	14,52	7,25
0,99	75	197,52	155,40	128,99	110,75	101,86	93,01	71,23	55,45	30,97	15,44	7,70
0,99	100	203,59	160,13	132,62	113,90	104,87	95,88	74,03	57,79	32,32	16,09	8,03

Fuente: elaboración propia.

La figura 17 representa las curvas de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la distribución de Gumbel para la estación climática Esquipulas.

Figura 17. **Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Esquipulas, aplicando la distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla VI se presenta la cantidad de precipitación en milímetros para los distintos periodos de retorno, utilizando la distribución normal en la estación climática La Ceibita, ubicada en jurisdicción de la cuenca Ostúa-Güija, municipio de Monjas, departamento de Jalapa.

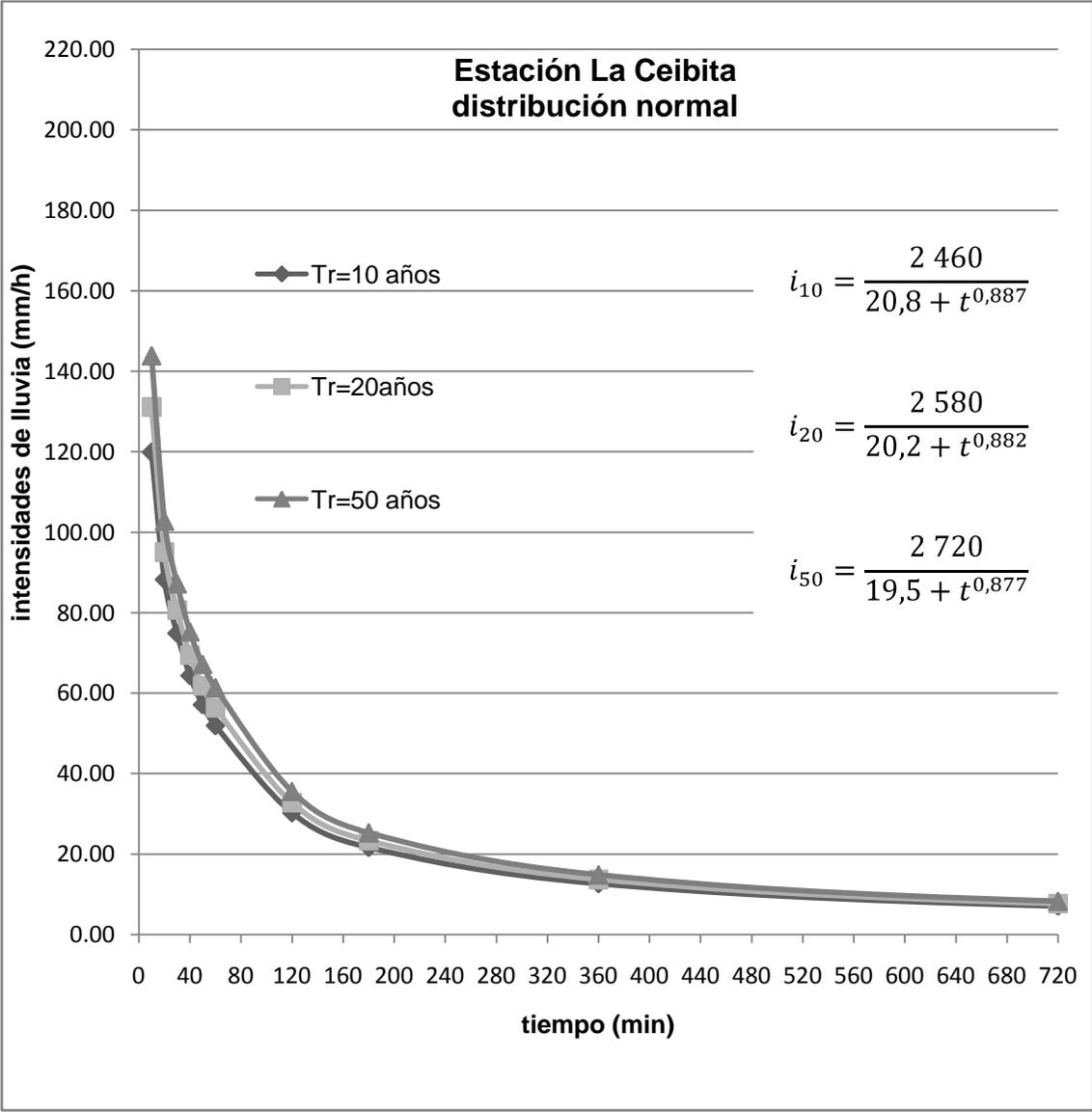
Tabla VI. **Probabilidades de lluvia máxima para distribución normal en la estación climática La Ceibita**

Probabilidad	Periodo de retorno	Distribución normal										
		Precipitación (mm)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	79,99	64,02	54,43	46,37	40,41	36,26	21,43	15,67	9,11	5,08	2,62
0,80	5	106,18	79,91	67,87	58,22	51,40	46,56	27,27	19,63	11,47	6,43	3,40
0,90	10	119,87	88,22	74,90	64,42	57,14	51,95	30,31	21,69	12,71	7,14	3,81
0,93	15	126,70	92,37	78,41	67,51	60,01	54,63	31,84	22,73	13,33	7,49	4,02
0,95	20	131,17	95,09	80,71	69,53	61,89	56,39	32,83	23,40	13,73	7,72	4,15
0,96	25	134,46	97,09	82,40	71,03	63,27	57,69	33,56	23,90	14,03	7,89	4,25
0,97	30	137,05	98,66	83,73	72,20	64,36	58,71	34,14	24,29	14,26	8,03	4,33
0,98	50	143,89	102,81	87,24	75,29	67,23	61,40	35,66	25,32	14,88	8,38	4,53
0,99	75	148,95	105,88	89,84	77,58	69,35	63,39	36,79	26,09	15,34	8,64	4,68
0,99	100	152,37	107,96	91,60	79,13	70,79	64,74	37,55	26,60	15,65	8,82	4,79

Fuente: elaboración propia

La figura 18 representa las curvas de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la distribución normal para la estación climática La Ceibita.

Figura 18. **Gráfico de las curvas IDF para la estación climática La Ceibita, aplicando la distribución normal**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla VII se presenta la cantidad de precipitación en milímetros para los distintos periodos de retorno, utilizando la distribución de Gumbel en la estación climática La Ceibita.

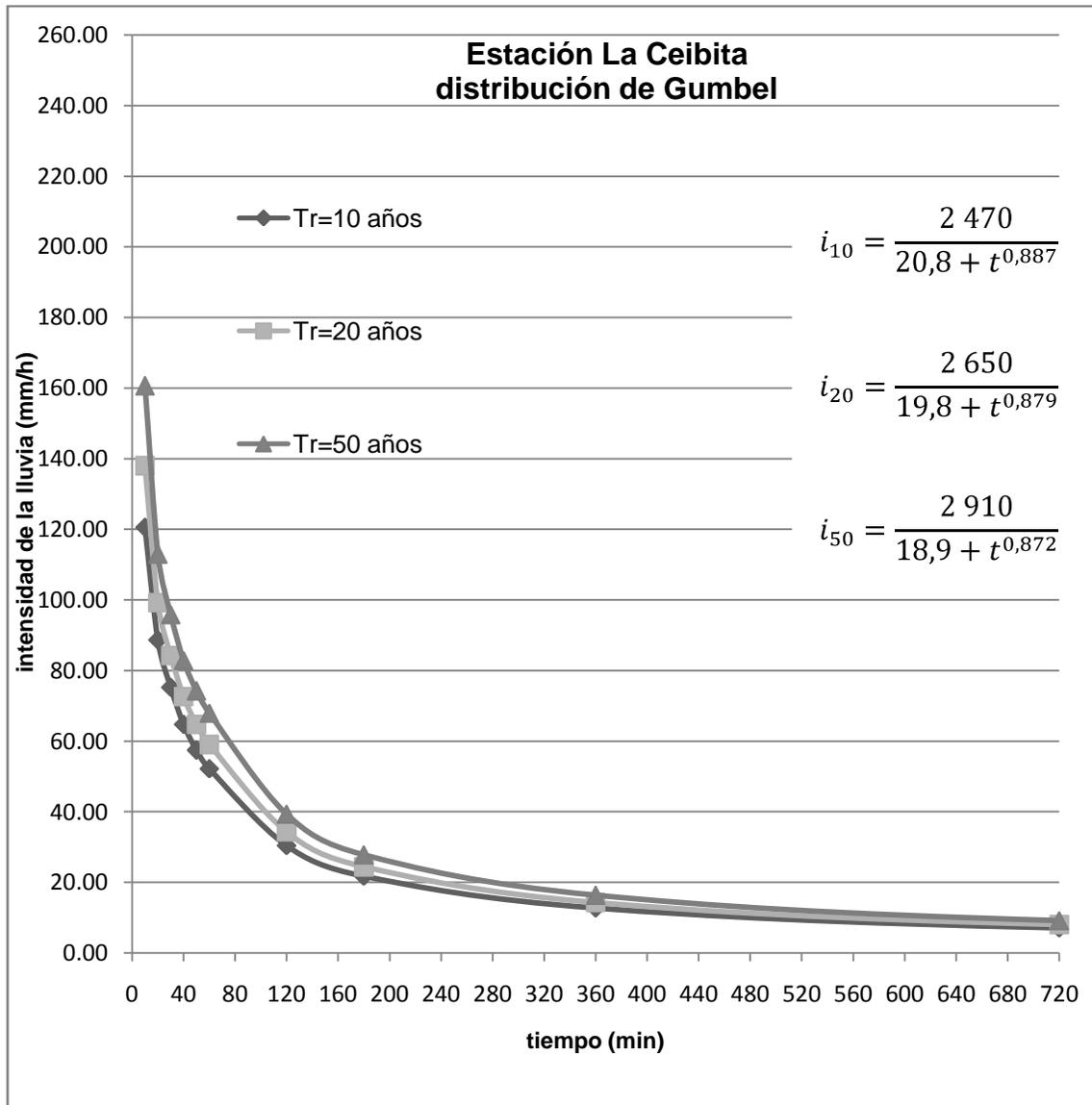
Tabla VII. **Probabilidades de lluvia máxima para distribución de Gumbel en la estación climática La Ceibita**

Probabilidad	Periodo de retorno	Distribución de Gumbel										
		Precipitación (mm)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	74,88	60,91	51,80	44,06	38,26	34,25	20,30	14,90	8,64	4,82	2,47
0,80	5	102,38	77,61	65,92	56,51	49,80	45,07	26,42	19,05	11,13	6,24	3,29
0,90	10	120,58	88,66	75,27	64,74	57,45	52,23	30,47	21,80	12,78	7,18	3,83
0,93	15	130,85	94,89	80,55	69,39	61,76	56,27	32,76	23,35	13,70	7,71	4,14
0,95	20	138,04	99,26	84,24	72,65	64,77	59,10	34,36	24,44	14,35	8,08	4,36
0,96	25	143,58	102,62	87,09	75,15	67,10	61,28	35,60	25,28	14,86	8,37	4,52
0,97	30	148,09	105,36	89,40	77,19	68,99	63,05	36,60	25,96	15,26	8,60	4,66
0,98	50	160,65	112,98	95,85	82,88	74,26	67,99	39,40	27,85	16,40	9,25	5,03
0,99	75	170,56	119,00	100,94	87,36	78,42	71,89	41,61	29,35	17,29	9,76	5,33
0,99	100	177,58	123,27	104,55	90,54	81,37	74,66	43,17	30,41	17,93	10,12	5,54

Fuente: elaboración propia.

La figura 19 representa las curvas de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la distribución de Gumbel para la estación climática La Ceibita.

Figura 19. **Gráfico de las curvas IDF para la estación climática La Ceibita, aplicando la distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

La tabla VIII indica la cantidad de precipitación en milímetros para los distintos periodos de retorno, utilizando la distribución normal en la estación climática Los Esclavos, ubicada en jurisdicción de la cuenca del río Los Esclavos, en el municipio de Cuilapa del departamento de Santa Rosa.

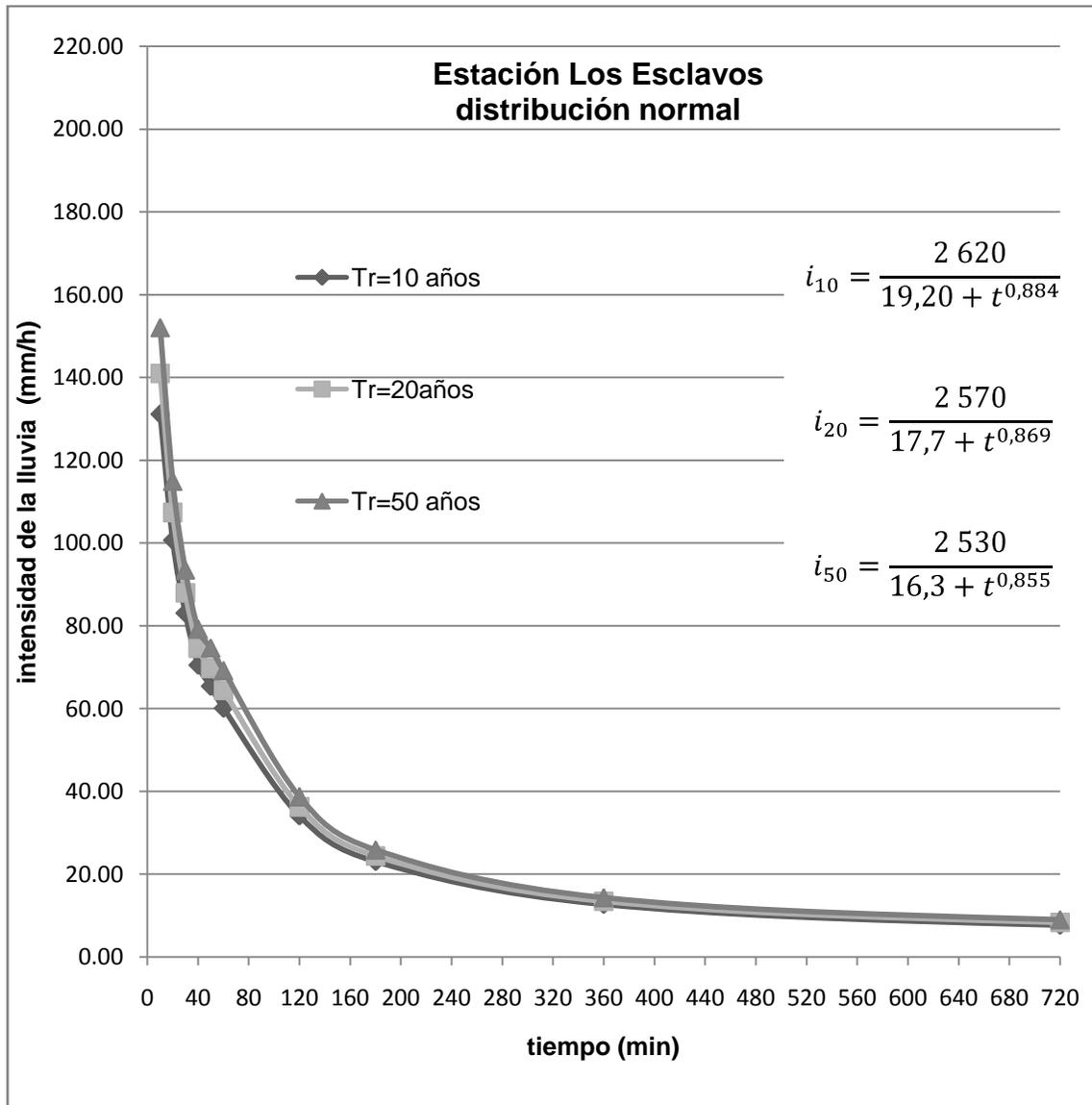
Tabla VIII. Probabilidades de lluvia máxima para distribución normal de la estación climática Los Esclavos

Probabilidad	Periodo de retorno	Distribución normal										
		Precipitación (mm)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	96,38	76,99	65,84	56,04	50,05	45,04	26,44	18,41	10,04	5,56	2,95
0,80	5	119,21	92,56	77,19	65,57	60,15	54,95	31,48	21,48	11,81	7,00	3,90
0,90	10	131,14	100,69	83,12	70,54	65,42	60,12	34,12	23,08	12,74	7,75	4,40
0,93	15	137,09	104,75	86,08	73,02	68,06	62,71	35,43	23,88	13,20	8,12	4,65
0,95	20	140,99	107,41	88,02	74,65	69,78	64,40	36,29	24,41	13,50	8,37	4,81
0,96	25	143,86	109,37	89,45	75,85	71,05	65,65	36,93	24,79	13,72	8,55	4,93
0,97	30	146,12	110,91	90,57	76,79	72,05	66,62	37,42	25,10	13,90	8,69	5,03
0,98	50	152,08	114,98	93,53	79,28	74,68	69,21	38,74	25,90	14,36	9,07	5,28
0,99	75	156,49	117,98	95,72	81,12	76,63	71,13	39,72	26,49	14,70	9,34	5,46
0,99	100	159,48	120,02	97,21	82,36	77,95	72,42	40,38	26,89	14,93	9,53	5,59

Fuente: elaboración propia.

La figura 20 representa las curvas de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la distribución normal, para la estación climática Los Esclavos.

Figura 20. **Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Los Esclavos, aplicando la distribución normal**



Fuente: elaboración propia.

La tabla IX indica la cantidad de precipitación en milímetros para los distintos periodos de retorno, utilizando la distribución de Gumbel en la estación climática Los Esclavos.

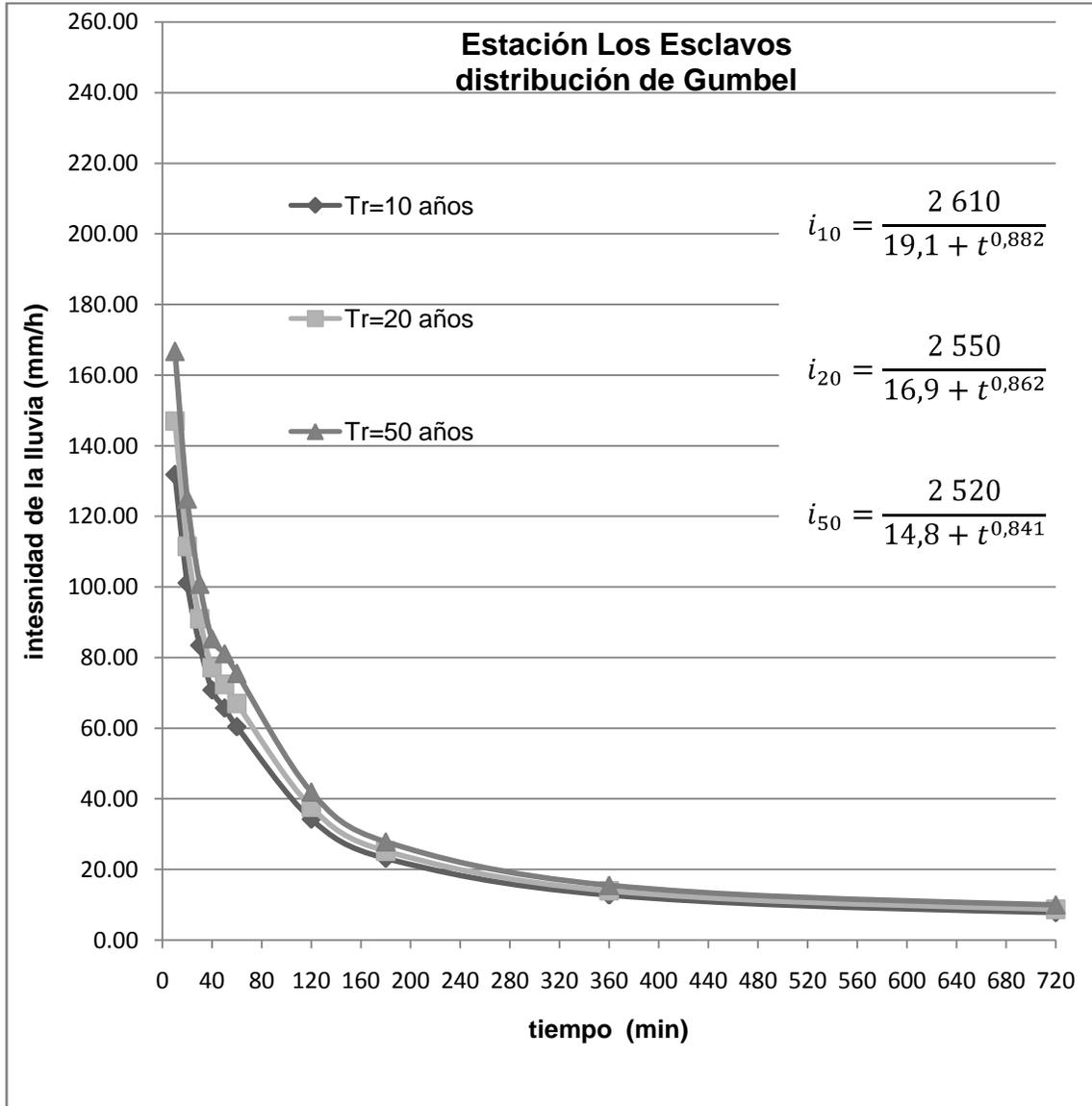
Tabla IX. **Probabilidades de lluvia máxima para distribución de Gumbel en la estación climática Los Esclavos**

Probabilidad	Periodo de retorno	Distribución de Gumbel										
		Precipitación (mm)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	91,92	73,95	63,63	54,19	48,08	43,11	25,45	17,81	9,69	5,28	2,76
0,80	5	115,89	90,30	75,54	64,18	58,68	53,51	30,75	21,03	11,55	6,79	3,76
0,90	10	131,76	101,12	83,43	70,80	65,70	60,40	34,25	23,17	12,78	7,79	4,43
0,93	15	140,72	107,22	87,88	74,54	69,66	64,28	36,23	24,37	13,48	8,35	4,80
0,95	20	146,99	111,50	91,00	77,15	72,43	67,00	37,62	25,21	13,97	8,75	5,06
0,96	25	151,81	114,79	93,40	79,16	74,57	69,10	38,68	25,86	14,34	9,05	5,27
0,97	30	155,74	117,47	95,35	80,80	76,30	70,80	39,55	26,39	14,65	9,30	5,43
0,98	50	166,69	124,94	100,79	85,37	81,14	75,55	41,97	27,86	15,49	9,99	5,89
0,99	75	175,34	130,83	105,09	88,97	84,97	79,30	43,88	29,03	16,17	10,53	6,25
0,99	100	181,46	135,01	108,13	91,53	87,67	81,96	45,23	29,85	16,64	10,92	6,51

Fuente: elaboración propia.

La figura 21 representa las curvas de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la distribución de Gumbel, para la estación climática Los Esclavos.

Figura 21. **Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Los Esclavos, aplicando la distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

La tabla X se presenta la cantidad de precipitación en milímetros para los distintos periodos de retorno, utilizando la distribución normal en la estación climática Montúfar, ubicada en jurisdicción de la cuenca del río Paz, en el municipio de Jutiapa del departamento de Jutiapa.

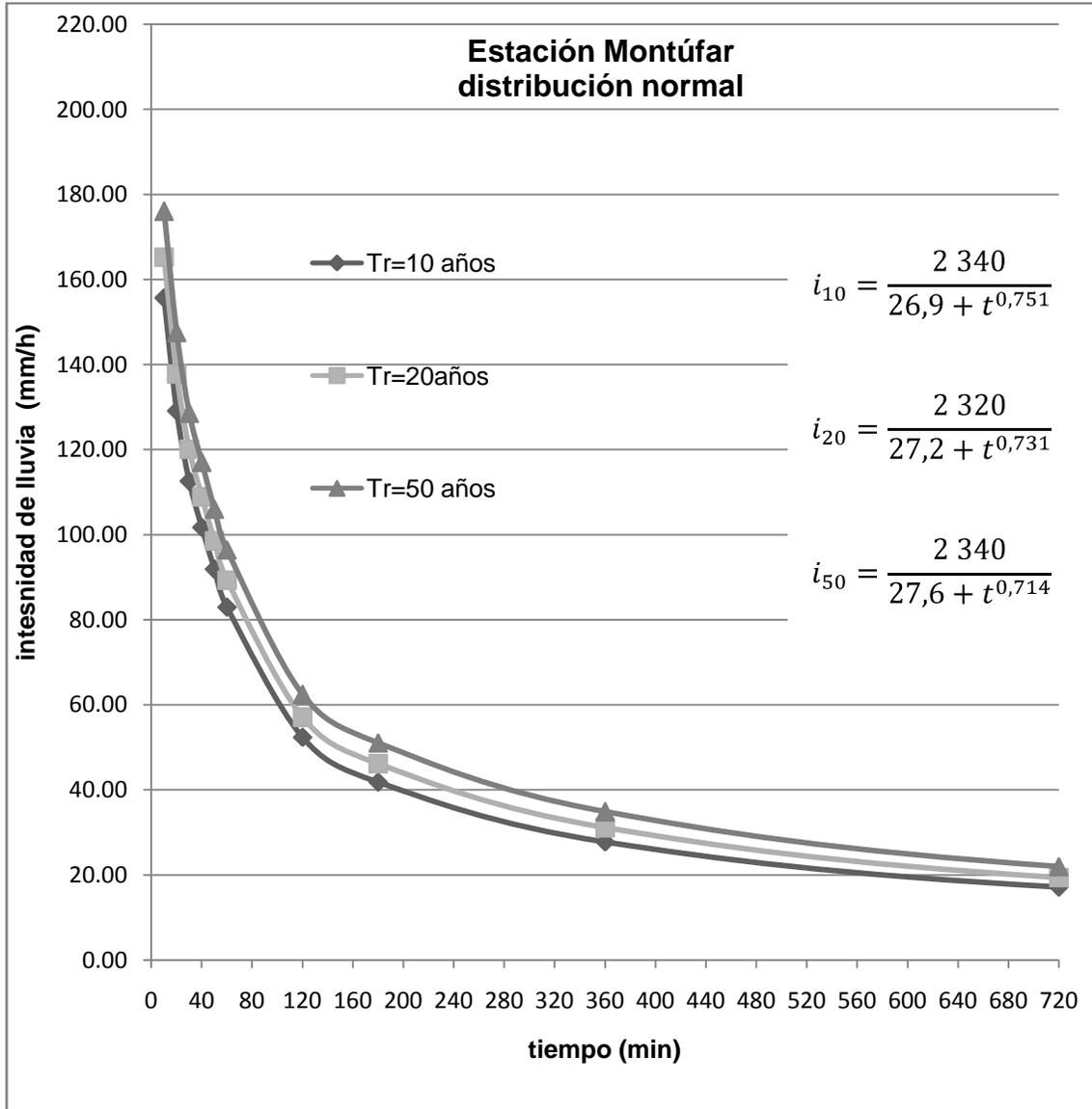
Tabla X. **Probabilidades de lluvia máxima para distribución normal en la estación climática Montúfar**

Probabilidad	Periodo de retorno	Distribución normal										
		Precipitación (mm)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	121,86	98,55	86,01	76,20	68,34	60,58	35,66	26,54	15,97	9,10	4,93
0,80	5	144,07	118,64	103,46	92,94	83,79	75,27	46,63	36,59	23,72	14,37	7,94
0,90	10	155,68	129,13	112,58	101,69	91,86	82,95	52,36	41,84	27,77	17,13	9,51
0,93	15	161,47	134,37	117,14	106,05	95,89	86,78	55,22	44,46	29,79	18,50	10,29
0,95	20	165,27	137,80	120,12	108,91	98,53	89,29	57,09	46,17	31,11	19,40	10,81
0,96	25	168,06	140,33	122,31	111,02	100,48	91,14	58,47	47,44	32,08	20,07	11,18
0,97	30	170,26	142,32	124,04	112,67	102,00	92,59	59,56	48,43	32,85	20,59	11,48
0,98	50	176,06	147,56	128,60	117,05	106,04	96,43	62,42	51,05	34,87	21,96	12,27
0,99	75	180,35	151,44	131,97	120,28	109,02	99,27	64,54	53,00	36,37	22,98	12,85
0,99	100	183,25	154,07	134,25	122,47	111,04	101,19	65,97	54,31	37,38	23,67	13,24

Fuente: elaboración propia.

La figura 22 representa las curvas de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la distribución normal para la estación climática Montúfar.

Figura 22. **Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Montúfar, aplicando la distribución normal**



Fuente: elaboración propia.

En la tabla XI se presenta la cantidad de precipitación en milímetros para los distintos periodos de retorno, utilizando la distribución de Gumbel en la estación climática Montúfar.

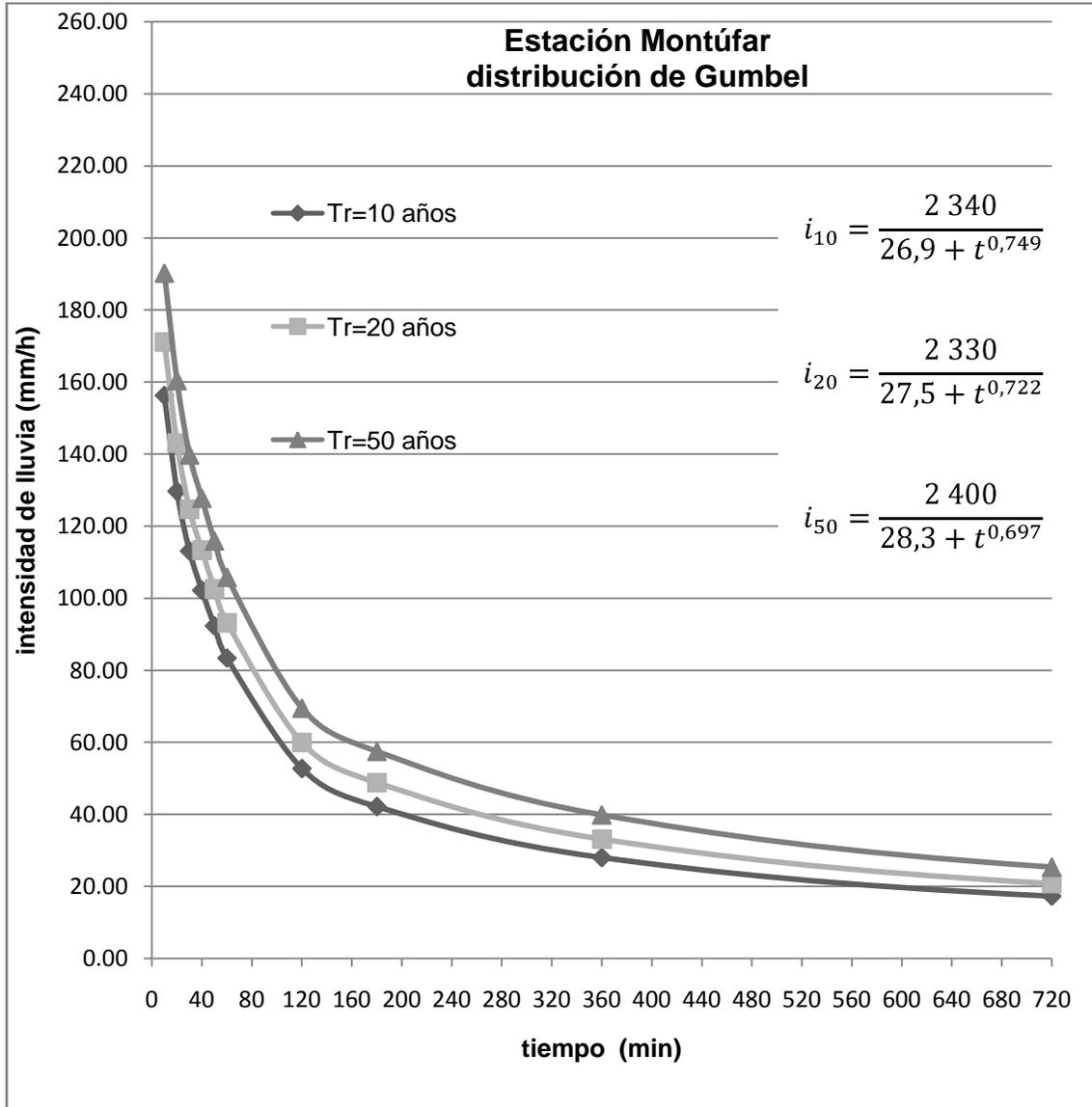
Tabla XI. **Probabilidades de lluvia máxima para distribución de Gumbel en la estación climática Montúfar**

Probabilidad	Periodo de retorno	Distribución de Gumbel										
		Precipitación (mm)										
		10	20	30	40	50	60	120	180	360	720	1440
0,50	2	117,53	94,63	82,60	72,93	65,33	57,71	33,52	24,58	14,46	8,08	4,34
0,80	5	140,85	115,72	100,93	90,51	81,55	73,14	45,04	35,13	22,59	13,61	7,50
0,90	10	156,29	129,68	113,06	102,15	92,29	83,35	52,66	42,11	27,98	17,27	9,59
0,93	15	165,00	137,56	119,91	108,71	98,35	89,12	56,96	46,05	31,02	19,34	10,77
0,95	20	171,10	143,08	124,70	113,31	102,59	93,15	59,97	48,81	33,14	20,79	11,59
0,96	25	175,80	147,33	128,39	116,85	105,86	96,26	62,29	50,94	34,78	21,90	12,23
0,97	30	179,62	150,78	131,39	119,73	108,52	98,79	64,18	52,67	36,12	22,81	12,75
0,98	50	190,27	160,42	139,76	127,76	115,93	105,84	69,44	57,48	39,83	25,34	14,19
0,99	75	198,68	168,02	146,37	134,10	121,78	111,40	73,59	61,29	42,77	27,33	15,33
0,99	100	204,64	173,41	151,05	138,59	125,92	115,34	76,53	63,98	44,84	28,75	16,13

Fuente: elaboración propia.

La figura 23 representa las curvas de intensidad, duración y frecuencia, utilizando la distribución de Gumbel para la estación climática Montúfar.

Figura 23. **Gráfico de las curvas IDF para la estación climática Montúfar, aplicando la distribución de Gumbel**



Fuente: elaboración propia.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se analiza la región en estudio, qué modelo se ajusta más a cada una de las regiones y la importancia de realizar el mismo en la región. Teniendo ya las curvas IDF de las diferentes cuencas, es de gran ayuda generar modelos matemáticos que representen a las mismas, con el fin de que cada persona que las utilice pueda tener ambas opciones cuando necesite obtener datos sobre determinada cuenca.

Para esto se ajustaron todos los datos a ecuaciones matemáticas, utilizando como herramienta la página web [http: www.zunzun.com](http://www.zunzun.com), la cual ofrece una gran variedad de herramientas para obtener datos matemáticos y estadísticos. En este estudio los principales datos a obtener fueron, las variables para las ecuaciones de los modelos Estándar y Wenzel, como también la sumatoria del error relativo al cuadrado, que más adelante, en este capítulo, se describe el mismo con detalle.

7.1. Comparación de modelos

El siguiente análisis es importante para determinar que modelo se ajustó más a cada cuenca y, para ello, todo se basa en las siguientes ecuaciones de los modelos:

$$I = \frac{a}{(X+b)^n}$$

Estándar

$$I = \frac{a}{X^{n+b}}$$

Wenzel

La tabla XII contiene los coeficientes a utilizar en las ecuaciones que representan las curvas IDF, asimismo, la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para el modelo Estándar de la estación climática Asunción Mita.

Tabla XII. **Variables del modelo Estándar para la estación climática Asunción Mita**

Asunción Mita	Modelo Estándar							
	Distribución normal				Distribución de Gumbel			
Periodo de retorno	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.
2	2,82E+03	2,73E+01	9,94E-01	3,06E-03	2,60E+03	2,84E+01	9,91E-01	3,07E-03
5	3,99E+03	2,41E+01	1,01E+00	4,13E-03	3,81E+03	2,44E+01	1,01E+00	3,88E-03
10	4,67E+03	2,33E+01	1,02E+00	4,89E-03	4,69E+03	2,32E+01	1,02E+00	4,91E-03
15	4,99E+03	2,30E+01	1,02E+00	5,24E-03	5,20E+03	2,28E+01	1,02E+00	5,46E-03
20	5,20E+03	2,27E+01	1,02E+00	5,45E-03	5,53E+03	2,25E+01	1,02E+00	5,80E-03
25	5,37E+03	2,26E+01	1,02E+00	5,64E-03	5,81E+03	2,23E+01	1,02E+00	6,06E-03
30	5,52E+03	2,26E+01	1,02E+00	5,78E-03	6,05E+03	2,22E+01	1,03E+00	6,29E-03
50	5,85E+03	2,24E+01	1,02E+00	6,10E-03	6,69E+03	2,19E+01	1,03E+00	6,83E-03
75	6,10E+03	2,22E+01	1,03E+00	6,33E-03	7,16E+03	2,17E+01	1,03E+00	7,22E-03
100	6,24E+03	2,21E+01	1,03E+00	6,47E-03	7,52E+03	2,16E+01	1,03E+00	7,49E-03

Fuente: elaboración propia.

La tabla XIII contiene los coeficientes a utilizar en las ecuaciones que representan las curvas IDF, asimismo, la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para el modelo Wenzel de la estación climática Asunción Mita.

Tabla XIII. **Variables del modelo Wenzel para la estación climática Asunción Mita**

Asunción Mita	Modelo Wenzel							
	Distribución normal				Distribución de Gumbel			
Periodo de retorno	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.
2	2,82E+03	2,67E+01	9,94E-01	3,02E-03	2,61E+03	2,75E+01	9,91E-01	3,01E-03
5	3,94E+03	2,45E+01	1,01E+00	4,15E-03	3,77E+03	2,47E+01	1,00E+00	3,90E-03
10	4,57E+03	2,42E+01	1,01E+00	4,92E-03	4,59E+03	2,40E+01	1,01E+00	4,94E-03
15	4,87E+03	2,39E+01	1,01E+00	5,27E-03	5,06E+03	2,39E+01	1,02E+00	5,49E-03
20	5,07E+03	2,38E+01	1,02E+00	5,48E-03	5,38E+03	2,37E+01	1,02E+00	5,81E-03
25	5,22E+03	2,38E+01	1,02E+00	5,66E-03	5,64E+03	2,36E+01	1,02E+00	6,07E-03
30	5,36E+03	2,38E+01	1,02E+00	5,81E-03	5,86E+03	2,36E+01	1,02E+00	6,30E-03
50	5,67E+03	2,37E+01	1,02E+00	6,12E-03	6,45E+03	2,35E+01	1,02E+00	6,84E-03
75	5,90E+03	2,36E+01	1,02E+00	6,34E-03	6,90E+03	2,34E+01	1,03E+00	7,21E-03
100	6,04E+03	2,35E+01	1,02E+00	6,47E-03	7,23E+03	2,33E+01	1,03E+00	7,47E-03

Fuente: elaboración propia.

La tabla XIV contiene los coeficientes a utilizar en las ecuaciones que representan las curvas IDF, asimismo, la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para el modelo Estándar de la estación climática Esquipulas.

Tabla XIV. **Variables del modelo Estándar para la estación climática Esquipulas**

Esquipulas	Modelo Estándar							
	Distribución normal				Distribución de Gumbel			
Periodo de retorno	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.
2	6,12E+03	3,85E+01	1,02E+00	1,54E-03	5,92E+03	3,71E+01	1,03E+00	9,49E-04
5	7,56E+03	4,57E+01	1,01E+00	1,53E-02	7,29E+03	4,46E+01	1,01E+00	1,27E-02
10	8,47E+03	4,94E+01	1,00E+00	2,50E-02	8,55E+03	4,97E+01	1,00E+00	2,56E-02
15	9,00E+03	5,13E+01	1,00E+00	2,99E-02	9,26E+03	5,23E+01	1,00E+00	3,27E-02
20	9,32E+03	5,24E+01	1,00E+00	3,30E-02	9,85E+03	5,42E+01	1,00E+00	3,77E-02
25	9,59E+03	5,33E+01	1,00E+00	3,53E-02	1,04E+04	5,57E+01	1,00E+00	4,15E-02
30	9,80E+03	5,40E+01	1,00E+00	3,71E-02	1,07E+04	5,69E+01	1,00E+00	4,45E-02
50	1,03E+04	5,57E+01	1,00E+00	4,16E-02	1,19E+04	6,01E+01	1,01E+00	5,24E-02
75	1,08E+04	5,71E+01	1,00E+00	4,50E-02	1,30E+04	6,28E+01	1,01E+00	5,84E-02
100	1,11E+04	5,80E+01	1,01E+00	4,72E-02	1,37E+04	6,45E+01	1,01E+00	6,23E-02

Fuente: elaboración propia.

La tabla XV contiene los coeficientes a utilizar en las ecuaciones que representan las curvas IDF, asimismo, la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para el modelo Wenzel de la estación climática Esquipulas.

Tabla XV. **Variables del modelo Wenzel para la estación climática Esquipulas**

Esquipulas	Modelo Wenzel							
	Distribución normal				Distribución de Gumbel			
Periodo de retorno	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.
2	5,84E+03	3,98E+01	1,01E+00	1,71E-03	5,65E+03	3,94E+01	1,02E+00	1,00E-03
5	7,10E+03	4,34E+01	9,97E-01	1,54E-02	6,88E+03	4,27E+01	9,98E-01	1,28E-02
10	7,83E+03	4,54E+01	9,91E-01	2,48E-02	7,88E+03	4,56E+01	9,91E-01	2,54E-02
15	8,23E+03	4,65E+01	9,90E-01	2,97E-02	8,44E+03	4,69E+01	9,88E-01	3,24E-02
20	8,47E+03	4,71E+01	9,89E-01	3,27E-02	8,86E+03	4,81E+01	9,87E-01	3,73E-02
25	8,67E+03	4,76E+01	9,88E-01	3,50E-02	9,22E+03	4,91E+01	9,87E-01	4,12E-02
30	8,82E+03	4,80E+01	9,88E-01	3,67E-02	9,49E+03	4,97E+01	9,86E-01	4,41E-02
50	9,22E+03	4,90E+01	9,86E-01	4,13E-02	1,03E+04	5,17E+01	9,85E-01	5,20E-02
75	9,54E+03	4,99E+01	9,86E-01	4,46E-02	1,10E+04	5,34E+01	9,85E-01	5,80E-02
100	9,75E+03	5,03E+01	9,85E-01	4,68E-02	1,14E+04	5,44E+01	9,85E-01	6,20E-02

Fuente: elaboración propia.

La tabla XVI contiene los coeficientes a utilizar en las ecuaciones que representan las curvas IDF, asimismo, la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para el modelo Estándar de la estación climática La Ceibita.

Tabla XVI. Variables del modelo Estándar para la estación climática La Ceibita

La Ceibita	Modelo Estándar							
	Distribución normal				Distribución de Gumbel			
Periodo de retorno	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.
2	2,07E+03	2,48E+01	9,13E-01	3,18E-03	2,03E+03	2,56E+01	9,18E-01	3,83E-03
5	2,32E+03	2,19E+01	8,94E-01	3,52E-03	2,27E+03	2,22E+01	8,96E-01	3,27E-03
10	2,46E+03	2,08E+01	8,87E-01	4,88E-03	2,47E+03	2,08E+01	8,87E-01	4,97E-03
15	2,53E+03	2,04E+01	8,83E-01	5,56E-03	2,57E+03	2,02E+01	8,82E-01	6,10E-03
20	2,58E+03	2,02E+01	8,82E-01	6,09E-03	2,65E+03	1,98E+01	8,79E-01	6,89E-03
25	2,61E+03	2,00E+01	8,81E-01	6,46E-03	2,72E+03	1,96E+01	8,77E-01	7,56E-03
30	2,64E+03	1,98E+01	8,79E-01	6,78E-03	2,76E+03	1,93E+01	8,76E-01	8,05E-03
50	2,72E+03	1,95E+01	8,77E-01	7,59E-03	2,91E+03	1,89E+01	8,72E-01	9,51E-03
75	2,78E+03	1,93E+01	8,76E-01	8,15E-03	3,02E+03	1,85E+01	8,70E-01	1,06E-02
100	2,81E+03	1,91E+01	8,74E-01	8,56E-03	3,10E+03	1,83E+01	8,68E-01	1,13E-02

Fuente: elaboración propia.

La tabla XVII contiene los coeficientes a utilizar en las ecuaciones que representan las curvas IDF, asimismo, la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para el modelo Wenzel de la estación climática La Ceibita.

Tabla XVII. **Variables del modelo Wenzel para la estación climática La Ceibita**

La Ceibita	Modelo Wenzel							
	Distribución normal				Distribución de Gumbel			
Periodo de retorno	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.
2	2,34E+03	2,02E+01	9,30E-01	3,64E-03	2,28E+03	2,12E+01	9,34E-01	4,36E-03
5	2,65E+03	1,69E+01	9,12E-01	3,69E-03	2,59E+03	1,72E+01	9,13E-01	3,50E-03
10	2,81E+03	1,57E+01	9,05E-01	4,92E-03	2,82E+03	1,57E+01	9,05E-01	4,99E-03
15	2,90E+03	1,53E+01	9,02E-01	5,54E-03	2,95E+03	1,50E+01	9,00E-01	6,04E-03
20	2,96E+03	1,50E+01	9,00E-01	6,03E-03	3,04E+03	1,46E+01	8,97E-01	6,78E-03
25	3,00E+03	1,48E+01	8,99E-01	6,38E-03	3,12E+03	1,44E+01	8,96E-01	7,38E-03
30	3,03E+03	1,46E+01	8,98E-01	6,68E-03	3,17E+03	1,41E+01	8,94E-01	7,85E-03
50	3,12E+03	1,43E+01	8,96E-01	7,42E-03	3,35E+03	1,37E+01	8,91E-01	9,21E-03
75	3,19E+03	1,41E+01	8,94E-01	7,94E-03	3,48E+03	1,33E+01	8,89E-01	1,02E-02
100	3,23E+03	1,39E+01	8,93E-01	8,34E-03	3,57E+03	1,31E+01	8,87E-01	1,09E-02

Fuente: elaboración propia.

La tabla XVIII contiene los coeficientes a utilizar en las ecuaciones que representan las curvas IDF, asimismo, la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para el modelo Estándar de la estación climática Los Esclavos.

Tabla XVIII. **Variables del modelo Estándar para la estación climática Los Esclavos**

Los Esclavos	Modelo Estándar							
	Distribución normal				Distribución de Gumbel			
Periodo de retorno	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.
2	3,25E+03	2,79E+01	9,63E-01	5,11E-03	3,44E+03	2,97E+01	9,80E-01	3,55E-03
5	2,74E+03	2,14E+01	9,05E-01	1,64E-02	2,78E+03	2,22E+01	9,12E-01	1,46E-02
10	2,62E+03	1,92E+01	8,84E-01	2,32E-02	2,61E+03	1,91E+01	8,82E-01	2,38E-02
15	2,58E+03	1,82E+01	8,75E-01	2,67E-02	2,57E+03	1,77E+01	8,70E-01	2,87E-02
20	2,57E+03	1,77E+01	8,69E-01	2,88E-02	2,55E+03	1,69E+01	8,62E-01	3,22E-02
25	2,56E+03	1,73E+01	8,66E-01	3,05E-02	2,53E+03	1,63E+01	8,56E-01	3,51E-02
30	2,54E+03	1,70E+01	8,63E-01	3,18E-02	2,52E+03	1,59E+01	8,52E-01	3,70E-02
50	2,53E+03	1,63E+01	8,55E-01	3,52E-02	2,52E+03	1,48E+01	8,41E-01	4,30E-02
75	2,53E+03	1,58E+01	8,51E-01	3,75E-02	2,52E+03	1,41E+01	8,34E-01	4,71E-02
100	2,52E+03	1,55E+01	8,48E-01	3,92E-02	2,53E+03	1,36E+01	8,29E-01	5,03E-02

Fuente: elaboración propia.

La tabla XIX contiene los coeficientes a utilizar en las ecuaciones que representan las curvas IDF, asimismo, la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para el modelo Wenzel de la estación climática Los Esclavos.

Tabla XIX. **Variables del modelo Wenzel para la estación climática Los Esclavos**

Los Esclavos	Modelo Wenzel							
	Distribución normal				Distribución de Gumbel			
Periodo de retorno	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.
2	3,47E+03	2,60E+01	9,73E-01	5,64E-03	3,60E+03	2,89E+01	9,86E-01	3,81E-03
5	3,12E+03	1,73E+01	9,23E-01	1,83E-02	3,15E+03	1,82E+01	9,29E-01	1,63E-02
10	3,03E+03	1,46E+01	9,03E-01	2,56E-02	3,02E+03	1,45E+01	9,02E-01	2,62E-02
15	3,00E+03	1,36E+01	8,95E-01	2,93E-02	2,99E+03	1,30E+01	8,91E-01	3,15E-02
20	2,99E+03	1,30E+01	8,90E-01	3,16E-02	2,97E+03	1,22E+01	8,83E-01	3,51E-02
25	2,98E+03	1,26E+01	8,87E-01	3,34E-02	2,96E+03	1,15E+01	8,77E-01	3,82E-02
30	2,97E+03	1,23E+01	8,84E-01	3,48E-02	2,96E+03	1,11E+01	8,73E-01	4,03E-02
50	2,96E+03	1,15E+01	8,77E-01	3,83E-02	2,95E+03	1,00E+01	8,63E-01	4,65E-02
75	2,96E+03	1,10E+01	8,73E-01	4,08E-02	2,96E+03	9,34E+00	8,56E-01	5,08E-02
100	2,95E+03	1,07E+01	8,70E-01	4,26E-02	2,97E+03	8,88E+00	8,51E-01	5,41E-02

Fuente: elaboración propia.

La tabla XX contiene los coeficientes a utilizar en las ecuaciones que representan las curvas IDF, asimismo, la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para el modelo Estándar de la estación climática Montúfar.

Tabla XX. **Variables del modelo Estándar para la estación climática Montúfar**

Montúfar	Modelo Estándar							
	Distribución normal				Distribución de Gumbel			
Periodo de retorno	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.
2	3,04E+03	2,78E+01	8,81E-01	7,96E-03	3,35E+03	2,85E+01	9,13E-01	8,46E-03
5	2,42E+03	2,67E+01	7,81E-01	8,34E-03	2,46E+03	2,67E+01	7,91E-01	8,14E-03
10	2,34E+03	2,69E+01	7,51E-01	9,45E-03	2,34E+03	2,69E+01	7,49E-01	9,51E-03
15	2,33E+03	2,71E+01	7,39E-01	1,01E-02	2,33E+03	2,72E+01	7,32E-01	1,04E-02
20	2,32E+03	2,72E+01	7,31E-01	1,04E-02	2,33E+03	2,75E+01	7,22E-01	1,11E-02
25	2,33E+03	2,73E+01	7,27E-01	1,08E-02	2,34E+03	2,76E+01	7,15E-01	1,16E-02
30	2,33E+03	2,74E+01	7,23E-01	1,10E-02	2,35E+03	2,78E+01	7,09E-01	1,20E-02
50	2,34E+03	2,76E+01	7,14E-01	1,16E-02	2,40E+03	2,83E+01	6,97E-01	1,31E-02
75	2,35E+03	2,78E+01	7,08E-01	1,20E-02	2,44E+03	2,88E+01	6,88E-01	1,40E-02
100	2,36E+03	2,80E+01	7,05E-01	1,24E-02	2,48E+03	2,91E+01	6,83E-01	1,46E-02

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXI contiene los coeficientes a utilizar en las ecuaciones que representan las curvas IDF, asimismo, la sumatoria de los errores relativos al cuadrado para el modelo Wenzel de la estación climática Montúfar.

Tabla XXI. **Variables del modelo Wenzel para la estación climática Montúfar**

Montúfar	Modelo Wenzel							
	Distribución normal				Distribución de Gumbel			
Periodo de retorno	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.	a	b	n	Sumatoria del error relativo al cuadrado.
2	3,65E+03	2,12E+01	9,06E-01	9,57E-03	3,86E+03	2,36E+01	9,32E-01	9,84E-03
5	3,32E+03	1,60E+01	8,23E-01	9,36E-03	3,33E+03	1,64E+01	8,31E-01	9,33E-03
10	3,37E+03	1,51E+01	7,98E-01	9,81E-03	3,38E+03	1,50E+01	7,97E-01	9,83E-03
15	3,42E+03	1,48E+01	7,88E-01	1,01E-02	3,46E+03	1,46E+01	7,83E-01	1,03E-02
20	3,46E+03	1,46E+01	7,83E-01	1,02E-02	3,53E+03	1,44E+01	7,75E-01	1,06E-02
25	3,49E+03	1,45E+01	7,79E-01	1,04E-02	3,59E+03	1,43E+01	7,70E-01	1,08E-02
30	3,52E+03	1,45E+01	7,76E-01	1,05E-02	3,64E+03	1,43E+01	7,66E-01	1,10E-02
50	3,59E+03	1,43E+01	7,69E-01	1,08E-02	3,81E+03	1,42E+01	7,56E-01	1,16E-02
75	3,65E+03	1,42E+01	7,65E-01	1,10E-02	3,95E+03	1,41E+01	7,50E-01	1,21E-02
100	3,70E+03	1,42E+01	7,62E-01	1,12E-02	4,06E+03	1,42E+01	7,46E-01	1,25E-02

Fuente: elaboración propia.

7.1.1. Error relativo

Es la división entre el error absoluto y el valor exacto. Si se multiplica por 100 se obtiene el tanto por ciento de error. Al igual que el error absoluto puede ser positivo o negativo, según lo sea el error absoluto, porque puede ser por exceso o por defecto y, además no tiene unidades.

A continuación se presentan tablas de comparación entre los modelos Estándar y Wenzel, con sus respectivos errores relativos, los cuales indicarán qué modelo produce menos error, lo cual se traduce en cuál será el modelo que más se ajuste a la estación en estudio.

La tabla XXII presenta la diferencia de errores entre los modelos Estándar y Wenzel, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Asunción Mita.

Tabla XXII. **Sumatoria de los errores relativos al cuadrado en la estación climática Asunción Mita**

Asunción Mita	Distribución normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo Estándar (x)	Modelo Wenzel (y)	Diferencia (x-y)	Modelo Estándar (x)	Modelo Wenzel (y)	Diferencia (x-y)
2	3,06E-03	3,02E-03	3,79E-05	3,07E-03	3,01E-03	6,77E-05
5	4,13E-03	4,15E-03	-2,46E-05	3,88E-03	3,90E-03	-1,95E-05
10	4,89E-03	4,92E-03	-3,34E-05	4,91E-03	4,94E-03	-2,87E-05
15	5,24E-03	5,27E-03	-2,84E-05	5,46E-03	5,49E-03	-2,59E-05
20	5,45E-03	5,48E-03	-2,36E-05	5,80E-03	5,81E-03	-1,64E-05
25	5,64E-03	5,66E-03	-2,29E-05	6,06E-03	6,07E-03	-1,23E-05
30	5,78E-03	5,81E-03	-2,67E-05	6,29E-03	6,30E-03	-1,62E-05
50	6,10E-03	6,12E-03	-1,80E-05	6,83E-03	6,84E-03	-4,77E-06
75	6,33E-03	6,34E-03	-1,29E-05	7,22E-03	7,21E-03	1,16E-05
100	6,47E-03	6,47E-03	-4,03E-06	7,49E-03	7,47E-03	1,87E-05

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXIII presenta la diferencia de errores entre los modelos Estándar y Wenzel, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Esquipulas.

Tabla XXIII. **Sumatoria de los errores relativos al cuadrado en la estación climática Esquipulas**

Esquipulas	Distribución normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo Estándar (x)	Modelo Wenzel (y)	Diferencia (x-y)	Modelo Estándar (x)	Modelo Wenzel (y)	Diferencia (x-y)
2	1,54E-03	1,71E-03	-1,62E-04	9,49E-04	1,00E-03	-5,40E-05
5	1,53E-02	1,54E-02	-2,39E-05	1,27E-02	1,28E-02	-5,63E-05
10	2,50E-02	2,48E-02	1,61E-04	2,56E-02	2,54E-02	1,57E-04
15	2,99E-02	2,97E-02	2,22E-04	3,27E-02	3,24E-02	3,04E-04
20	3,30E-02	3,27E-02	2,80E-04	3,77E-02	3,73E-02	3,53E-04
25	3,53E-02	3,50E-02	3,04E-04	4,15E-02	4,12E-02	3,58E-04
30	3,71E-02	3,67E-02	3,24E-04	4,45E-02	4,41E-02	3,86E-04
50	4,16E-02	4,13E-02	3,88E-04	5,24E-02	5,20E-02	4,03E-04
75	4,50E-02	4,46E-02	3,90E-04	5,84E-02	5,80E-02	3,31E-04
100	4,72E-02	4,68E-02	4,08E-04	6,23E-02	6,20E-02	3,19E-04

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXIV presenta la diferencia de errores entre los modelos Estándar y Wenzel, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática La Ceibita.

Tabla XXIV. **Sumatoria de los errores relativos al cuadrado en la estación climática la Ceibita**

La Ceibita	Distribución normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo Estándar (x)	Modelo Wenzel (y)	Diferencia (x-y)	Modelo Estándar (x)	Modelo Wenzel (y)	Diferencia (x-y)
2	3,18E-03	3,64E-03	-4,65E-04	3,83E-03	4,36E-03	-5,28E-04
5	3,52E-03	3,69E-03	-1,73E-04	3,27E-03	3,50E-03	-2,25E-04
10	4,88E-03	4,92E-03	-3,82E-05	4,97E-03	4,99E-03	-2,30E-05
15	5,56E-03	5,54E-03	1,66E-05	6,10E-03	6,04E-03	5,74E-05
20	6,09E-03	6,03E-03	5,96E-05	6,89E-03	6,78E-03	1,08E-04
25	6,46E-03	6,38E-03	8,55E-05	7,56E-03	7,38E-03	1,77E-04
30	6,78E-03	6,68E-03	1,01E-04	8,05E-03	7,85E-03	1,95E-04
50	7,59E-03	7,42E-03	1,68E-04	9,51E-03	9,21E-03	3,01E-04
75	8,15E-03	7,94E-03	2,15E-04	1,06E-02	1,02E-02	3,57E-04
100	8,56E-03	8,34E-03	2,21E-04	1,13E-02	1,09E-02	4,00E-04

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXV presenta la diferencia de errores entre los modelos estándar y Wenzel, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Los Esclavos.

Tabla XXV. **Sumatoria de los errores relativos al cuadrado en la estación climática Los Esclavos**

Los Esclavos	Distribución normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo Estándar (x)	Modelo Wenzel (y)	Diferencia (x-y)	Modelo Estándar (x)	Modelo Wenzel (y)	Diferencia (x-y)
2	5,11E-03	5,64E-03	-5,31E-04	3,55E-03	3,81E-03	-2,54E-04
5	1,64E-02	1,83E-02	-1,85E-03	1,46E-02	1,63E-02	-1,67E-03
10	2,32E-02	2,56E-02	-2,41E-03	2,38E-02	2,62E-02	-2,46E-03
15	2,67E-02	2,93E-02	-2,66E-03	2,87E-02	3,15E-02	-2,78E-03
20	2,88E-02	3,16E-02	-2,79E-03	3,22E-02	3,51E-02	-2,99E-03
25	3,05E-02	3,34E-02	-2,89E-03	3,51E-02	3,82E-02	-3,16E-03
30	3,18E-02	3,48E-02	-2,98E-03	3,70E-02	4,03E-02	-3,26E-03
50	3,52E-02	3,83E-02	-3,17E-03	4,30E-02	4,65E-02	-3,54E-03
75	3,75E-02	4,08E-02	-3,28E-03	4,71E-02	5,08E-02	-3,70E-03
100	3,92E-02	4,26E-02	-3,37E-03	5,03E-02	5,41E-02	-3,83E-03

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXVI presenta la diferencia de errores entre los modelos Estándar y Wenzel, para la distribución normal y de Gumbel de la estación climática Montúfar.

Tabla XXVI. **Sumatoria de los errores relativos al cuadrado en la estación climática Montúfar**

Montúfar	Distribución normal			Distribución de Gumbel		
	Modelo Estándar (x)	Modelo Wenzel (y)	Diferencia (x-y)	Modelo Estándar (x)	Modelo Wenzel (y)	Diferencia (x-y)
2	7,96E-03	9,57E-03	-1,62E-03	8,46E-03	9,84E-03	-1,37E-03
5	8,34E-03	9,36E-03	-1,02E-03	8,14E-03	9,33E-03	-1,18E-03
10	9,45E-03	9,81E-03	-3,59E-04	9,51E-03	9,83E-03	-3,25E-04
15	1,01E-02	1,01E-02	-1,96E-05	1,04E-02	1,03E-02	1,72E-04
20	1,04E-02	1,02E-02	1,76E-04	1,11E-02	1,06E-02	5,18E-04
25	1,08E-02	1,04E-02	3,51E-04	1,16E-02	1,08E-02	7,62E-04
30	1,10E-02	1,05E-02	4,69E-04	1,20E-02	1,10E-02	9,62E-04
50	1,16E-02	1,08E-02	7,61E-04	1,31E-02	1,16E-02	1,48E-03
75	1,20E-02	1,10E-02	9,93E-04	1,40E-02	1,21E-02	1,86E-03
100	1,24E-02	1,12E-02	1,14E-03	1,46E-02	1,25E-02	2,12E-03

Fuente: elaboración propia.

Las tablas anteriores muestran los resultados con base en los ajustes que se realizaron a todos los datos de la lluvia en cada estación de las cuatro cuencas, teniendo como referencia la resta de la sumatoria de los errores relativos al cuadrado de los modelos Estándar y Wenzel.

Por los anteriores resultados se puede notar que cada estación se adecúa a diferentes modelos.

El modelo Estándar utilizado por el INSIVUMEH, tuvo menos error en las siguientes estaciones climáticas: Esquipulas, La Ceibita y Montúfar.

El modelo propuesto por Wenzel, tuvo menos error en las siguientes estaciones climáticas: Asunción Mita y Los Esclavos.

Cabe destacar que las estaciones Asunción Mita y Los Esclavos se encuentran más hacia el sur de la región en estudio, es decir, con dirección al océano Pacífico y las estaciones Esquipulas, La Ceibita y Montúfar se encuentran más hacia el norte, por lo tanto, también se puede notar un interesante comportamiento de la lluvia distinto a las otras dos estaciones en estudio.

Este comportamiento es notorio en el régimen de lluvia de las estaciones, ya que en las gráficas de las curvas IDF para cada estación se puede notar que en Montúfar, Esquipulas y la Ceibita, llueve más que en las de Asunción Mita y Los Esclavos.

Al observar detenidamente las gráficas se nota cómo las estaciones Asunción Mita y Los Esclavos son diferentes, ya que tienden a comportarse con una forma más exponencial que las de las de Montúfar, Esquipulas, y la Ceibita, las cuales son con una forma más abierta; sin perder su forma exponencial, a diferencia de La Ceibita, que si tiene un comportamiento similar a las gráficas de las estaciones Asunción Mita y Los Esclavos.

También, como comprobación final, se puede notar la diferencia del régimen de lluvia en las tablas de probabilidad de lluvia máxima de las diferentes estaciones, las cuales indican las cantidades de lluvias esperadas

para los diferentes periodos de retorno. A continuación se presenta una tabla con las ecuaciones que más adecuan para cada estación.

Tabla XXVII. **Ecuaciones más apropiadas para utilizar en la estación climática Esquipulas**

Estación climática Esquipulas - Modelo Estándar	
Distribución normal	Distribución de Gumbel
$i_2 = \frac{2\ 820}{(22,4 + t)^{0,994}}$	$i_2 = \frac{2\ 600}{(28,3 + t)^{0,991}}$
$i_5 = \frac{3\ 990}{(24,1 + t)^{1,01}}$	$i_5 = \frac{3\ 810}{(24,4 + t)^{1,01}}$
$i_{10} = \frac{4\ 670}{(23,3 + t)^{1,02}}$	$i_{10} = \frac{4\ 690}{(23,2 + t)^{1,02}}$
$i_{15} = \frac{4\ 990}{(23 + t)^{1,02}}$	$i_{15} = \frac{5\ 200}{(22,8 + t)^{1,02}}$
$i_{20} = \frac{5\ 200}{(22,7 + t)^{1,02}}$	$i_{20} = \frac{5\ 530}{(22,5 + t)^{1,02}}$
$i_{25} = \frac{5\ 370}{(22,6 + t)^{1,02}}$	$i_{25} = \frac{5\ 810}{(22,3 + t)^{1,02}}$
$i_{30} = \frac{5\ 520}{(22,6 + t)^{1,02}}$	$i_{30} = \frac{6\ 050}{(22,2 + t)^{1,03}}$
$i_{50} = \frac{5\ 850}{(22,4 + t)^{1,02}}$	$i_{50} = \frac{6\ 690}{(21,9 + t)^{1,03}}$
$i_{75} = \frac{6\ 100}{(22,2 + t)^{1,03}}$	$i_{75} = \frac{7\ 160}{(21,7 + t)^{1,03}}$
$i_{100} = \frac{6\ 240}{(22,1 + t)^{1,03}}$	$i_{100} = \frac{7\ 520}{(21,6 + t)^{1,03}}$

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXVIII presenta las ecuaciones que más se adecúan a la estación climática La Ceibita, las cuales son del Modelo Estándar.

Tabla XXVIII. **Ecuaciones más apropiadas para utilizar en la estación climática La Ceibita**

Estación climática La Ceibita - Modelo Estándar	
Distribución normal	Distribución de Gumbel
$i_2 = \frac{2\ 070}{(24,8 + t)^{0,913}}$	$i_2 = \frac{2\ 030}{(25,6 + t)^{0,918}}$
$i_5 = \frac{2\ 320}{(21,9 + t)^{0,894}}$	$i_5 = \frac{2\ 270}{(22,2 + t)^{0,896}}$
$i_{10} = \frac{2\ 460}{(20,8 + t)^{0,887}}$	$i_{10} = \frac{2\ 470}{(20,8 + t)^{0,887}}$
$i_{15} = \frac{2\ 530}{(20,4 + t)^{0,883}}$	$i_{15} = \frac{2\ 570}{(20,2 + t)^{0,882}}$
$i_{20} = \frac{2\ 580}{(20,2 + t)^{0,882}}$	$i_{20} = \frac{2\ 650}{(19,8 + t)^{0,879}}$
$i_{25} = \frac{2\ 610}{(20 + t)^{0,881}}$	$i_{25} = \frac{2\ 720}{(19,6 + t)^{0,877}}$
$i_{30} = \frac{2\ 640}{(19,8 + t)^{0,879}}$	$i_{30} = \frac{2\ 760}{(19,3 + t)^{0,876}}$
$i_{50} = \frac{2\ 720}{(19,5 + t)^{0,877}}$	$i_{50} = \frac{2\ 910}{(18,9 + t)^{0,872}}$
$i_{75} = \frac{2\ 780}{(19,3 + t)^{0,876}}$	$i_{75} = \frac{3\ 020}{(18,5 + t)^{0,87}}$
$i_{100} = \frac{2\ 810}{(19,1 + t)^{0,874}}$	$i_{100} = \frac{3\ 100}{(18,3 + t)^{0,868}}$

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXIX presenta las ecuaciones que más se adecúan a la estación climática Montúfar, las cuales son del Modelo Estándar.

Tabla XXIX. **Ecuaciones más apropiadas para utilizar en la estación climática Montúfar**

Estación climática Montúfar - Modelo Estándar	
Distribución normal	Distribución de Gumbel
$i_2 = \frac{3\ 040}{(27,8 + t)^{0,881}}$	$i_2 = \frac{3\ 350}{(28,5 + t)^{0,913}}$
$i_5 = \frac{2\ 420}{(26,7 + t)^{0,781}}$	$i_5 = \frac{2\ 460}{(26,7 + t)^{0,791}}$
$i_{10} = \frac{2\ 340}{(26,9 + t)^{0,751}}$	$i_{10} = \frac{2\ 340}{(0,749 + t)^{0,887}}$
$i_{15} = \frac{2\ 330}{(27,1 + t)^{0,739}}$	$i_{15} = \frac{2\ 330}{(27,2 + t)^{0,732}}$
$i_{20} = \frac{2\ 320}{(27,2 + t)^{0,731}}$	$i_{20} = \frac{2\ 330}{(27,2 + t)^{0,722}}$
$i_{25} = \frac{2\ 330}{(27,3 + t)^{0,727}}$	$i_{25} = \frac{2\ 340}{(27,6 + t)^{0,715}}$
$i_{30} = \frac{2\ 330}{(27,4 + t)^{0,723}}$	$i_{30} = \frac{2\ 350}{(27,8 + t)^{0,709}}$
$i_{50} = \frac{2\ 340}{(27,6 + t)^{0,714}}$	$i_{50} = \frac{2\ 400}{(28,3 + t)^{0,697}}$
$i_{75} = \frac{2\ 350}{(27,8 + t)^{0,708}}$	$i_{75} = \frac{2\ 440}{(28,8 + t)^{0,688}}$
$i_{100} = \frac{2\ 360}{(28 + t)^{0,705}}$	$i_{100} = \frac{2\ 480}{(29,1 + t)^{0,683}}$

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXX presenta las ecuaciones que más se adecúan a la estación climática Asunción Mita, las cuales son del Modelo Wenzel.

Tabla XXX. **Ecuaciones más apropiadas para utilizar en la estación climática Asunción Mita**

Estación climática Asunción Mita - Modelo Wenzel	
Distribución normal	Distribución de Gumbel
$i_2 = \frac{2\ 820}{t^{0,994} + 26,7}$	$i_2 = \frac{2\ 610}{t^{0,991} + 27,5}$
$i_5 = \frac{3\ 940}{t^{1,01} + 24,5}$	$i_5 = \frac{3\ 770}{t + 24,7}$
$i_{10} = \frac{4\ 570}{t^{1,01} + 24,5}$	$i_{10} = \frac{4\ 590}{t^{1,01} + 24}$
$i_{15} = \frac{4\ 870}{t^{1,01} + 23,9}$	$i_{15} = \frac{5\ 060}{t^{1,02} + 23,9}$
$i_{20} = \frac{5\ 070}{t^{1,02} + 23,8}$	$i_{20} = \frac{5\ 380}{t^{1,02} + 23,7}$
$i_{25} = \frac{5\ 220}{t^{1,02} + 23,8}$	$i_{25} = \frac{5\ 640}{t^{1,02} + 23,6}$
$i_{30} = \frac{5\ 360}{t^{1,01} + 23,8}$	$i_{30} = \frac{5\ 860}{t^{1,02} + 23,6}$
$i_{50} = \frac{5\ 670}{t^{1,02} + 23,7}$	$i_{50} = \frac{6\ 450}{t^{1,02} + 23,5}$
$i_{75} = \frac{5\ 900}{t^{1,02} + 23,6}$	$i_{75} = \frac{6\ 900}{t^{1,03} + 23,4}$
$i_{100} = \frac{6\ 040}{t^{1,02} + 23,5}$	$i_{100} = \frac{7\ 230}{t^{1,03} + 23,3}$

Fuente: elaboración propia.

La tabla XXXI presenta las ecuaciones que más se adecúan a la estación climática Los Esclavos, las cuales son del Modelo Wenzel.

Tabla XXXI. **Ecuaciones más apropiadas para utilizar en la estación climática Los Esclavos**

Estación climática Los Esclavos - Modelo Wenzel	
Distribución normal	Distribución de Gumbel
$i_2 = \frac{3\ 470}{t^{0,973} + 26}$	$i_2 = \frac{3\ 600}{t^{0,986} + 28,9}$
$i_5 = \frac{3\ 120}{t^{0,903} + 14,6}$	$i_5 = \frac{3\ 150}{t^{0,929} + 18,2}$
$i_{10} = \frac{3\ 030}{t^{0,903} + 14,6}$	$i_{10} = \frac{3\ 020}{t^{0,902} + 14,5}$
$i_{15} = \frac{3\ 000}{t^{0,895} + 13,6}$	$i_{15} = \frac{2\ 990}{t^{0,891} + 13}$
$i_{20} = \frac{2\ 990}{t^{0,89} + 13}$	$i_{20} = \frac{2\ 970}{t^{0,883} + 12,2}$
$i_{25} = \frac{2\ 980}{t^{0,887} + 12,6}$	$i_{25} = \frac{2\ 960}{t^{0,877} + 11,5}$
$i_{30} = \frac{2\ 970}{t^{0,884} + 12,3}$	$i_{30} = \frac{2\ 960}{t^{0,873} + 11,1}$
$i_{50} = \frac{2\ 960}{t^{0,877} + 11,5}$	$i_{50} = \frac{2\ 950}{t^{0,863} + 10}$
$i_{75} = \frac{2\ 960}{t^{0,873} + 11}$	$i_{75} = \frac{2\ 960}{t^{0,856} + 9,34}$
$i_{100} = \frac{2\ 950}{t^{0,87} + 10,7}$	$i_{100} = \frac{2\ 970}{t^{0,851} + 8,88}$

Fuente: elaboración propia.

7.2. Importancia del estudio en la región

El 29 de mayo de 2012, en la estación Montúfar se registró una de las precipitaciones más intensas de lluvia, comenzando a las 8:10 de la mañana, el tiempo fue aproximadamente de 20 horas y media, por lo regular se espera que una lluvia de esta duración sea larga, pero no tan intensa, tal como ocurrió un 4 de octubre de 2005 en la estación Los Esclavos, que registró 109,1 milímetros de lluvia en aproximadamente 24 horas.

Pero en esta ocasión, la duración del tiempo fue largo y la intensidad pequeña. Dando como resultado el registro de una precipitación de 405,6 milímetros de lluvia, la cual cesó aproximadamente a las 4:00 de la mañana del siguiente día. Esta es una cantidad de lluvia impresionante, que puede generar diversidad de problemas por la magnitud de la misma.

La precipitación registrada en la estación Montúfar no es tan frecuente, pero es posible que pueda darse, tal como quedó registrado en la estación, las curvas IDF no son un tema nuevo, ya tienen bastante tiempo de existir, pero uno de los problemas es que se desconoce mucho lo que pueden aportar, la cantidad de estudios en los que se utiliza la curvas IDF son varios como se describió en el capítulo uno, por lo cual es importante seguir con este tipo de estudios que ayuden a generar soluciones para obras de ingeniería.

Las curvas IDF no es nuevo invento, pero uno de los principales aportes del presente trabajo, es que ayuda en la actualización de información de las décadas de los años noventas y ochentas al 2012, en donde ya se pueden encontrar registros de las últimas tormentas, depresiones y huracanes que han afectado al país.

La importancia de realizar este tipo de estudios es grande, ya que el tema es bien amplio, en este trabajo solo se abarcó una parte del oriente del país, lo ideal sería abarcar el país entero, como lo han llevado a cabo otros países alrededor del mundo.

En medio de las lecturas para la elaboración de este trabajo, la siguiente frase dicha por Richard Stearns, presidente de World Vision US, enmarca un llamado genuino para ayudar al prójimo, la cual dice: “Cuándo cumplas noventa y nueve años, ¿qué apreciarás cuando mires atrás? ¿Será el tamaño de tus cuentas bancarias, la extensión de tus propiedades, o tus impresionantes títulos académicos? ¿O será la gente a la que has amado, las relaciones en las que has invertido tiempo, o las cosas que has hecho por el reino de Dios?”⁶

Sin duda, cada persona anhela realizar algo significativo en su vida, sin embargo, la dicha de realizarlo y que ayude a otros, también ayuda en el crecimiento personal, y afirma la idea de seguir realizando proyectos que puedan ser de interés y beneficio nacional, tal como la generación de curvas IDF.

⁶ LUCADO Max, *Más allá de tu vida*. P.248.

CONCLUSIONES

1. Se actualizó la información sobre las curvas IDF en las cuencas de los ríos Paz, Ostúa-Güija, Olopa y Los Esclavos.
2. En el cálculo de intensidades se puede notar que a menor tiempo de concentración, mayor intensidad y que a mayor tiempo de concentración, menor intensidad de la lluvia. Esto también tiene una relación parecida con el periodo de retorno, ya que un evento intenso puede ocurrir con poca frecuencia, pero en cambio, los eventos menos intensos ocurren con más frecuencia.
3. En la actualidad no se tiene un modelo definido para la construcción de curvas IDF, lo cual ocasiona que haya una gran diversidad de modelos matemáticos para su elaboración en todo el mundo, para este estudio se eligen los modelos Estándar, utilizado en el país por el INSIVUMEH y el modelo propuesto por Wenzel, el cual se adecúa bien a las condiciones de información pluvial que se registra en el país, ambos modelos registraron coherencia en su información, lo cual indica que podría ser una buena herramienta a tomar en cuenta para futuras investigaciones.
4. En el análisis final, ambos modelos muestran resultados similares, pero el Estándar se ajustó más a las estaciones Chiquimula, La Ceibita y Montúfar, en cambio el propuesto por Wenzel se ajustó más a Los Esclavos y Asunción Mita, lo cual indica que los dos modelos son válidos y confiables de utilizar, solo que cada uno se adecúa mejor a cierta región.

RECOMENDACIONES

1. Contar siempre con un buen registro de información de las bandas del pluviógrafo, ya que esto ayuda a la elaboración de las curvas IDF y entre más registros se tengan, mejor será la tendencia de la curva, es decir, será mucho más real.
2. El buen mantenimiento o renovación de los pluviógrafos es vital para la elaboración de las curvas IDF, ya que de este instrumento se obtiene la información para la elaboración de las curvas.
3. Utilizar en cada estación climática el sistema de registro diario de las bandas del pluviógrafo, ya que su análisis es más sencillo, que el de una banda semanal.
4. Seguir investigando y aprendiendo más sobre curvas IDF es importante, para generar soluciones a los problemas en donde se necesite utilizar las curvas.
5. Proseguir con más estudios de curvas IDF es un avance para el país, ya que lo ideal sería cubrir todo el territorio nacional, tal como otros países en el mundo lo han hecho.

BIBLIOGRAFÍA

1. APARICIO MIJARES, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa, 1989. 303 p.
2. BUCH, Mario Samuel; MUÑOZ JIMÉNEZ, Julian. *El triffinio, Los recursos hídricos en la parte alta de la cuenca del río Lempa*, Esquipulas, Guatemala. 2009. 44 p.
3. CHOW, Ven Te. *Estadística en hidrología aplicada*; Colombia: Mc Graw-Hill Interamericana, 1994. 584 p.
4. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. *Manual de instalación de estaciones meteorológicas de superficie terrestre*. Guatemala: INSIVUMEH, 1992. 137 p.
5. _____ *Método estándar de cálculo de curvas Duración-Intensidad-Frecuencia*. Guatemala: INSIVUMEH, 1988. 77 p.
6. LINSLEY, Ray; KOHLER, Max; PAULUS, Joseph. *Hidrología para ingenieros*. 2a ed. México: Editores McGraw-Hill Latinoamericana, 1977. 300 p.
7. LUCADO, Max. *Más allá de tu vida*. Estados Unidos: Grupo Nelson, 2010. 248 p.

8. MENDOZA, H.; BAUTISTA, G. Probabilidad y estadística. Universidad Nacional de Colombia, [en línea] <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2001065/>. Licencia: Creative Commons BY-NC-ND. [Consulta: junio de 2013]
9. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. *Atlas temático de las cuencas hidrográficas de la república de Guatemala*. Guatemala: MAGA, 2005. 269 p.
10. Organización Mundial Meteorológica. *Guía de prácticas hidrológicas. adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones*, 5a ed. OMM, 1994. 779 p.
11. _____ *Vocabulario meteorológico internacional*. Suiza: OMM, 1992.
12. TEMEZ, José Ramón. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. España: Dirección General de Carreteras, 1978. 111 p.
13. WACKERLY, MENDENHALL, SCHEAFFER. *Estadística matemática con aplicaciones*. USA: Cengage Learning, 2009. 896 p.
14. WALPOLE, Ronald E. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. México: Prentice-Hall Hispanoamérica, 1999. 752 p.