



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estimación de avenidas de diseño
para los ríos Rosas y Tlautla de la
región hidrológica 26**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

José Rodrigo Silverio Retana

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Eliseo Carrizosa Elizondo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

A mi Familia, quienes siempre me han apoyado de manera incondicional a lo largo de toda mi vida y a quienes debo todo lo que soy y he podido lograr.

A mi Hermano, Oscar, por siempre cuidar de mí y brindarme su apoyo y consejos durante toda la vida. A mi Padre, Rogelio, quien ha sabido motivarme e inspirarme para continuar adelante y no perderme en el camino.

A mi Madre, Florencia, la persona protagonista en mi vida que me ha traído hasta aquí a base de mucho esfuerzo y dedicación. De quien he aprendido tanto y siempre me ha cuidado y sabido guiar.

A mi novia, Fernanda, quien ha estado conmigo desde el inicio de esta aventura y siempre fue la mejor compañera de clase, amiga y compañera de vida. Gracias por todo tu apoyo. Te debo tanto.

A mis amigas, Cecilia, Carmen y Lesly. Quienes fueron más que mis grandes compañeras de clases; siempre tan entusiastas, tan dedicadas y sobresalientes. Han sido un motivo de inspiración y motivación para mejorar, gracias por su todo su apoyo.

A mis amigos de la Facultad de ingeniería, a todos mis compañeros y compañeras de clase con quien tuve oportunidad de formarme y compartir momentos enriquecedores.

Al M.I Eliseo Carrizosa Elizondo, por darme la oportunidad de formar parte del Instituto de Ingeniería. Por toda su paciencia y confianza en la realización de este trabajo, así como todo el apoyo brindado durante el proceso.

Al M.I Eduardo Juan Diego, por sus valiosas aportaciones y apoyo durante la realización de este trabajo. Gracias por la paciencia y los conocimientos brindados

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM; a todas las personas que hacen posible la existencia del programa de estudiantes, a los investigadores y becarios del grupo de hidráulica de quienes he aprendido tanto.

A la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Nacional Autónoma de México. Por brindarme las herramientas y conocimientos necesarios para desarrollar mis habilidades y el pensamiento crítico. Gracias por brindarme tantas oportunidades

Resumen

El presente trabajo es parte de la respuesta que se da ante un problema de inundaciones que han afectado severamente a la ciudad de Tula de Allende y de algunas zonas del Valle del Mezquital. Es una aplicación de la regionalización de lluvias para estimar eventos de diseño y el empleo de la modelación hidrológica distribuida para la obtención de caudales asociados a diferentes periodos de retorno, los cuales servirán en un futuro como punto de partida para la propuesta de alternativas que solventen el problema planteado.

El primer capítulo describe la problemática que se busca resolver a partir de los resultados de este trabajo, se define el objetivo principal y objetivos específicos que se necesitan cumplir para llegar a los resultados esperados. Se mencionan los antecedentes más importantes que se deben tener en cuenta durante el desarrollo del trabajo, así como un panorama general de la situación. En el capítulo siguiente se mencionan los conceptos básicos más elementales que se deben conocer para la correcta aplicación en el presente estudio; conceptos relacionados con la hidrología superficial y el análisis estadístico de lluvias se abordan en este capítulo y se establece relación entre los mismos.

En el tercer capítulo se describe concretamente la teoría más específica que se requiere dominar para aplicarla en la zona de estudio definida al inicio del trabajo. Se hace un especial énfasis en la regionalización de lluvias y la aplicación de las técnicas regionales para obtener los hietogramas de eventos de diseño antes de ser introducidos en el modelo lluvia escurrimiento.

El capítulo cuatro da una descripción detallada de la zona de estudio y de las cuencas que se analizan durante la aplicación de las técnicas estadísticas mencionadas anteriormente. Se muestran los parámetros fisiográficos más importantes de las cuencas analizadas, así como las fuentes de información disponibles de las cuales se obtuvieron los datos de lluvia y gastos que se manejan durante el desarrollo del trabajo.

El capítulo cinco es la parte central de este estudio ya que se muestran de manera detallada los procedimientos y técnicas estadísticas empleadas durante la obtención de las lluvias de diseño, así como la parte de la modelación hidrológica distribuida en donde se hace un énfasis en la metodología empleada para la obtención de los parámetros fisiográficos, los cuales se obtienen en forma de una malla de celdas. Finalmente se muestra la aplicación del modelo de pronóstico de escurrimiento (MPE) así como el proceso de calibración del mismo y los resultados obtenidos después de ingresar los datos de lluvias de diseño y los parámetros fisiográficos. Asimismo, se da una breve serie de recomendaciones generales que sirven como base para comenzar con el plan de acción necesario para solventar la problemática planteada al inicio del estudio.

La parte final del escrito es el capítulo seis en el que se discuten los resultados obtenidos y se menciona la importancia de contar con los datos necesarios para implementar el tipo de modelo empleado en este trabajo, así como las herramientas necesarias para modelar de manera realista las condiciones de la zona que se analizó.

Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivo principal	4
1.3 Objetivos específicos.....	4
1.4 Antecedentes.....	4
1.4.1 Sistema de drenaje general de la ciudad de México	6
2. Conceptos Básicos.....	9
2.1 Hidrología.....	9
2.2 Parámetros fisiográficos de una cuenca	9
2.2.1 Tiempo de concentración	11
2.2.2 Pendiente media del cauce principal	11
2.3 Precipitación.....	12
2.4 Escurrimiento	15
2.5 Infiltración	16
2.5.2 Pérdidas por evaporación	18
2.5.3 Pérdidas por evapotranspiración.....	18
2.6 Hietograma.....	18
2.8 Hidrograma.....	19
2.9 Análisis estadístico de lluvias.....	21
2.9.1 Análisis de frecuencias de eventos extremos	21
2.9.2 Periodo de retorno.....	22
2.9.3 Pruebas de homogeneidad e independencia.....	23
2.9.3.1 Prueba de homogeneidad de Helmert	23
2.9.3.2 Prueba de homogeneidad T de student.....	24
2.9.3.3 Prueba de homogeneidad de Cramer	24
2.9.3.4 Prueba de independencia de Anderson	25
2.10 Función de distribución de probabilidad	26

2.10.2 Distribución normal	28
2.10.3 Distribución Log-Normal de 2 parámetros.....	29
2.10.4 Distribución Log-Normal de 3 parámetros.....	30
2.10.5 Distribución Gumbel	32
2.10.5 Distribución Doble Gumbel.....	33
2.11 Estimación de parámetros poblacionales	34
2.11.1 Método de momentos	34
2.11.1.1 Momentos muestrales	35
2.11.1.2 Momentos poblacionales.....	36
2.11.2 Método de máxima verosimilitud.....	37
3. Marco Teórico.....	38
3.1 Regionalización de lluvias.....	39
3.2 Regiones homogéneas	40
3.2.1 Método del coeficiente de variación	40
3.2.2 Método del coeficiente de variación por momentos L.....	41
3.2.2.1 Momentos-L.....	42
3.2.2.2 Momentos de probabilidad pesada.....	44
3.3 Técnicas regionales	45
3.3.1 Técnica de las estaciones-año.....	45
3.4 Factores de convectividad	47
3.5 Factores de reducción por área.....	49
3.6 Modelo para pronóstico de escurrimiento (MPE)	50
4. Recopilación y análisis de información	52
4.1 Zona de estudio	53
4.2 Región Hidrológica	55
4.4 Clima y Temperatura.....	56
4.5 Parámetros fisiográficos.....	57
4.5.1 Uso de suelo y vegetación	57

4.5.2 Edafología	60
4.5.3 Mapa de pendientes	61
4.5.4 Elevaciones de la cuenca.....	63
4.6 Estaciones climatológicas e hidrométricas	65
5. Aplicación y Resultados.....	67
5.1 Regiones homogéneas	68
5.1.1 Parámetros estadísticos de las series de lluvias.	68
5.1.2 Aplicación del método del coeficiente de variación.	69
5.1.3 Aplicación de la técnica del coeficiente de variación por momentos-L.....	70
5.1.3.1 Estadísticos muestrales por momentos de probabilidad pesada.	70
5.3 Lluvias de diseño.....	74
5.3.1 Estaciones-año	75
5.3.2 Pruebas de homogeneidad e independencia.....	77
5.3.2.1 Prueba de independencia de Anderson	78
5.3.2.2 Pruebas de homogeneidad de Helmer, T Student y Cramer	79
5.3.3. Comparación de factores regionales obtenidos	82
5.4 Hietogramas de diseño.....	83
5.4.1 Hietogramas de diseño para la cuenca del río Tlautla	84
5.4.2 Hietogramas de diseño para la cuenca del río Rosas.....	86
5.5 Caracterización de las cuencas.....	88
5.6 Modelación en el MPE.....	93
5.6.1 Avenidas históricas	93
5.6.1.1. Río Rosas	94
5.6.1.1 Río Tlautla.....	95
5.6.2 Calibración del modelo	97
5.6.3 Parámetros de calibración	102
5.7 Avenidas de diseño	105
5.7.1 Río Tlautla	106
5.7.2 Río Rosas	108

5.4 Análisis de resultados.....	110
5.4.1 Recomendaciones.....	111
5 Conclusiones.....	113
Bibliografía.....	115

Índice de figuras

Figura 1.1 Confluencia del río Rosas y río Tlautla con el río Tula. Fuente: Elaboración propia	1
Figura 1.2 Inundaciones en Tula de Allende (6/sep/2021) (Foto: Juan Donojú / Cuartoscuro)	2
Figura 1.3 Cuenca del río Rosas. Fuente:Elaboración propia	5
Figura 1.4 Cuenca del río Tlautla. Fuente: elaboración propia	6
Figura 1.5 Sistema lacustre del Valle de México. Fuente: (SEMARNAT, 2007)	7
Figura 2.1 Ejemplo de una cuenca hidrológica con su red de drenaje. Fuente: Elaboración propia.....	10
Figura 2.2 Esquema representativo de los tipos de lluvia. Fuente: (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006).....	15
Figura 2.3 Ejemplo de un hietograma de precipitación. Fuente: Elaboración propia	19
Figura 2.4 Hidrograma de una tormenta aislado. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 3.1 Factores de convectividad para diferentes regiones de México (Labrada, 2018)48	
Figura 3.2 Regiones que cuentan con factor de reducción por área (Sánchez, 2017).	50
Figura 4.1 Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia	53
Figura 4.2 Entradas y salidas registradas en la presa Danxhó. Datos obtenidos de (CONAGUA)	54
Figura 4.3 Reducción de la cuenca del río Tlautla	55
Figura 4.4 Región hidrológica 26 "Río Panuco"	56
Figura 4.5 Clima promedio en la zona de estudio (INEGI, 2023).....	57
Figura 4.6 Mapa de uso de suelo y vegetación, cuenca río Tlautla. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de la serie VII de uso de suelo y vegetación.....	58
Figura 4.7 Mapa de uso de suelo y vegetación, cuenca río Rosas. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de la serie VII de uso de suelo y vegetación.....	59
Figura 4.8 Mapa de edafología y tipos de suelo, cuenca río Río Tlautla. Fuente: Diseño propio elaborado a partir del conjunto de datos edafológicos de INEGI.....	60

Figura 4.9 Mapa de edafología y tipos de suelo, cuenca río Rosas. Fuente: Diseño propio elaborado a partir del conjunto de datos edafológicos de INEGI.....	61
Figura 4.10 Mapa de pendientes, cuenca del río Tlautla. Fuente: Diseño propio elaborado a partir de la información proporcionada por el continuo de elevaciones mexicano de INEGI	62
Figura 4.11 Mapa de pendientes, cuenca del río Rosas. Fuente: Diseño propio elaborado a partir de la información proporcionada por el continuo de elevaciones mexicano de INEGI	63
Figura 4.12 Mapa de elevaciones, cuenca del río Tlautla. Fuente: Diseño propio elaborado a partir de la información proporcionada por el continuo de elevaciones mexicano de INEGI	64
Figura 4.13 Mapa de elevaciones, cuenca del río Rosas. Fuente: Diseño propio elaborado a partir de la información proporcionada por el continuo de elevaciones mexicano de INEGI	64
Figura 4.14 Mapa de ubicaciones, estaciones climatológicas consideradas en el análisis. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 4.15 Mapa de ubicaciones, estaciones hidrométricas consideradas en el análisis. Fuente: Elaboración propia.....	66
Figura 5.1 Coeficientes de variación ordenados de manera descendente.....	70
Figura 5.2 Conformación de la región homogénea	72
Figura 5.3 Coeficientes de variación ordenados de mayor a menor con línea de tendencia	74
Figura 5.4 Correlograma obtenido de la prueba de Anderson.....	78
Figura 5.5 Resumen de errores estándar en Ax. (Jiménez, 1997)	80
Figura 5.6 Grafica de ajuste de la distribución Gumbel (Momentos)	81
Figura 5.7 Determinación de R en la ubicación de la zona de estudio. Tomado de (Labrada Montalvo, 2018)	83
Figura 5.8 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 50 años, cuenca río Tlautla	85
Figura 5.9 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 100 años, cuenca río Tlautla	85

Figura 5.10 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 500 años, cuenca río Tlautla	86
Figura 5.11 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 50 años, cuenca río Rosas	86
Figura 5.12 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 100 años, cuenca río Rosas	87
Figura 5.13 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 500 años, cuenca río Rosas	87
Figura 5.14 Cuencas y subcuencas generadas a partir del modelo digital utilizado	89
Figura 5.15 Generación del nuevo proyecto en HEC-GeoHMS	89
Figura 5.16 Caracterización de cuencas y subcuencas (Pendientes, centroides, cauces principales)	90
Figura 5.17 Entorno de la herramienta de visor de números de escurrimiento, IMTA	91
Figura 5.18 Visualización de la malla de celdas con número de curva asignado. Cuenca Tlautla	92
Figura 5.19 Visualización de la malla de celdas con número de curva asignado. Cuenca Rosas	92
Figura 5.20 Hietograma e hidrograma medidos, evento 1	95
Figura 5.21 Hietograma e hidrograma medidos, evento 2	95
Figura 5.22 Hietograma e hidrograma medidos, evento 3	95
Figura 5.23 Hietograma e hidrograma medidos, evento 2	96
Figura 5.24 Hietograma e hidrograma medidos, evento 3	97
Figura 5.25 Hietograma e hidrograma medidos, evento 4	97
Figura 5.26 Datos de entrada, calibración cuenca río Tlautla	98
Figura 5.27 Archivo de texto con características fisiográficas, cuenca río Tlautla	98
Figura 5.28 Archivo de Texto con registro de lluvias	99
Figura 5.29 Hietograma de precipitación media de la cuenca del río Tlautla	99
Figura 5.30 Archivo de texto con hidrograma observado	100
Figura 5.31 Hidrograma de resultados, primera corrida de calibración	101

Figura 5.32 Tabla resumen de resultados	102
Figura 5.33 Resultados de la calibración, cuenca del río Rosas.....	103
Figura 5.34 Resultados de la calibración volúmenes escurridos, cuenca del río Rosas.	103
Figura 5.35 Resultados de la calibración, cuenca del río Tlautla.	104
Figura 5.36 Resultados de la calibración volúmenes escurridos, cuenca del río Tlautla. ..	105
Figura 5.37 Hidrograma de diseño Tr 50 años, cuenca del río Tlautla.	106
Figura 5.38 Hidrograma de diseño Tr 100 años, cuenca del río Tlautla.	106
Figura 5.39 Hidrograma de diseño Tr 500 años, cuenca del río Tlautla.	107
Figura 5.40 Hidrogramas de diseño, cuenca río Tlautla.....	107
Figura 5.41 Hidrograma de diseño Tr 50 años, cuenca del río Rosas.	108
Figura 5.42 Hidrograma de diseño Tr 100 años, cuenca del río Rosas.	108
Figura 5.43 Hidrograma de diseño Tr 100 años, cuenca del río Rosas.	109
Figura 5.44 Hidrogramas de diseño, cuenca río Rosas.....	109
Figura 5.45 Enrocado para protección de dique de terraplén reforzado.....	112

Índice de tablas

Tabla 4.1 Coordenadas de las cuencas en estudio	53
Tabla 4.2 Usos de suelo en la cuenca del río Tlautla	58
Tabla 4.3 Usos de suelo en la cuenca del río Tlautla. Fuente: diseño propio tomando datos de INEGI	59
Tabla 4.4 Estaciones climatológicas seleccionadas.....	65
Tabla 5.1 Parámetros estadísticos de las muestras	69
Tabla 5.2 Parámetros y momentos de la muestra, ejemplo de la estación 15187	71
Tabla 5.3 Resumen de coeficientes de variación (río Tlautla)	71
Tabla 5.4 Resumen de la conformación de la región homogénea, Técnica del coeficiente de variación con momentos-L. Fuente: Elaboración propia.....	73
Tabla 5.5 Serie de valores máximos anuales observados	76
Tabla 5.6 Series moduladas para cada estación de la región homogénea	77
Tabla 5.7 Resumen de la aplicación de la prueba de Helmert.....	79
Tabla 5.8 Resumen de la aplicación de la prueba T Student.....	79
Tabla 5.9 Resumen de la aplicación de la prueba de Cramer.....	79
Tabla 5.10 Factores regionales extrapolados a partir de la función de distribución Gumbel	82
Tabla 5.11 Lluvias de diseño de 24 horas asociadas a diferentes periodos de retorno	82
Tabla 5.12 Comparación de los factores regionales obtenidos vs resultados del estudio de regionalización elaborado para el CENAPRED (Domínguez Mora R. , et al., 2017)	83
Tabla 5.13Eventos máximos registrados en la cuenca del río Rosas	94
Tabla 5.14 Eventos máximos registrados en la cuenca del río Tlautla.....	96
Tabla 5.15 Resumen de resultados obtenidos, cuenca río Rosas	110
Tabla 5.16 Resumen de resultados obtenidos, cuenca río Tlautla.....	110

1. Introducción

El Río Tula es uno de los principales escurrimientos que fluyen en el estado de Hidalgo, nace de la confluencia del río Tepeji con las salidas del sistema de desagüe de la Ciudad de México y desemboca en la presa Zimapán. Este cauce tiene como afluentes principales los ríos de Tepeji, Salto, Salado, Chicavasco, Alfajayucan, Rosas y Tlautla, siendo estos dos últimos el objeto de estudio del presente trabajo (Figura 1.1).

Además de las aportaciones de estos ríos, a la corriente del río Tula llegan las aportaciones del Sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México a través del túnel emisor central y el túnel emisor Oriente que descargan sus aguas a la corriente del río “El salto” el cual es afluente del río Tula que conduce el agua residual hacia la planta de tratamiento de Atotonilco.

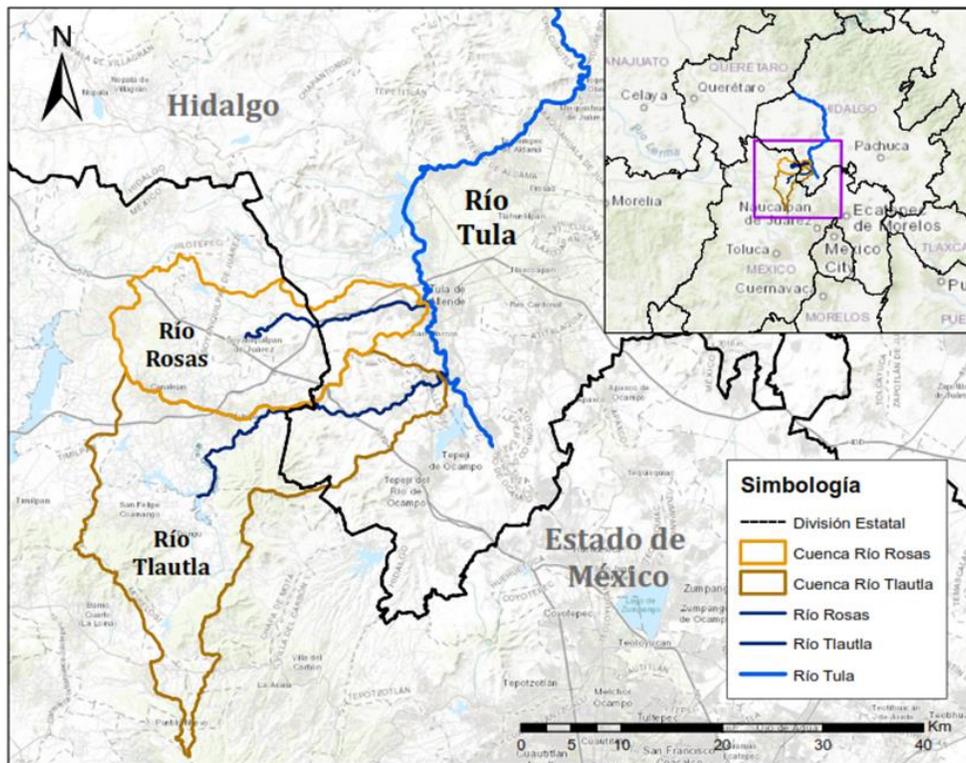


Figura 1.1 Confluencia del río Rosas y río Tlautla con el río Tula. Fuente: Elaboración propia

1.1 Planteamiento del problema

Debido a la ocurrencia de lluvias intensas y de gran magnitud que se han presentado en años recientes, el río Tlautla ha presentado grandes caudales que ocasionaron su desbordamiento, así como el desfogue de la presa Danxhó ocurrido el día 7 de septiembre del 2021, que se ubica en la zona central de la cuenca del río. Por su parte, el río Rosas también ha rebasado su capacidad y se ha desbordado generando severas inundaciones principalmente en las ciudades de Tula de Allende, Ixmiquilpan y Tlahuelilpan. (Ortiz, Cervantes, Ramírez, & Soto, 2022).

En septiembre del año 2021 se generaron severas inundaciones dentro de la zona de Tula de Allende, debido a que el río Tula había desbordado en distintos puntos de su recorrido (Figura 1.2). Este hecho puso en la mira esta zona de conflicto debido a que las inundaciones generaron graves daños económicos y de impactos negativos a la salud de la población que habita en las comunidades cercanas a la ciudad de Tula y al Valle del Mezquital.

Estas inundaciones, de las cuales no se tenía un precedente en años recientes, se debieron a varios factores que tienen que ver directamente con el comportamiento hidráulico del río Tula, el cual al recibir aportaciones tanto de sus afluentes naturales como de las descargas de aguas residuales y pluviales de la Ciudad de México ocasionó desbordamientos en varios puntos de su recorrido.



Figura 1.2 Inundaciones en Tula de Allende (6/sep/2021) (Foto: Juan Donojú / Cuartoscuro)

A partir de esta serie de eventos, surge la necesidad de evaluar las condiciones más críticas que podrían ocurrir en la zona. Esto implica considerar las precipitaciones intensas y de gran magnitud, así como las crecidas en los ríos de mayor influencia. Es importante destacar que las condiciones previas, bajo las cuales se han registrado daños significativos en la ciudad de Tula de Allende, no han sido necesariamente las más adversas que se pudieran presentar. Además, es importante tener en cuenta que la Ciudad de México descarga un caudal considerable al río Tula a través de su sistema de drenaje profundo.

En este sentido, estimar las magnitudes de avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno en los principales afluentes del río Tula da la pauta para comenzar una evaluación más completa de la situación actual de esta zona, todo esto con el fin de comenzar un plan de acción que permita reducir y mitigar el riesgo de inundaciones.

A partir de una regionalización de lluvias y un modelo lluvia-escorrentamiento se podrán estimar las avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno para el río Tlautla y el río Rosas. El modelo lluvia-escorrentamiento que transforma las lluvias estadísticas en caudales es la alternativa más viable ya que se cuenta con un generoso número de estaciones climatológicas con datos disponibles para ambas cuencas. Para emplear la regionalización de lluvias en el modelo lluvia-escorrentamiento se debe establecer el grupo de estaciones climatológicas que pertenecen a una misma región homogénea en función de los parámetros estadísticos de sus registros históricos.

La información necesaria para identificar las características fisiográficas de la cuenca se obtiene de INEGI, una de las fuentes de información oficiales con las que se cuenta en México de la cual se obtuvo también el modelo digital de elevaciones que será utilizado en el proceso de modelación dentro de los sistemas de información geográfica.

La técnica regional que se emplea en este trabajo se conoce como “estaciones-año”, la cual considera una muestra única de datos conformada por un registro estandarizado de eventos que se ajusta a un conjunto de distribuciones de probabilidad (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002). La región homogénea se forma a partir de la aplicación del método del coeficiente de variación por momentos-L, el cual permite observar gráficamente los límites que definen a la región. Del mismo modo se aplicó el método del coeficiente de variación que compara la dispersión de la serie de datos analizados

Finalmente, con la finalidad de obtener los caudales de diseño, se obtienen los hietogramas aplicando los factores de convectividad y de reducción por área que consideran una reducción de las lluvias estadísticas en función de las áreas de aportación de las cuencas en estudio.

1.2 Objetivo principal

Estimar las avenidas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno para las cuencas del río Rosas y el Río Tlautla mediante un análisis regional de lluvias y un modelo lluvia escurrimiento de parámetros distribuidos, estableciendo con ello una base de información que permita el comienzo de un plan de protección y mitigación de inundaciones en las zonas afectadas a partir de los resultados obtenidos.

1.3 Objetivos específicos

Como complemento al objetivo principal se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Estudiar la información hidrológica disponible para las cuencas de interés por medio de un análisis de frecuencias.
2. Generar un modelo lluvia-escurrimiento de parámetros distribuidos para las cuencas del río Rosas y el río Tlautla por medio de un SIG.
3. Estimar las avenidas de diseño para diferentes periodos de retorno para los ríos Rosas y Tlautla por medio del modelo MPE a partir de los parámetros de calibración obtenidos de cada cuenca.
4. Proponer recomendaciones que permitan la prevención y mitigación los efectos de las inundaciones dentro de la zona del Valle del Mezquital.

1.4 Antecedentes

El río Rosas es una corriente de agua que nace dentro del territorio de Calpulalpan en el estado de Hidalgo a unos 2575-2600 m.s.n.m. aproximadamente. En su curso dentro de la cuenca, el río Rosas atraviesa los poblados de Palos Altos, los Corrales y San Andrés antes de desembocar al río Tula por el margen izquierdo en el territorio de la Ciudad de Tula de Allende, en el estado de Hidalgo. Se aprecia la confluencia del río Rosas con el río Tula en la figura 1.3.



Figura 1.3 Cuenca del río Rosas. Fuente: Elaboración propia

Por su parte el río Tlautla, fluye a través del territorio del estado de México y parte del estado de Hidalgo. Este río tiene su nacimiento en las zonas altas del cerro de la bufa, a una altura de 3350 m.s.n.m. en el estado de México. Recibe su nombre debido a que atraviesa en su último tramo a la localidad de Santiago de Tlautla, antes de desembocar al río Tula en el estado de Hidalgo a una elevación aproximada de 2045 m.s.n.m. En la figura 1.4 se muestra la ubicación de esta cuenca, así como la confluencia del río Tlautla con el río Tula.



Figura 1.4 Cuenca del río Tlautla. Fuente: Elaboración propia

1.4.1 Sistema de drenaje general de la ciudad de México

La Ciudad de México se encuentra ubicada dentro de la cuenca del Valle de México, la cual es una cuenca de naturaleza endorreica, es decir que no cuenta con una red de drenaje superficial que traslade el agua precipitada hacia el exterior de esta. Originalmente la cuenca del Valle de México formaba un sistema lacustre integrado por cinco grandes lagos: Texcoco, Xaltocan, Zumpango, Xochimilco y Chalco (Figura 1.5). Con la llegada de los primeros asentamientos humanos a esta zona, eventualmente se fueron secando cada uno de estos lagos hasta llegar a lo que es actualmente la capital del país, pero no sin antes pasar una serie de severas inundaciones debido a la gran alteración del sistema lacustre original y los deficientes sistemas de drenaje que se habían implementado para drenar las aguas pluviales y residuales hacia fuera de la Ciudad.



Figura 1.5 Sistema lacustre del Valle de México. Fuente: (SEMARNAT, 2007)

La condición natural de la cuenca del Valle de México provoca que la ciudad de México tenga una tendencia a inundarse cuando se presentan lluvias intensas y de mayor magnitud por lo que a lo largo de la existencia y desarrollo de la capital del país se ha buscado la manera de desalojar las aguas residuales y pluviales hacia zonas aledañas a la capital por medio de obras hidráulicas mayores. Históricamente, se han construido 5 medios “Masivos” de desalojo del agua residual y pluvial que descargan hacia el exterior de la capital, las cuales se describen a continuación:

1. **Tajo de Nochitstongo.** Inició su construcción en 1607 y finalizó hasta 1789, se ubica al noroeste del Valle y fue la primera salida artificial con una longitud de 13 km y capacidad para conducir hasta 40 m³/s.

2. **Primer túnel de Tequixquiac.** Inaugurado en 1900 para el desalojo de las aguas del Gran Canal de Desagüe en el río Tequixquiac. Su trazo es recto, cuenta con 10.10 km de longitud y fue diseñado para conducir un caudal de 16 m³/s.
3. **Segundo túnel de Tequixquiac.** Con una longitud total de 11.30 km inició su operación en 1946. Se proyectó para aumentar la capacidad de desalojo del Gran Canal de Desagüe y fue diseñado para un caudal de 60 m³/s.
4. **Túnel emisor central.** Inaugurado en 1975 como parte de las obras del Drenaje profundo con una longitud de 50 km y diseñado para conducir un gasto de 220 m³/s recibe las descargas de 9 interceptores de la Ciudad de México.
5. **Túnel emisor oriente.** Proyectado por la CONAGUA como refuerzo del Sistema General del Desagüe (Drenaje Profundo y Superficial). Inició construcciones en 2009 y comenzó a operar en 2020 con una longitud final de 62 kilómetros y 7 metros de diámetro y una capacidad de desalojo de 150 m³/s que se descargan hacia el río “El Salto” en el estado de Hidalgo.

De estas salidas de agua residual, actualmente tres descargan hacia el río “El salto” el cual es un confluente del río Tula; el túnel emisor oriente, el túnel emisor central y el túnel emisor poniente. Este es un tema que ha causado controversia desde hace ya algunos años puesto que muchas personas involucradas en el tema aseguran que las inundaciones más severas que se han presentado en el estado de Hidalgo, particularmente en la ciudad de Tula de Allende, comenzaron a suscitarse después de la inauguración del nuevo túnel emisor oriente puesto que las descargas que realiza cuando se presentan lluvias intensas en la Ciudad de México saturan la capacidad hidráulica del río Tula.

2. Conceptos Básicos

A continuación, se enlistan y describen los conceptos básicos más importantes de la teoría que se aplica a lo largo del desarrollo de este trabajo con el fin de fundamentar todos los procedimientos y consideraciones aplicados a la obtención de los caudales de diseño. Estos conceptos comprenden áreas como la hidrología superficial, así como de las leyes de la estadística y la probabilidad que han sido empleados en la realización de este trabajo y de estudios previos.

La comprensión de estos conceptos es de vital importancia ya que la mayoría de las técnicas y procedimientos empleados en la obtención de los caudales de diseño se basan directamente en la implementación de estos principios y justifican la forma en la que se analizaron los datos disponibles, así como la manera en la que se han interpretado los resultados obtenidos en cada uno de los procedimientos descritos a lo largo del capítulo 5.

2.1 Hidrología

Para diseñar las obras hidráulicas que se requieren para garantizar la seguridad de la población ante eventos meteorológicos importantes, es necesario contar con fundamentos teóricos y herramientas que permitan conocer los caudales que habrá que desalojar o transitar en cierta zona de estudio bajo cierta condición de lluvia. Dichas obras son, presas, vertedores, sistemas de drenaje en carreteras y vías férreas, así como otras estructuras de control que garanticen la seguridad de la población ante la ocurrencia de lluvias intensas.

En sentido estricto, la hidrología superficial se define como la ciencia natural que estudia al agua; su distribución y circulación, sus propiedades físicas y químicas, su interacción con el medio ambiente y los seres vivos (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Es precisamente la ciencia que brinda las herramientas necesarias que permiten estimar la ocurrencia y distribución de estos caudales con el fin de diseñar de una manera confiable las obras de protección, drenaje y control (Aparicio Mijares, 2012).

2.2 Parámetros fisiográficos de una cuenca

La unidad fundamental que se emplea en un estudio hidrológico es la cuenca, la cual es, un área delimitada por puntos de mayor elevación topográfica los cuales forman un perímetro llamado parteaguas. Cada cuenca hidrográfica cuenta con una red de drenaje a través de la cual se conduce el agua que precipita hacia el punto de salida que suele ser el sitio de menor elevación topográfica que se encuentra dentro del área en cuestión.

Una red de drenaje cuenta con un cauce principal que suele ser el escurrimiento más largo que va desde los puntos más altos hacia la salida de la cuenca. Tanto el parteaguas, la red de drenaje y el cauce principal de la cuenca son denominados parámetros fisiográficos y su determinación es fundamental para llevar a cabo el estudio de la hidrología de cierta zona.

Además de estos parámetros fisiográficos, la cuenca hidrológica cuenta con los siguientes parámetros importantes (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006).

- **Área de la cuenca.** Es la proyección en un plano horizontal de la superficie de la cuenca o del parteaguas que la delimita
- **Orden de las corrientes.** Depende del grado de bifurcación que se presente en dicha corriente. Una corriente de orden 1 no tiene ramificaciones mientras que una corriente de orden 2 cuenta con la afluencia de corrientes de orden 1 y así sucesivamente.
- **Ancho de la cuenca.** Es la línea más larga perpendicular al eje mayor de la cuenca
- **Orientación de la cuenca.** Tomando como centro de referencia el punto de salida de la cuenca, es el ángulo que se forma entre el eje mayor de la cuenca y el norte magnético.

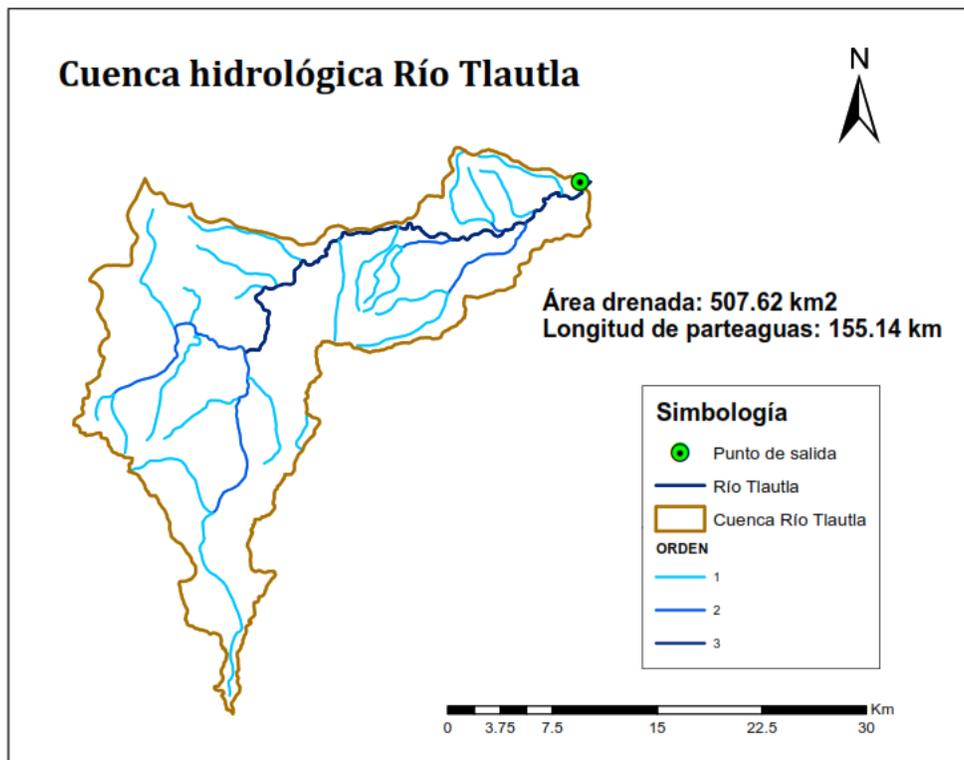


Figura 2.1 Ejemplo de una cuenca hidrológica con su red de drenaje. Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda una gota o partícula de agua en llegar desde el punto más alejado de la cuenca hasta su salida. La expresión más común para determinar este tiempo es la ecuación de Kirpich, la cual se define de la siguiente manera:

$$t_c = 0.0195 \left(\frac{L_{CP}^{0.77}}{S_{CP}^{0.385}} \right) \quad (2-1)$$

Donde:

S_{CP} Pendiente media del cauce principal (adim)

L_{CP} Longitud del cauce principal (m)

t_c Tiempo de concentración (min)

2.2.2 Pendiente media del cauce principal

Para determinar la pendiente media del cauce principal de una cuenca existen diferentes métodos que se emplean según la escala, disponibilidad de datos topográfico. El método que suele aplicarse en la mayoría de los casos es el método de Taylor y Schwartz ya que da una buena definición al considerar que el cauce principal se compone de canales de longitud igual o variable y pendiente uniforme.

Si el río se divide en m número de tramos, la pendiente media del cauce principal es:

$$S_{CP} = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right] \quad (2-2)$$

Donde:

S_{CP}	pendiente media del cauce principal, adimensional
$S_i, i = 1, \dots, S_m$	pendiente de cada segmento i
m	número de segmentos de igual longitud en los que se divide el tramo

2.3 Precipitación

La precipitación se define como el proceso en el que el agua que se encuentra en la atmósfera cae a la superficie terrestre por medio de lluvia y nieve, así como de granizo (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Las precipitaciones son el resultado de la condensación del vapor de agua en la atmósfera. El ciclo del agua comienza cuando el sol calienta la superficie de la Tierra, lo que provoca la evaporación del agua de los océanos, lagos, ríos y suelos. El vapor de agua asciende en la atmósfera y, a medida que se eleva, se enfría. Cuando el vapor de agua se enfría lo suficiente, se condensa en pequeñas gotas de agua o cristales de hielo alrededor de partículas de polvo en suspensión, formando nubes.

A medida que las gotas de agua o los cristales de hielo en las nubes crecen y se vuelven lo suficientemente pesados, caen a la superficie terrestre en forma de precipitación, que puede ser lluvia, nieve, aguanieve o granizo. La cantidad y la intensidad de la precipitación varían según factores como la temperatura, la humedad y la presencia de sistemas climáticos como frentes, tormentas y sistemas de baja presión.

Atmósfera

La atmósfera es la capa formada por gases que envuelve a la tierra, la cual se adhiere a la superficie de la tierra por la acción de la gravedad. Cerca de la superficie terrestre se encuentra formada por los siguientes gases: 78% Nitrógeno, 21% de Oxígeno molecular, 0.9% de Argón, así como cantidades menores de dióxido de carbono, vapor de agua, metano, óxido nitroso, helio, neón, criptón, xenón, entre otros (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006).

La atmósfera terrestre se divide en 5 regiones principales que consideran la variación de la temperatura con respecto a la altitud.

Clima

El concepto de clima se deriva de un estudio a largo plazo de las observaciones realizadas durante un extenso periodo de tiempo y se define como el conjunto de condiciones ambientales de un lugar determinado. Se caracteriza por ser precisamente el promedio de los estados de tiempo observados en el periodo de tiempo determinado (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006).

Elementos climatológicos

Algunos de los elementos climatológicos más importantes para la ingeniería son los siguientes (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006).

Tiempo o clima. Se refiere a las condiciones atmosféricas en un momento y lugar determinado. Dichas condiciones son cambiantes y varían de un lugar a otro, así como del tiempo mismo. Entre estas condiciones se encuentran las de precipitación.

Temperatura. La temperatura se define como la magnitud física que expresa el grado de frío o calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional es el kelvin (K) aunque usualmente se reporta en °C. La temperatura es un factor determinante para la ocurrencia de la precipitación en cierto lugar y tiempo.

Humedad relativa. Se refiere al contenido de agua presente en el ambiente y está dado por la relación de la densidad del vapor de agua en un volumen de aire entre la misma densidad del vapor de agua en condiciones de saturación. Se expresa generalmente en un valor de porcentaje al dividir gramos de vapor de agua y multiplicar por 100%; entre más grande sea este valor la atmósfera tendrá un mayor contenido de humedad.

Viento. Es la corriente de aire que se genera por la diferencia de temperaturas y presiones que existe dentro de la atmósfera. El viento es uno de los elementos más importantes en el ciclo hidrológico ya que se encarga de transportar la humedad del mar hacia la superficie continental. Comúnmente la magnitud de la velocidad del viento se mide en metros por segundo (m/s).

Presión atmosférica. Es la presión que ejerce el peso de la columna de aire que gravita sobre cierta unidad de área. Por ello es que la magnitud de esta misma depende directamente de la elevación con respecto a nivel del mar en la que se pretenda determinar dicha condición. Es común que la presión atmosférica se reporte en

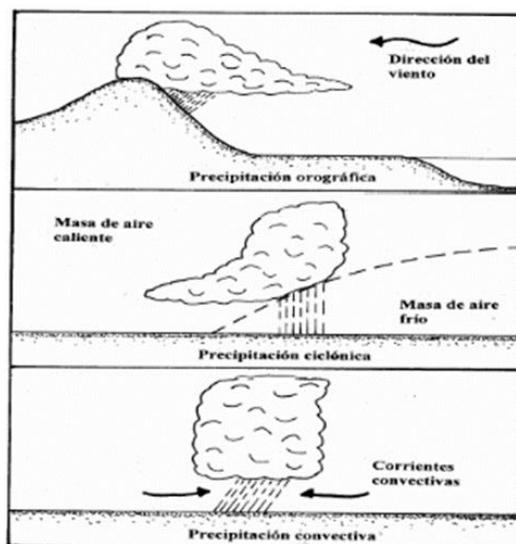
unidades de bares (1 bar es equivalente a 100,000 pascales) o milímetros de mercurio (mm hg).

Precipitación. Es la cantidad de agua que se presenta en forma de lluvia. Esta es la principal forma de precipitación que se presenta en la mayor parte del país y su medición en estaciones climatológicas es fundamental para llevar a cabo estudios hidrológicos. La precipitación suele reportarse en unidades de milímetros (mm) lo que equivale a tener un litro de agua precipitado en un área de un metro cuadrado.

Tipos de precipitación

Dependiendo de la forma en la que el aire se mueve en sentido vertical para convertirse en precipitación, ésta se puede clasificar en tres categorías generales (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006). Ver figura 2.2.

1. **Ciclónicas.** Son las lluvias que se generan debido al paso de ciclones cerca de las regiones tropicales. La masa de aire converge en una zona de baja presión que origina la elevación de esta misma.
2. **Orográficas.** El movimiento para este tipo de lluvias se presenta debido a que las montañas forman una barrera que cambia la dirección del aire en sentido ascendente. La distribución espacial de este tipo de lluvias se relaciona con las pendientes del terreno.
3. **Convectivas.** Se originan por el calentamiento de la superficie del suelo, lo cual provoca el movimiento ascendente del aire húmedo por diferencia de temperaturas.



2.4 Escurrimiento

Cuando ocurre la precipitación, el agua que llega a la superficie terrestre toma varias direcciones las cuales dependen de factores meteorológicos, fisiográficos y antropogénicos de la zona. Teniendo en cuenta esto, el escurrimiento se define como la porción de la precipitación que fluye por gravedad a través de corrientes superficiales que pueden ser perenes, intermitentes o efímeras (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006)

Fuentes del escurrimiento

Las fuentes principales del escurrimiento se clasifican en cuatro categorías (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006)

1. **Precipitación directa sobre el cauce.** Esta es la fuente con menor aportación de escurrimiento puesto que las superficies de los cauces sobre la que cae la precipitación suelen ser relativamente pequeñas.
2. **Flujo subsuperficial.** Este flujo depende de las condiciones de saturación del suelo las cuales generalmente varían en el tiempo y el espacio. También pueden aportar escurrimiento de forma permanente o solo formar corrientes efímeras.
3. **Flujo base.** Lo aportan los sistemas de acuíferos superficiales. Este flujo suele ser modificado por obras hidráulicas que se encuentren dentro de la cuenca de aportación, como lo son las presas.
4. **Escurrimiento directo.** Es el escurrimiento que proviene de la precipitación pluvial.

Medición del escurrimiento

La medición de la cantidad de escurrimiento en un cauce es de vital importancia para muchas aplicaciones de ingeniería hidráulica. Actualmente existe una gran variedad de técnicas y procedimientos que permiten medir el escurrimiento en los cauces y la elección de estos depende de factores como la accesibilidad y el tipo de escurrimiento.

En general se clasifican en los siguientes tres grupos:

- a) Métodos basados en la medición del área y la velocidad en una sección del cauce.

- b) Construcción de estructuras artificiales como aforadores o vertedores de pared delgada.
- c) Métodos de aforo por dilución.

Dependiendo del propósito que tenga la medición del caudal se podrá proponer alguno de estos métodos ya que la precisión que se suele manejar en cada técnica o dispositivo de aforo varía drásticamente en función de las condiciones que se tengan en la corriente que se pretenda aforar.

2.5 Infiltración

Cuando ocurre una precipitación dentro de una cuenca, una parte de esta lluvia se transforma en escurrimiento directo que fluye a través de la superficie del área de aportación, principalmente a través de ríos o arroyos intermitentes que forman parte de la red de drenaje de la cuenca. Otra parte del agua que precipita se queda alojada en diferentes sitios como las hojas de los árboles o se infiltra a través del suelo para alojarse en depósitos de agua subterráneos o fluir de manera subsuperficial. A las porciones de agua que no fluyen a través de escurrimientos superficiales se les denomina como "pérdidas del escurrimiento" y determinar la cantidad de esta agua que no fluye superficialmente toma mayor importancia cuando se trata de la estimación de avenidas o crecientes.

2.5.1 Pérdidas por infiltración

La infiltración es el proceso por el cual cierta porción de agua precipitada atraviesa los poros del suelo y se desplaza hacia el subsuelo para formar parte de las corrientes subterráneas (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006). En la primera etapa de la infiltración, se satisface la ausencia de agua que existe en los poros del suelo para que tiempo después sature estos mismos poros y el agua se desplace a una mayor profundidad.

La infiltración depende principalmente de la estructura del suelo y la textura de este mismo. En términos generales se clasifica la textura del suelo de la siguiente manera:

- Suelo Arenoso
- Suelo Franco

- Suelo Arcilloso

La determinación de las pérdidas por infiltración es de particular interés en zonas no urbanas ya que estas pérdidas suelen ser las de mayor magnitud al contar con una mayor proporción de terreno permeable. La medición directa de la infiltración del suelo se lleva a cabo mediante sondeos en campo o pruebas indirectas de laboratorio que determinan la tasa de infiltración de una muestra representativa del suelo en diferentes condiciones de saturación.

Existe una variedad de métodos para estimar la capacidad de infiltración del suelo los cuales se clasifican en dos grupos, como se explica a continuación:

2.5.1.1 Métodos basados en modelos matemáticos

Dentro del grupo de los modelos matemáticos algunos de los métodos más representativos son:

1. Ecuación de Horton
2. Ecuación de Philip
3. Método de Green y Ampt
4. Entrada mayor o menor que la conductividad hidráulica saturada

Estos métodos se derivan directamente de la ecuación de Richards, la cual es considerada como el modelo matemático representativo del fenómeno del flujo en el medio poroso no saturado (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006).

2.5.1.2 Métodos empíricos.

Los métodos empíricos se emplean cuando se tiene una serie de registros de precipitaciones y de escurrimientos simultáneos dentro de una cuenca. También se apoya en expresiones matemáticas pero su principal fundamento es la relación entre los volúmenes de agua que llueven en una cuenca y el volumen que escurre a la salida. Los métodos más utilizados en la práctica se enlistan a continuación:

1. Criterio de la capacidad de infiltración media
2. Criterio del coeficiente de escurrimiento
3. Criterio del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos de América (USSCS)
4. Método de los números de escurrimiento

Además de las pérdidas por infiltración, existen otro tipo de pérdidas de la precipitación y su determinación toma importancia en cierto tipo de condiciones específicas. Estas pérdidas se mencionan a continuación (Aparicio Mijares, 2012).

2.5.2 Pérdidas por evaporación

La evaporación es el proceso mediante el cual el agua líquida que se encuentra sobre la superficie terrestre en cuerpos de agua o en el suelo pasa a la atmósfera en estado gaseoso. Este fenómeno ocurre por el aumento de temperatura que experimentan las moléculas de agua que se encuentran sobre la superficie del suelo o un cuerpo de agua debido a la radiación solar, el viento y las diferencias de presión de vapor. (Aparicio Mijares, 2012).

2.5.3 Pérdidas por evapotranspiración

En términos de hidrología, la transpiración se define como el agua que las plantas toman del suelo y que tiempo después se despiden en forma de vapor a través de las sus hojas. Cuando este fenómeno se combina junto con la evaporación del agua que es captada sobre las mismas hojas de las plantas se denomina *evapotranspiración*.

2.6 Hietograma

El hietograma es una representación gráfica en barras acerca de la variación de la altura de lluvia o su intensidad en el tiempo (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006). La forma de obtener estos hietogramas es a través de las mediciones de precipitación que se generan en los pluviómetros o pluviógrafos.

Para su determinación es necesario establecer el tamaño del intervalo de tiempo en el que se darán las alturas de lluvia, una vez propuesto se identifica la diferencia de precipitación; la acumulación durante el intervalo anterior se resta de la acumulación total y se obtiene el incremento de precipitación que le corresponde cada intervalo.

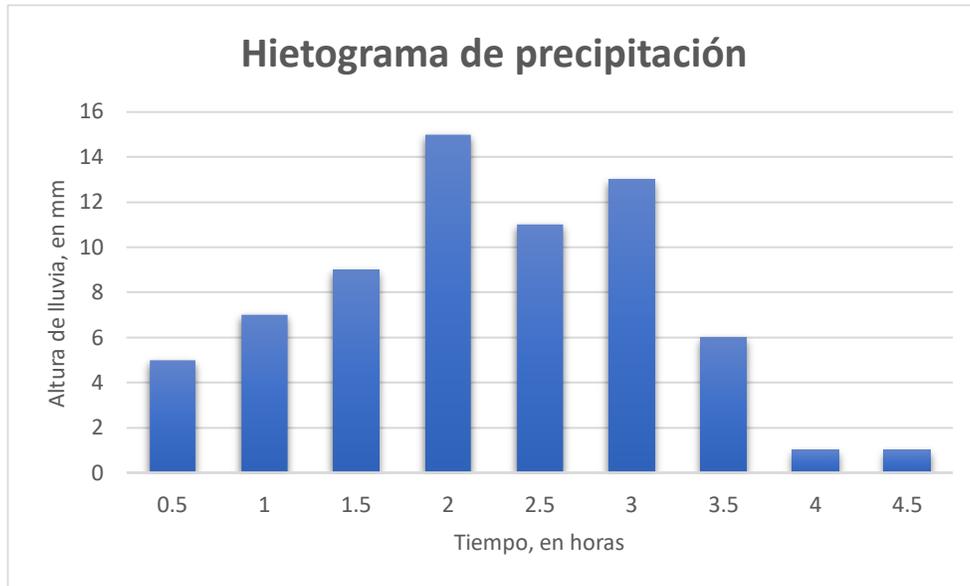


Figura 2.3 Ejemplo de un hietograma de precipitación. Fuente: Elaboración propia

2.8 Hidrograma

Al igual que el hietograma, el hidrograma es una representación gráfica de la variación de los gastos que escurren por un cauce en función del tiempo, medidos en la sección transversal de un río. El lapso en el que se determina un hidrograma suele ser anual o el tiempo que dure una tormenta que se presenta en cierta región, dado que esta misma genera un incremento del caudal del cauce por medio del escurrimiento directo que se aporte.

El hidrograma cuenta con una serie de elementos fundamentales que lo definen de manera particular. Estos elementos se describen a continuación.

Gasto ascendente

Es el valor del gasto en el que inicia la rama ascendente. Se presenta cuando la superficie de la cuenca de aportación se encuentra saturada. Se ubica en el punto A de la figura 2.4

Rama ascendente

Es el tramo del hidrograma que va del punto de gasto ascendente hasta la cresta y presenta una pendiente positiva.

Cresta o pico

Ubicado en el punto B de la figura 2.4, es el punto en el que el gasto toma el valor máximo del hidrograma.

Rama descendente

Es el tramo que va desde la cresta hacia la parte inferior y en ocasiones el descenso es lento con pendientes pequeñas para después aumentar considerablemente su pendiente hasta que se presente un nuevo evento que genere aumento del escurrimiento.

Curva de recesión

Es el tramo en el que se hacen notorias las aportaciones de otros sistemas en los que se acumula el agua durante el aumento del tirante o nivel del cauce. Esta curva de recesión tiende a estabilizarse en las épocas de estiaje en los hidrogramas anuales.

Gasto base

Es el valor del gasto que se considera casi constante al que tiende la curva de recesión y generalmente se asocia con las aportaciones de agua subterránea. Si existen obras de control o almacenamiento, el gasto base se dará a partir de la operación de dichas obras.

Forma del hidrograma.

La forma que tome el hidrograma ya sea anual o de una tormenta, depende en gran medida de las características fisiográficas de la cuenca hidrológica y de otros factores como cambios en la sección del cauce y las riberas de este. En la figura 2.4 se muestra un hidrograma hipotético indicando los elementos antes mencionados

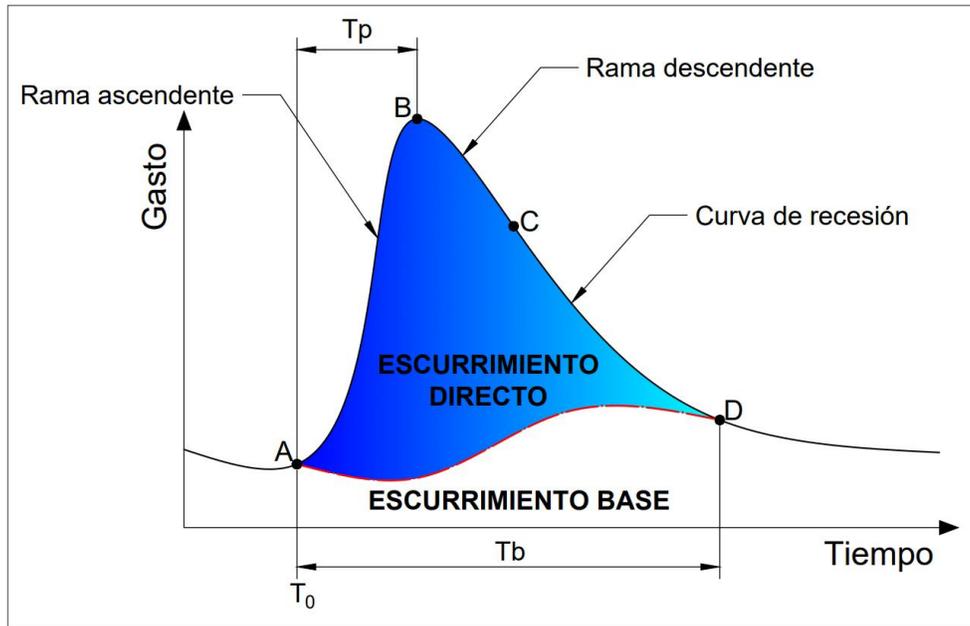


Figura 2.4 Hidrograma de una tormenta aislado. Fuente: Elaboración propia.

2.9 Análisis estadístico de lluvias

El análisis estadístico de lluvias permite obtener eventos que se emplean en el diseño y revisión de obras hidráulicas. Debido a la naturaleza aleatoria de los fenómenos hidrometeorológicos es necesario aplicar métodos y técnicas de estadística y probabilidad para analizar los datos disponibles y extrapolarlos para generar eventos asociados a diferentes periodos de retorno.

Para llevar a cabo el análisis de lluvias, en hidrología se trabaja con series de tiempo, las cuales se forman a partir de registros puntuales de alturas de precipitación dentro de un periodo determinado que en general es de 24 horas. Los eventos de diseño se obtienen a partir de una extrapolación de estos datos disponibles con un ajuste de distribución de probabilidad.

2.9.1 Análisis de frecuencias de eventos extremos

El análisis de frecuencias tiene por objetivo el obtener eventos de diseño asociadas a periodos de retorno determinados a partir de una muestra de datos x_i ajustando la mejor distribución de probabilidad a la serie de datos analizados, que en hidrología suelen ser los valores máximos anuales.

El ajuste de distribución de probabilidad se realiza con base en la estimación de los parámetros estadísticos de las series de tiempo analizadas, los cuales pueden estimarse por medio de diferentes técnicas que deben cumplir con las siguientes propiedades (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002)

Sesgo nulo. Un estimador $\hat{\theta}$ de un parámetro poblacional θ se dice que tiene un sesgo nulo cuando $E(\hat{\theta}) = \theta$. De lo contrario es sesgado.

El sesgo se obtiene como $B = E(\hat{\theta}) - \theta$.

Consistencia. Un estimador $\hat{\theta}$ de un parámetro se dice consistente si para cualquier número positivo ε

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P((\hat{\theta}) - \theta > \varepsilon) = 0 \quad (2-3)$$

Donde n es el tamaño de muestra

Eficiencia. Un estimador $\hat{\theta}$ se dice el más eficiente para θ si tiene sesgo nulo y su varianza es al menos tan pequeña como cualquier otro estimador no sesgado para θ .

Suficiencia. $\hat{\theta}$ es un estimador suficiente para θ , si $\hat{\theta}$ emplea toda la información relevante contenida en la muestra.

2.9.2 Periodo de retorno

En términos prácticos se define como el número de años en los que, en promedio, puede presentarse un evento de cierta magnitud en al menos una ocasión (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006). Este parámetro es el que, en muchos casos, define directa o indirectamente el diseño de las obras hidráulicas que se proyectan como obras de drenaje en infraestructura mayor o para proteger a la población ante la presencia de grandes avenidas o inundaciones.

La expresión más utilizada para estimar el periodo de retorno en un análisis de registros máximos anuales es la propuesta por Weibull en 1939, la cual está dada por la siguiente expresión:

$$T_r = \frac{n + 1}{m} \quad (2-4)$$

donde

Tr Período de retorno, en años

n número total de datos de la muestra analizada

m número de orden que ocupa un determinado valor x_i , si se les ordena de mayor a menor

2.9.3 Pruebas de homogeneidad e independencia

Para considerar que una serie de datos es válida para emplearse en el análisis de frecuencias es necesario aplicar algunas pruebas que demuestren que la serie es homogénea e independiente, en términos matemáticos y estadísticos. Para ello, se cuentan con técnicas y procedimientos que permiten determinar si dichas condiciones se cumplen y cuál es el rango o la fecha específica en la que se perdió la homogeneidad. De la misma forma, la prueba de independencia concluye si los datos observados tienen alguna relación de interdependencia ya que, de ser el caso, la serie de datos no se estaría considerando como un registro de eventos aleatorios y por lo tanto los procedimientos de análisis estadístico no serían válidos.

2.9.3.1 Prueba de homogeneidad de Helmert

Esta prueba analiza el signo de las desviaciones de cada evento Q^j , considerando que una desviación es la diferencia entre el valor Q_i menos la media \bar{Q} de la serie de la serie Q_i^j . Si una desviación de un signo es seguida de otra del mismo signo entonces se dice que se forma una secuencia (S), de lo contrario se considera como un cambio (C). (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002)

Entonces, la serie de datos analizada se considera homogénea si se cumple:

$$-\sqrt{n-1} \leq (S^* - C^*) \leq \sqrt{n-1} \quad (2-5)$$

Donde:

n tamaño de la muestra

S^* suma de secuencias

C^* suma de cambios

2.9.3.2 Prueba de homogeneidad T de student

La prueba del estadístico T de Student es muy útil cuando la pérdida de homogeneidad se deba a un posible cambio abrupto de la media (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002).

Si se considera una serie Q_i^j para $i = 1, 2, \dots, n_j$, del sitio j , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$ entonces, el estadístico de prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (2-6)$$

Donde:

\bar{x}_1, S_1^2 son la media y varianza, respectivamente, de la 1ª parte de la muestra

\bar{x}_2, S_2^2 son la media y varianza, respectivamente, de la 2ª parte de la muestra

El valor absoluto de t_d se compara con el valor $x_{0.05}$ de la distribución t de Student de dos colas con $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad para un nivel de confianza $\alpha = 0.05$

Si y solo si el valor $|t_d| > t$ se concluye que la muestra es no homogénea.

2.9.3.3 Prueba de homogeneidad de Cramer

Esta prueba tiene dos objetivos: primero, determinar si los registros estudiados son consistentes en su comportamiento; y segundo, evaluar si el valor medio de dichos registros se mantiene estable a lo largo de un periodo de tiempo corto. Para lograr esto, se dividen los datos en tres bloques; el primero abarca todos los valores de la muestra, el segundo contiene el 60% de los primeros valores de la muestra y el tercero solo el 30% de los primeros valores (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002).

La prueba compara el valor promedio \bar{x} del conjunto completo con los valores promedio de los otros dos bloques más pequeños \bar{x}_{60} y \bar{x}_{30} . Para considerar que la serie es estacionaria en términos del valor de la media, no deben existir diferencias significativas entre los promedios de estos bloques.

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w[1 - (\zeta_w)^2]} \right\}^{1/2} |\zeta_w| \quad (2-7)$$

Para $w = 60$ y $w = 30$

$$\zeta_{60}^j = \frac{P_{60}^j - \bar{P}^j}{S_p^j} \quad (2-8)$$

$$\zeta_{30}^j = \frac{P_{30}^j - \bar{P}^j}{S_p^j} \quad (2-9)$$

$$\bar{P}^j = \sum_{j=1}^{n_j} \frac{P_j}{n} \quad (2-10)$$

El estadístico t_w tiene una distribución “T de Student” de dos colas con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un $\alpha = 0.05$.

Si y solo si $|t_w|$ para $w=60$ y $w=30$ es mayor que el de la T de Student ($\alpha = 0.05$), se concluye que la diferencia entre las medias es significativa y, por lo tanto, la serie es considerada “NO HOMOGÉNEA”.

2.9.3.4 Prueba de independencia de Anderson

Para que se pueda llevar a cabo el análisis de frecuencias se requiere que la muestra x_i^j , de la serie j para $i = 1, 2, \dots, n_j$ esté compuesta por las variables aleatorias. Para probarlo se aplica la prueba independencia de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial r_k^j para diferentes tiempos de retraso de k (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002).

La expresión para el coeficiente de autocorrelación serial de retraso k es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (x_i^j - \bar{x}^j)(x_{i+k}^j - \bar{x}^j)}{\sum_{i=1}^n (x_i^j - \bar{x}^j)^2} \quad (2-11)$$

Para

$$r_0^j = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, \frac{n_j}{3} \quad (2-12)$$

Donde:

$$\bar{x}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{x_i^j}{n_j} \quad (2-13)$$

Además, los límites a 95% de confianza para r_k^j se puede obtener como:

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k} \quad (2-14)$$

La gráfica de los valores estimados para r_k^j (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra.

Si solo el 10 % de los valores de r_k^j sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie x_i^j es independiente.

2.10 Función de distribución de probabilidad

En hidrología, se suele trabajar con variables aleatorias como son los máximos anuales de las alturas de precipitación registradas cada 24 horas en estaciones climatológicas o los máximos anuales de los gastos diarios registrados en estaciones hidrométricas. Estas variables

aleatorias se denominan discretas ya que se basan en observaciones puntuales que se realizan periódicamente y cada una de ellas cuenta con una función de distribución de probabilidad que caracteriza a los datos que se han registrado.

Una función de distribución de probabilidad es aquella descripción matemática que relaciona probabilidades a cada valor posible de una variable aleatoria. Esta función proporciona una representación completa de la distribución de las probabilidades asociadas con cada valor posible de un conjunto de datos, la cual debe cumplir con dos requisitos fundamentales: la suma de toda la probabilidad es igual a 1 y todas las probabilidades son positivas.

En términos formales, si X es una variable aleatoria

La función de distribución de probabilidad de una variable continua define, para cada valor posible x de la variable aleatoria X , la probabilidad de observar dicho valor cuando se registra un evento o experimento.

Esto es:

$$p(x) = P(X = x) = P \quad (2-15)$$

2.10.1 Parámetro de una distribución de probabilidad

Si una variable aleatoria describe una serie de resultados que toman valores diferentes en cada serie de eventos, entonces existe un número o parámetro que se asigna a una familia de funciones de distribución, con un valor diferente para cada una de ellas, que permite identificar a las variables aleatorias que cuentan con cierto comportamiento estadístico.

Estos valores se denominan parámetros particulares ya que dependen de las medidas de localización, dispersión, sesgo y aplanamiento, las cuales a su vez suelen llamarse parámetros generales de la distribución. Ambos “tipos” de parámetros permiten describir y clasificar a las funciones de probabilidad.

Los parámetros particulares de una distribución de probabilidad permiten elegir alguna función en específico, de entre una familia de distribuciones, que describe de mejor manera la forma en que se distribuyen las probabilidades o los resultados de las observaciones que se están analizando.

Los parámetros son valores fijos que afectan la forma, la ubicación y la escala de una distribución de probabilidad en específico. Cada distribución y familia de distribuciones tienen sus propios parámetros específicos. Por ejemplo, en la distribución normal, los parámetros son la media (μ) y la desviación estándar (σ), que determinan la forma y la dispersión de la distribución. En la distribución exponencial, por otro lado, el parámetro es la tasa (λ), que controla la tasa de decaimiento de la distribución.

A continuación, se presentan las funciones de probabilidad empleadas en el presente trabajo:

2.10.2 Distribución normal

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2-16)$$

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

Donde:

μ : parámetro de ubicación

σ : parámetro de ubicación

Estimadores por momentos y máxima verosimilitud

$$\hat{\mu} = \lambda_1 \quad (2-17)$$

$$\hat{\sigma} = 1.772\lambda_2 \quad (2-18)$$

Los eventos de diseño se obtienen con:

$$\hat{X}_T = \hat{\mu} + \hat{\sigma}U_T \quad (2-19)$$

Donde:

b_0 : 2.515517

$$b_1: 0.802853$$

$$b_2: 0.010328$$

$$b_3: 1.432788$$

$$b_4: 0.189269$$

$$b_5: 0.001308$$

$$V = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{\left(\frac{1}{T}\right)^2} \right\}} \quad (2-20)$$

Para $0 < F(x) \leq 0.5$

$$F(x) = \frac{1}{T} \quad (2-21)$$

Para $0.5 < F(x) \leq 1.0$

$$F(x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (2-22)$$

Así como el cambio del signo de la variable U_T

2.10.3 Distribución Log-Normal de 2 parámetros.

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2} \quad x > 0 \quad (2-23)$$

Donde:

μ : parámetro de ubicación

σ_y : parámetro de escala

$y > 0$

Estimadores por momentos y máxima verosimilitud

$$\hat{u}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (2-24)$$

$$\hat{u}_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(x_i - \hat{u}_y)^2}{n} \quad (2-25)$$

Los eventos de diseño se obtienen con:

$$\hat{X}_T = \exp\{\hat{u}_y + \hat{\sigma}U_T\} \quad (2-26)$$

2.10.4 Distribución Log-Normal de 3 parámetros

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x-x_0)-\mu_y}{\sigma_y}\right]^2} \quad x > 0 \quad (2-27)$$

Donde:

x_0 : parámetro de ubicación

u_y : parámetro de forma

σ_y : parámetro de escala

Estimadores por momentos

$$\hat{X}_0 = \hat{x} \left(1 - \frac{\hat{\eta}_x}{\hat{\eta}_z}\right) \quad (2-28)$$

Donde:

$$\hat{\eta}_x = \frac{S}{\bar{x}} \quad (2-29)$$

$$\hat{\eta}_z = \frac{1 - w^{2/3}}{w^{1/3}} \quad (2-30)$$

$$w = \frac{(g^2 + 4)^{1/2} - g}{2} \quad (2-31)$$

$$\hat{u}_y = \ln\left(\frac{S}{\hat{\eta}_z}\right) - \frac{1}{2} \ln(\hat{\eta}_z^2 + 1) \quad (2-32)$$

$$\hat{\sigma}_y = [\ln(\hat{\eta}_z^2) + 1]^{1/2} \quad (2-33)$$

Estimadores por máxima verosimilitud

$$\hat{u}_y = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i - \hat{x}_0)}{n}$$

$$\hat{\sigma}_y = \sum_{i=1}^n \frac{[\ln(x_i - \hat{x}_0) - \hat{u}_y]^2}{n} \quad (2-34)$$

El estimador \hat{x}_0 se obtiene al resolver

$$F(\hat{x}_0) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(x_i - \hat{x}_0)} (\hat{u}_y - \hat{\sigma}_y^2) - \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{(x_i - \hat{x}_0)} \right] \ln(x_i - \hat{x}_0) = 0 \quad (2-35)$$

Los eventos de diseño se obtienen con:

$$\hat{X}_T = \hat{x}_0 + e^{(\hat{u}_y + U_T \hat{\sigma}_y)} \quad (2-36)$$

2.10.5 Distribución Gumbel

De acuerdo con (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002) la distribución Gumbel se puede definir de la siguiente manera:

$$F(x) = e^{-e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]}}$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]} e^{-e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]}} \quad (2-37)$$

$$0 \leq x < \infty$$

$$\alpha > 0$$

Donde:

v : parámetro de ubicación

α : parámetro de escala

Estimadores por momentos:

$$\hat{v} = \bar{x} - 0.45 S \quad (2-38)$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S \quad (2-39)$$

Estimadores por máxima verosimilitud

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i} \quad (2-40)$$

$$R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i}$$

El criterio de convergencia es:

$$\frac{P}{\hat{\alpha}} \approx 0 \text{ y } \frac{-R}{\hat{\alpha}} \approx 0$$

Incrementos

$$\delta_{v_j} = (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_i}{n} \tag{2-41}$$

$$\delta_{\alpha_j} = (0.26P_j - 0.6R_j) \frac{\alpha_i}{n}$$

Nuevos valores

$$\hat{v}_{j+1} = \hat{v}_j + \delta_{v_j} \tag{2-42}$$

$$\hat{\alpha}_{j+1} = \hat{\alpha}_j + \delta_{\alpha_j}$$

Los eventos de diseño se obtienen con:

$$\hat{X}_T = \hat{\mu} + \hat{\alpha} \ln \left\{ -\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right\} \tag{2-43}$$

2.10.5 Distribución Doble Gumbel

Cuando existen un proceso en el cual se observa que los datos se comportan como dos poblaciones, la función Doble Gumbel generalmente es la que mejor se ajusta.

Las funciones de distribución y de densidad probabilidades está dadas por las siguientes ecuaciones:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} p + (1-p)e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \quad (2-44)$$

$$f(x) = p \alpha_1 (e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}})^{e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} + ((1-p) \alpha_2 e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}})^{e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}}$$

Donde:

α_1 y β_1 = parámetros de la primera población

α_2 y β_2 = parámetro de la segunda población

p = es la relación que existe entre el número de datos de la primera y segunda población y en la ecuación:

$$\begin{aligned} y_1 &= \alpha_1(x - \beta_1) \\ y_2 &= \alpha_2(x - \beta_2) \end{aligned} \quad (2-45)$$

La variable estandarizada Z se calcula de igual manera que la distribución Gumbel.

2.11 Estimación de parámetros poblacionales

Los parámetros estadísticos son cantidades numéricas que resumen una gran cantidad de datos analizados y representan propiedades fundamentales de la distribución de la población. Estos parámetros consideran una población completa a partir de una muestra de datos representativos y se calculan mediante expresiones aritméticas obtenidos a partir de los datos muestrales o de la población completa.

Algunas de las técnicas comunes que se usan en hidrología se presentan a continuación:

2.11.1 Método de momentos

Este método es un procedimiento muy sencillo que consiste en plantear un sistema de ecuaciones cuyo tamaño depende del número de parámetros que se busque estimar. Esto se hace al igualar los momentos poblacionales con los momentos muestrales.

2.11.1.1 Momentos muestrales

Los momentos muestrales, también conocidos como estadísticos muestrales, se obtienen con las siguientes expresiones, para una serie de datos x_i .

1. Media

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2-46)$$

2. Varianza sesgada

$$S_{sesg}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2-47)$$

3. Varianza insesgada

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2-48)$$

4. Coeficiente de asimetría sesgado

$$g_{sesg} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(S_{sesg}^2)^{3/2}} \quad (2-49)$$

5. Coeficiente de asimetría insesgado

$$g = \frac{1}{(n-1)(n-2)} * \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(S_{sesg}^2)^{3/2}} \quad (2-50)$$

6. Coeficiente de curtosis sesgado

$$k_{sesg} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(S_{sesg}^2)^2} \quad (2-51)$$

7. Coeficiente de curtosis incesgado

$$k = \frac{1}{(n-1)(n-2)(n-3)} * \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(S_{sesg}^2)^2} \quad (2-52)$$

8. Desviación estándar

$$S = \sqrt{S^2} \quad (2-53)$$

9. Coeficiente de variación

$$C.V = \frac{S}{\bar{X}} \quad (2-54)$$

Este último parámetro es uno de los más empleados para determinar la homogeneidad de los datos e indica el grado de variabilidad de los datos de la serie con respecto a la media al representar a la desviación estándar como un porcentaje de la media muestral.

2.11.1.2 Momentos poblacionales

Los momentos poblacionales con respecto al origen se obtienen con las siguientes expresiones (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002)

$$M_r = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx \quad (2-55)$$

Por otra parte, los momentos poblacionales con respecto a la media se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$M_r^\mu = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^r f(x) dx \quad (2-56)$$

2.11.2 Método de máxima verosimilitud

Sea $f(x; a_1, a_2, \dots, a_m)$ una función de densidad de probabilidad de x con parámetros $a_i, i = 1, \dots, m$. Si existe una muestra aleatoria x_1, x_2, \dots, x_n de esta función de densidad, entonces, su función de densidad conjunta es $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n; a_1, a_2, \dots, a_m)$. Debido a que la muestra es aleatoria, la función de densidad conjunta se puede escribir como se menciona a continuación (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002).

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n; a_1, a_2, \dots, a_m) = \prod_{i=1}^n f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m) \quad (2-57)$$

Interpretado en forma conceptual, la probabilidad de obtener un valor dado de x , por ejemplo x_1 es proporcional a $f(x; a_1, a_2, \dots, a_m)$. Por otro lado, la probabilidad de obtener la muestra aleatoria x_1, x_2, \dots, x_n a partir de la población de x es proporcional al producto de sus densidades de probabilidad individual. Esta función conjunta es llamada la función de verosimilitud L (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002).

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i; a_1, a_2, a, \dots, a_m) \quad (2-58)$$

El método de máxima verosimilitud estima los parámetros al maximizar L , esto es, maximizando la probabilidad de que la muestra bajo consideración provenga de la función de densidad de probabilidades $f(x; a_1, a_2, \dots, a_m)$. Los valores de los parámetros obtenidos se conocen como los estimadores por máxima verosimilitud. Debido a que con $\ln(L)$ se alcanza también su máximo para valores específicos de $a_i, i = 1, 2, \dots, m$ como lo hace L , entonces, la función de máxima verosimilitud se puede expresar como:

$$\ln L = \ln \prod_{i=1}^n f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m) \quad (2-59)$$

3. Marco Teórico

Para convertir la lluvia que precipita dentro del área de una cuenca en escurrimiento que fluye por un cauce es necesario hacer uso de modelos lluvia-escurrimiento. Estos modelos consideran los procesos de producción y la transferencia: la producción se basa en las pérdidas de la precipitación, como es la infiltración y la evaporación, mientras que la transferencia trata de describir como es la distribución del escurrimiento a lo largo de la cuenca hasta llegar al punto de interés.

Los modelos lluvia-escurrimiento consideran las características fisiográficas de las cuencas para estimar la magnitud de los eventos con las que se pretenden diseñar las obras hidráulicas, por lo antes mencionado los modelos se agrupan de la siguiente forma:

- 1. Modelos de parámetros concentrados**
- 2. Modelos de parámetros semi-distribuidos**
- 3. Modelos de parámetros distribuidos**

En el caso de los modelos de parámetros concentrados se toman valores medios de las características fisiográficas para estimar los escurrimientos de la cuenca en estudio, un modelo por parámetros semi-distribuidos genera una división del área de aportación considerada en subcuencas de menor tamaño para aplicar los procesos de modelación en cada una de estas áreas.

Por su parte, los modelos de parámetros distribuidos consideran una discretización de la cuenca estudiada en elementos más pequeños de forma regular que generan una malla de celdas para considerar la variación espacial de las características fisiográficas.

En este sentido, se destaca el hecho de que un modelo por parámetros distribuidos logra replicar las condiciones del terreno con mayor y mejor detalle que un modelo de parámetros concentrados o semi-distribuidos ya que se trabaja con información digitalizada y detallada

de la zona en estudio, lo cual tiene repercusión directa en los resultados que se obtienen como producto del estudio hidrológico. Por estos motivos, la modelación hidrológica por parámetros distribuidos logra obtener resultados más confiables y sustentados en comparación con los modelos antes mencionados.

3.1 Regionalización de lluvias

En la República Mexicana se cuenta con una red de estaciones climatológicas que se han instalado con el propósito de registrar datos diarios de temperatura y precipitación pluvial. Aunque el número de estaciones actualmente es bastante extenso (más de 5000 en todo el país) la realidad es que no todas cuentan con registros suficientes en cantidad o calidad, esto debido a factores como las condiciones del equipo que se encuentra instalado, así como del personal que se encarga de operar y registrar esta información de manera manual. Además de esto, algunas de estas estaciones se encuentran en desuso o tienen grandes periodos de tiempo en los que no se llevaron a cabo los registros.

Para elaborar estudios hidrológicos confiables, se requiere contar con una buena cantidad de registros de lluvias a lo largo de un mínimo número de años. En general se acepta un registro con al menos 20 años de mediciones continuas, pero es deseable contar con una mayor cantidad. Como no es posible cumplir esta condición para gran parte de las cuencas y subcuencas del país, es necesario realizar un análisis regional de estos registros de precipitación a fin de conformar una muestra única integrada por registros de varias estaciones que pertenecen a una región homogénea.

Por lo antes mencionado, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) en colaboración con el Instituto de Ingeniería de la UNAM, elaboró en el año de 2017 un estudio de regionalización para obtener gastos de avenidas máximas y mapas de riesgo de inundaciones considerando más de 2000 estaciones pluviométricas instaladas dentro del país, cuyos resultados son aplicables en cualquier cuenca del territorio mexicano. El estudio se llevó a cabo empleando los datos de lluvias máximas anuales registradas en cada estación climatológica seleccionada con base en criterios establecidos acerca de cantidad de años registrados y la ubicación de estas, para depurar los valores ilógicos e incorrectos y de esta manera definir las regiones homogéneas tomando en cuenta los coeficientes de variación topografía (Domínguez et al.,2017).

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de un análisis similar aplicado a las zonas afectadas por el desbordamiento del río Tula en el año de 2021, en particular se

analizan estaciones cercanas y dentro de las cuencas de los ríos Rosas y Tlautla para conformar la región homogénea que comprende a ambas cuencas y de esta manera obtener lluvias de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno.

3.2 Regiones homogéneas

Para garantizar una buena regionalización de lluvias, es necesario determinar cuáles son las estaciones que conforman a una región homogénea ya que esta misma será la que va a describir la ocurrencia de eventos en todos los sitios considerados dentro del análisis. Para delimitar dicha región se debe determinar cuáles son las estaciones que cuentan con parámetros estadísticos similares ya que con base en esos parámetros se conforma la región homogénea y se procede a llevar a cabo la regionalización de lluvias máximas anuales.

Existen técnicas que se emplean en conjunto para obtener las estaciones que pertenecen a una misma región homogénea y que consideran diferentes parámetros estadísticos de las muestras de cada estación climatológica. En particular algunas de las técnicas que mayor aceptación han tenido en la práctica son las siguientes:

1. **Método geográfico.**
2. **Método de los trazos multidimensionales.**
3. **Método de la región de influencia.**
4. **Método de coeficiente de variación.**
5. **Método de coeficiente de variación por Momentos L**

Sin embargo, a pesar de contar con varios métodos aplicables, en este trabajo se emplea el método del coeficiente de variación considerando los momentos L ya que la metodología da como resultado una representación gráfica que permite visualizar los límites de la región homogénea de una manera clara, los cuales se establecen con base en los valores promedio de propiedades estadísticas de los registros analizados. Además, se comparan los resultados obtenidos mediante este método y el del coeficiente de variación convencional ya que debido a que la estimación por momentos L considera que los datos se comportan como una distribución normal se presenta cierto grado de incertidumbre, la cual se compensa al realizar la comparación de los resultados por ambas metodologías.

3.2.1 Método del coeficiente de variación

Este método, como su nombre lo indica, hace uso del parámetro estadístico denominado Coeficiente de Variación, descrito en el capítulo 2.10 el cual se determina para cada una de

las series de datos, para que posteriormente estos valores sean agrupados y ordenados de mayor a menor.

La aplicación del método en este trabajo se emplea después de obtener una región homogénea determinada por el método de momentos-L como una comprobación de que la región obtenida realmente corresponda a un grupo de estaciones homogéneas.

3.2.2 Método del coeficiente de variación por momentos L

El método del coeficiente de variación considerando los momentos-L presenta una modificación con respecto al método que lleva el mismo nombre, pero empleando momentos convencionales ya que los estadísticos muestrales se obtienen a partir de los momentos de probabilidad pesada, los cuales se definen en el siguiente subcapítulo 3.2.2.2. Al obtener los parámetros estadísticos por dichos momentos se aplican las relaciones correspondientes para obtener el coeficiente de variación τ_2 para cada una de las muestras de datos analizadas.

Para establecer los límites de la región homogénea se calcula el promedio de los valores de coeficiente de variación obtenidos en cada registro, así como la desviación estándar y de esta forma los límites quedarán definidos como:

Límite inferior:

$$\bar{\tau}_2 - S_\tau$$

Límite superior:

$$\bar{\tau}_2 + S_\tau$$

Donde:

$\bar{\tau}_2$ Promedio de los coeficientes de variación por momentos-L

S_τ Desviación estándar de los coeficientes de variación por momentos-L

Una vez establecidos estos límites, se grafica cada valor de τ_2 en el eje de las ordenadas y se observa cuáles son los coeficientes que caen dentro de los límites establecidos ya que las estaciones asociadas a estos valores serán las que van a conformar la región homogénea. A continuación, se detalla la forma en la que se obtienen los valores de coeficientes de variación τ_2 a partir de los momentos-L.

3.2.2.1 Momentos-L

Los momentos-L son análogos a los momentos convencionales, sin embargo, tienen cierta ventaja sobre estos ya que son capaces de caracterizar a un mayor número de distribuciones, además de estar virtualmente libres de sesgo aun para muestras pequeñas.

El primer estimador por momentos-L es la media, que se define como:

$$\lambda_1 = [X] \quad (3-1)$$

Sea $x_{(i|n)}$ la i -ésima observación en una muestra de tamaño n , ordenada de mayor a menor. Entonces, para cualquier distribución de probabilidad el segundo momento-L es una descripción de escala basada en la diferencia esperada entre dos observaciones seleccionadas de forma aleatoria

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} E [X_{(1|2)} - X_{(2|2)}] \quad (3-2)$$

De forma similar, el sesgo y la curtosis se obtienen como:

$$\lambda_3 = \frac{1}{2} E [X_{(1|3)} - 2X_{(2|3)} + X_{(3|3)}] \quad (3-3)$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{2} E [X_{(1|4)} - 3X_{(2|4)} + 3X_{(3|4)} - X_{(4|4)}] \quad (3-4)$$

Los momentos-L pueden estimarse en función de los momentos de probabilidad pesada. Los cuatro primeros momentos-L son:

1. Media

$$\lambda_1 = \beta_0 \quad (3-5)$$

2. Varianza

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (3-6)$$

3. Sesgo

$$\lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (3-7)$$

4. Curtosis

$$\lambda_4 = 20\beta_3 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (3-8)$$

En donde:

$$\beta_0 = \widehat{M}_0; \quad \beta_1 = \widehat{M}_1; \quad \beta_2 = \widehat{M}_2; \quad \beta_3 = \widehat{M}_3$$

Siendo $\widehat{M}_0, \widehat{M}_1, \widehat{M}_2, \widehat{M}_3$ los primeros momentos de probabilidad pesada.

Coefficientes por momentos-L

Una vez conocidas $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ y λ_4 se pueden obtener las relaciones de los momentos-L

1. Coeficiente de variación

$$\tau_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (3-9)$$

2. Coeficiente de Sesgo

$$\tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (3-10)$$

3. Coeficiente de Curtosis

$$\tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \quad (3-11)$$

La forma más práctica de obtener los estimadores muestrales por momentos-L es a partir de los momentos de probabilidad pesada ya que estos se obtienen con expresiones que se aplican directamente a las series de datos que se están analizando, las cuales se enlistan a continuación.

3.2.2.2 Momentos de probabilidad pesada.

Los momentos de probabilidad pesada generalizan los momentos tradicionales al asignar pesos diferentes a los valores en una distribución. Estos momentos son útiles para tener en cuenta la importancia relativa de los valores y para ajustar modelos estadísticos más flexibles a los datos de la muestra que se está analizando.

Los estadísticos por momentos de probabilidad pesada se definen de la siguiente manera:

1. Media

$$\hat{M}_{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3-12)$$

2. Varianza

$$\hat{M}_{(1)} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} x_i(n-i) \quad (3-13)$$

3. Sesgo

$$\hat{M}_{(2)} = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-2} x_i(n-i)(n-i-1) \quad (3-14)$$

4. Curtosis

$$\hat{M}_{(3)} = \frac{1}{n(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^{n-3} x_i(n-i)(n-i-1)(n-i-2) \quad (3-15)$$

3.3 Técnicas regionales

A partir de una región homogénea, se podrán inferir eventos de diseño asociados a diferentes periodos de retorno mediante la aplicación de diversas técnicas regionales que se han desarrollado para este fin. Este tipo de análisis es útil al momento de determinar los eventos para los que habrán de proyectarse las obras hidráulicas, especialmente en los sitios en donde se cuenta con escasa o nula información. (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002).

Como se ha mencionado, a lo largo de las últimas décadas se han logrado desarrollar una gran variedad de técnicas de regionalización que permiten realizar la estimación de las lluvias y caudales de diseño que se requieren para el diseño de las obras hidráulicas.

Algunas de las técnicas que han tenido mayor aplicación dentro de la práctica de la ingeniería hidrológica se enlistan a continuación:

1. **Técnica de correlación y regresión múltiple**
2. **Método de Dairymple**
3. **Método de los momentos estandarizados de probabilidad pesada**
4. **Método de la estimación multivariada de valores extremos**
5. **Técnica de las estaciones-año**

3.3.1 Técnica de las estaciones-año

A pesar de esta variedad de métodos, existe una técnica que permite realizar el análisis regional de una manera práctica debido a que considera el tratamiento de una sola muestra de datos conformada por un registro estandarizado de eventos. Esta técnica se denomina la *Técnica de las estaciones año*. A continuación, se describen algunas recomendaciones para su uso, así como la metodología que se debe seguir para su implementación en el análisis regional. (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002)

- No requiere que las muestras tengan un periodo de registro en común, lo cual es muy útil para aplicaciones en las que no se cuenta con suficiente registro de datos de lluvias
- Se recomienda un tamaño de muestra de al menos 10 años
- Si se tiene poco menos de 10 años de registro es válido emplear este método verificando que este registro no afecte el comportamiento del fenómeno en la región.

A continuación, se describen los pasos a seguir para aplicar este método y obtener una serie de factores regionales.

1. **Paso 1.** Con la región definida, se prueba la homogeneidad de las series de datos empleando las pruebas de homogeneidad e independencia.
2. **Paso 2.** Se obtienen los siguientes estadísticos muestrales empleando las expresiones definidas en el capítulo 2 ($\bar{x}, S^2, S, g, k, C_V$) para cada una de las series de datos.

\bar{x}	Media muestral
S^2	Varianza
S	Desviación estándar
g	Coefficiente de asimetría
k	Coefficiente de curtosis
C_V	Coefficiente de variación

3. **Paso 3.** Se verifica la independencia de eventos a través de la prueba de Anderson.
4. **Paso 4.** Para cada serie de datos X se genera una muestra modulada dividiendo cada valor de la serie entre la media muestral. Se obtiene una serie de la forma:

$$q = \frac{x}{\bar{X}} \quad (3-16)$$

5. **Paso 5.** Se conforma el registro de estaciones año, el cual tendrá un tamaño de

$$n_T = \sum_{j=1}^{ms} n_j \quad (3-17)$$

La cual se conforma de todos los eventos modulados q_i

6. **Paso 6.** Se asigna un periodo de retorno ordenando de mayor a menor los datos del registro y aplicando la siguiente expresión (2-2) descrita en el capítulo 2:

$$T_r = \frac{n + 1}{m} \quad (2-2)$$

Donde

T periodo de retorno, en años

- n_T tamaño de muestra del registro estaciones-año
- m número de orden de registro, desde $m=1, 2, \dots, n_T$
- P probabilidad de no excedencia

7. **Paso 7.** Se realiza el ajuste de las diferentes distribuciones de probabilidad para el análisis de la serie modulada.
8. **Paso 8.** Con la distribución de mejor ajuste es posible estimar los eventos regionales x_T^R para distintos periodos de retorno. Estos eventos regionales son válidos para cualquier punto dentro de la zona de estudio y quedan definidos de la siguiente manera:

$$(x)_T^R = \left(\frac{x}{\bar{X}} \right)_T^R \quad (3-18)$$

Para: $T = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 100, 5,000$ y $10,000$ años

9. **Paso 9.** A partir de los eventos regionales es posible obtener un evento Q_T^j de un sitio j que tiene escasa información multiplicando la relación regional que se obtuvo en el paso anterior por el valor correspondiente \bar{x}_j .

3.4 Factores de convectividad

Estimar los eventos de diseño de las obras hidráulicas implica conocer cuál será la magnitud de dichos eventos asociados a un periodo de retorno, pero también se debe conocer la intensidad de las lluvias que generan esos eventos. Actualmente no es posible determinar esas intensidades de manera directa empleando registros de lluvia ya que la mayoría de estos se han tomado de mediciones hechas en pluviómetros que no detallan la distribución de la lluvia a lo largo del día si no que dan valores acumulados a cada 24 horas.

Para compensar el hecho de que no se cuentan con suficientes registros pluviográficos, se cuentan con metodologías que permiten obtener lluvias de diseño con una duración menor a 24 horas, siendo los trabajos de (Bell, 1969) y el método de (Chen,1983) los más utilizados actualmente.

(Baeza, 2007) en su trabajo de Tesis de Maestría realizó un estudio de regionalización de lluvias considerando las características topográficas y climatológicas de cada zona del país teniendo como resultado una subdivisión del territorio mexicano en tres regiones distintas en las cuales recomienda usar diferentes rangos de valores del factor R, el cual se define de la siguiente manera:

$$R = \frac{P_1^T}{P_{24}^T} \quad (3-19)$$

Donde:

P_1^T Altura de precipitación para 1 hora y un periodo de retorno T

P_{24}^T Altura de precipitación para 24 horas y un periodo de retorno T

Labrada retomo el trabajo de Baeza y actualizó los valores recomendados de factor de convectividad dando una propuesta puntual para cada región determinada. Estos valores se aprecian en el mapa de la figura 3.1.



Figura 3.1 Factores de convectividad para diferentes regiones de México (Labrada, 2018)

El mapa anterior indica qué porcentaje de la lluvia total se precipita durante la primera hora, es decir, en un sitio con un factor de convectividad de 0.45 se indica que el 45% del total de la lluvia se precipita durante la primera hora del evento.

3.5 Factores de reducción por área

El factor de reducción por área es un coeficiente que convierte las precipitaciones puntuales obtenidas en una zona determinada en precipitaciones areales que representan como se distribuye la lluvia considerada en toda el área de una cuenca determinada, dada una duración y un periodo de retorno específicos. La precipitación areal se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$P_a = FRA * P_p \quad (3-20)$$

Donde:

P_a precipitación “areal” para toda la zona considerada, dado un periodo de retorno y una duración, en mm

P_p precipitación media de los valores puntuales de la zona, para un área, periodo de retorno y duración específica, en mm

FRA factor de reducción por área, dada un área, periodo de retorno y duración específicos, adimensional

Este factor de reducción por área busca reducir la magnitud de las lluvias de diseño ya que debido a que los modelos hidrológicos no toman en cuenta la simultaneidad de eventos extremos que pueden presentarse en una cuenca en estudio estos suelen sobreestimarse dando lugar a obras hidráulicas sobredimensionadas y encarecidas.

En este sentido el uso de un factor de reducción por área toma importancia al momento de estudiar cuencas que tienen áreas muy extensas ya que la distribución espacial de las lluvias que se presentan en estas zonas de estudio suele ser un tanto compleja conforme el tamaño de la cuenca aumenta. Por ello, se han delimitado regiones dentro del territorio mexicano que representan el valor del factor de reducción por área en cierta zona en común; estos factores se han actualizado constantemente, siendo el trabajo de tesis de maestría de (Sánchez, 2017) el estudio más reciente en el que se han actualizado los factores para las distintas regiones consideradas. En la figura 3.2 se observan dichas regiones en las que se cuenta con un factor de reducción por área determinado con base en los trabajos mencionados.

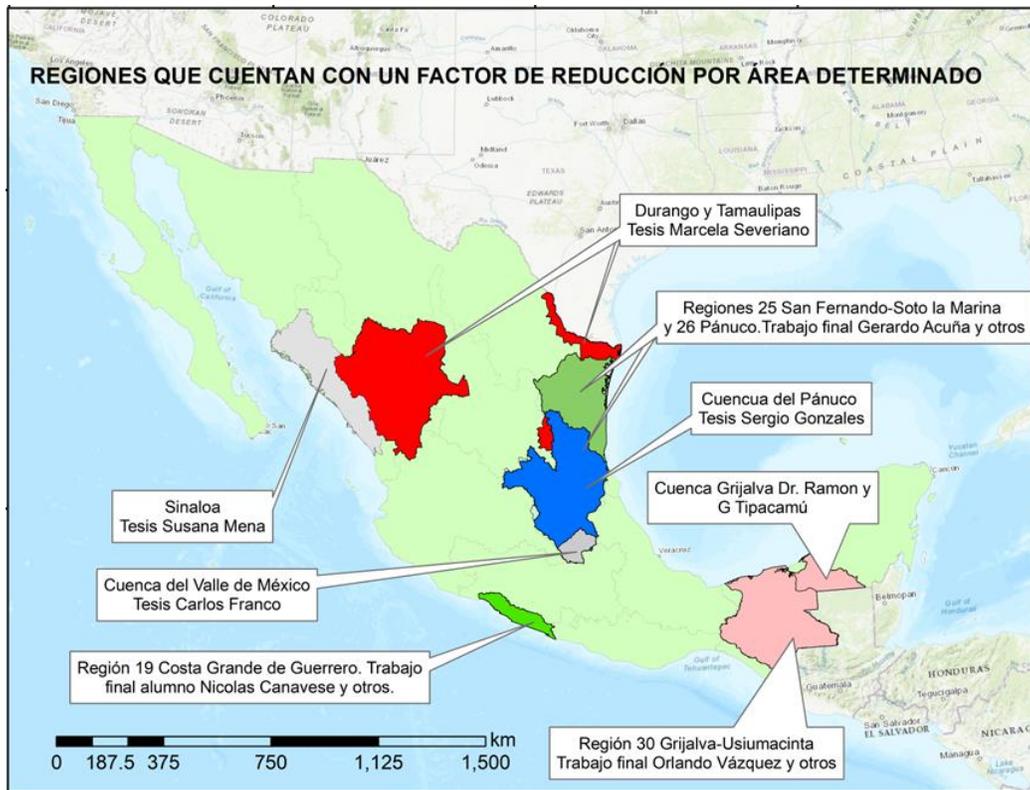


Figura 3.2 Regiones que cuentan con factor de reducción por área (Sánchez, 2017).

3.6 Modelo para pronóstico de escurrimiento (MPE)

La modelación computacional es una herramienta fundamental para los profesionales que se desempeñan en el campo de la ingeniería hidrológica e hidráulica debido a que permite al usuario representar de manera aproximada las condiciones de lluvia o caudal en cierta área de estudio, así como la caracterización de las cuencas hidrográficas.

Actualmente se han desarrollado múltiples tipos de herramientas en este campo que cubren las necesidades de diferentes áreas de la ingeniería. En general, muchos de estos programas son de uso restringido por la compra de algún tipo de licencia que cuesta una importante cantidad de dinero fija o una suscripción que se renueva cada periodo de tiempo. Alternativamente se cuenta con el software de uso libre que está disponible de manera gratuita y que en la mayoría de los casos es desarrollado por entidades gubernamentales. Este tipo de programas suelen contar con las mismas características que tienen los de paga, pero son una alternativa más económica para los usuarios u organizaciones que cuenten con recursos limitados.

Por lo antes mencionado, el Instituto de ingeniería de la UNAM ha trabajado durante muchos años con programas de este tipo que permiten hacer modelación hidrológica considerando diferentes tipos de parámetros ya sea concentrados, semidistribuidos y distribuidos logrando obtener con cada uno de ellos resultados aceptables que se emplean en la realización de diferentes proyectos. Algunos de los modelos con los que se ha trabajado en el instituto son:

- 1) **HEC-HMS.** Software de uso libre desarrollado por el Hydrologic Engineering Center de la U.S Army Corps of Engineers.
- 2) **TR-20.** Desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos del USDA (SCS), Ahora Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS)
- 3) **EPA SWMM.** Software de modelado hidrológico y de drenaje urbano desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)

Aunque los programas de cómputo sirven para realizar modelaciones aceptables en la mayoría de los casos, al llevar a cabo diferentes proyectos se han encontrado diversos obstáculos que dificultan una modelación eficiente del escurrimiento. Uno de los principales desafíos radica en que muchos de estos programas no consideran las pérdidas por evapotranspiración o infiltración, lo que limita su capacidad para capturar de manera precisa y completa los procesos hidrológicos involucrados. A partir de estas limitaciones y de la experiencia generada dentro del instituto, en la coordinación de hidráulica se ha trabajado en el desarrollo de nuevos modelos de lluvia-escurrimiento que permitan considerar estas pérdidas de la precipitación y así obtener una estimación confiable del escurrimiento.

Por ello es que en el año 2008 se desarrolló un programa escrito en el lenguaje Visual Basic denominado *Modelo para pronóstico de escurrimiento (MPE)* el cual tiene por objetivo principal obtener el hidrograma de escurrimiento a la salida de una cuenca a partir de un modelo de parámetros distribuidos, obteniendo también la precipitación media, el hietograma, la lluvia en exceso y la pérdida de la precipitación.

Para estimar la producción del escurrimiento, el programa *MPE* se basa en el método del *SCS (Soil Conservation Service)* o también llamado método del número de curva, el cual considera las características del tipo de suelo para determinar la cantidad de agua que se pierde por infiltración y a su vez incorporar una ligera modificación que permite considerar el secado del suelo después de una lluvia por medio de un factor denominado como *Factor de olvido*. Este último parámetro cumple con la finalidad de representar numéricamente la disminución de las aportaciones provenientes de lluvias antecedentes en función del tiempo

transcurrido, de esta forma se pueden considerar las pérdidas por evapotranspiración (Domínguez et.al., 2008).

Por otra parte, para determinar la transferencia del escurrimiento dentro de la cuenca se utiliza el método de Clark modificado, el cual considera una división de la superficie de toda la cuenca por medio de líneas isócronas en las que cada gota de escorrentía que cae dentro de alguna de estas regiones delimitadas tardará la misma cantidad de tiempo en fluir hasta la salida de la cuenca. Para poder utilizar este programa en la obtención del hidrograma de salida de una cuenca, es necesario obtener sus características fisiográficas por medio de un sistema de información geográfica (SIG).

Inicialmente el SIG que se ha empleado para el desarrollo del *MPE* es ArcView 3.2 de la empresa de software ESRI, aunque el uso de este presenta ciertas limitaciones en cuanto a edición de entidades dentro del mismo entorno además de que su interfaz complica el uso para usuarios no experimentados. Por estos motivos, en la realización de este trabajo se implementa el uso de ArcMap 10.5 que pertenece a la misma compañía desarrolladora pero que es relativamente más sencillo de utilizar que ArcView, además de que también trabaja con la extensión del HEC-GeoHMS para la obtención de los parámetros hidrológicos necesarios para la estimación de los caudales de diseño. Dichos parámetros son la ubicación, el área, longitud del cauce, así como el número de curva promedio, propiedad fisiográfica que está relacionada directamente con la capacidad de infiltración del suelo y de la cual se habla en detalle en el capítulo 2.2.

4. Recopilación y análisis de información

Para comenzar con el estudio de lluvias es necesario recopilar la información que permita describir las variables que se consideran en los procedimientos de cálculo que conforman al modelo. Dicha información está disponible y debe obtenerse de fuentes oficiales del gobierno mexicano. Además de recopilar toda la información necesaria es imprescindible realizar un análisis y comparación de esta, para hacer una depuración de los datos que realmente son

válidos y sirven para usarse en la realización del estudio. Todo esto se debe a que en muchas ocasiones la información disponible es considerada no válida debido a la antigüedad o la baja confiabilidad de esta. A continuación, se hace una descripción de la zona en estudio considerando los datos más recientes hasta el momento en que se realiza este trabajo.

4.1 Zona de estudio

Las cuencas objeto de estudio se sitúan en la región central de México, abarcando los límites de los estados de México e Hidalgo. El río Rosas como el río Tlautla tienen su origen en el territorio del estado de México y, a medida que fluyen, atraviesan la frontera con Hidalgo antes de desembocar en el río Tula, dentro del municipio de Tula de Allende.



Figura 4.1 Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

Los centroides de ambas cuencas se localizan en las coordenadas:

Tabla 4.1 Coordenadas de las cuencas en estudio

Cuenca	Coordenada X (UTM)	Coordenada Y (UTM)
Tlautla	451153.3177	2205198.876
Rosas	446421.3443	2214000.201

Es importante aclarar que la cuenca del río Tlautla con la que se trabaja el modelo ha sido reducida en su tamaño debido a la existencia de una presa de almacenamiento (Presa Danxhó) en la zona central de la subcuenca original, por lo que el modelo considera sólo el escurrimiento que se produce aguas abajo de dicha presa. Además de la presa Danxhó, existen dos presas en zonas altas de la cuenca; las presas Ximojav y Concepción las cuales, aunque son de menor capacidad también influyen en la transformación y comportamiento del escurrimiento dentro de la cuenca, por lo que también fueron descartadas de este estudio. La justificación de este recorte en el tamaño de la cuenca original del río Tlautla, se muestra en la figura 4.2 en donde se graficaron los caudales de entradas y salidas reportadas por la presa Danxhó, de la cual se concluye que esta presa regula los escurrimientos que llegan al vaso de la presa.

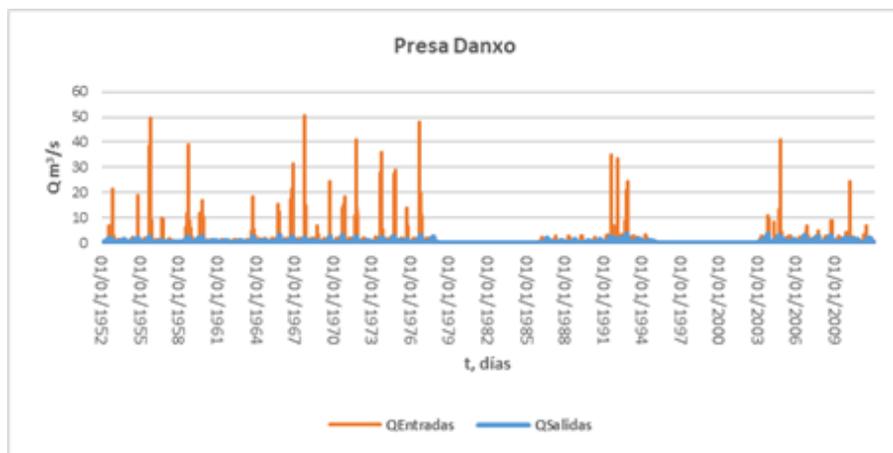


Figura 4.2 Entradas y salidas registradas en la presa Danxhó. Datos obtenidos de CONAGUA

Con base en este hecho, la cuenca del río Tlautla quedó reducida en tamaño como se muestra en el mapa de la figura 4.3.

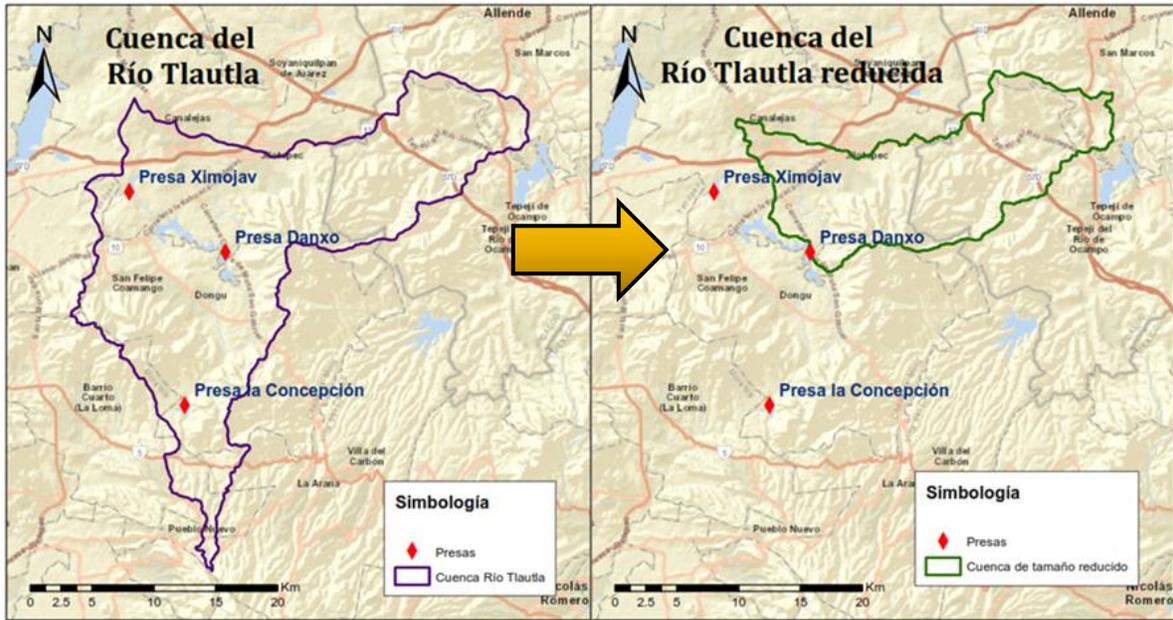


Figura 4.3 Reducción de la cuenca del río Tlautla

4.2 Región Hidrológica

Las cuencas en estudio corresponden a las subcuencas RH26k para el río Rosas y RH26i para el río Tlautla, que pertenecen a la cuenca del río Moctezuma de la región hidrológica 26 “Río Panuco” la cual tiene su desembocadura final en las costas de golfo de México.

Esta región a su vez se divide en dos subregiones hidrológicas, la Subregión Hidrológica Valle de México-Río Tula, que abarca desde los orígenes de las corrientes que forman el río Tula hasta donde actualmente se ubica la presa Zimapán, y la Subregión Hidrológica río Pánuco que va desde el embalse de la presa Zimapán hasta la descarga del río Pánuco en el Golfo de México. La región se aprecia en la figura 4.4.



Figura 4.4 Región hidrológica 26 "Río Panuco"

4.4 Clima y Temperatura

De acuerdo con el mapa de climas disponible en INEGI, se observa que en la zona de estudio predomina el clima templado subhúmedo teniendo una cercanía con la zona de clima semiseco que corresponde a una porción del estado de Hidalgo.

Según Weather Spark en Tula de Allende, la temporada de lluvia es nublada, la temporada seca es parcialmente nublada y es caliente durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ y rara vez baja a menos de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o sube a más de $31\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Temperatura promedio

La *temporada templada* dura 2.5 meses, del 22 de marzo al 6 de junio, y la temperatura máxima promedio diaria es más de $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. El mes más cálido del año en Tula de Allende es mayo, con una temperatura máxima promedio de $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ y mínima de $13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La *temporada fresca* dura 4.0 meses, del 4 de octubre al 3 de febrero, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. El mes más frío del año en Tula de Allende es enero, con una temperatura mínima promedio de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y máxima de $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

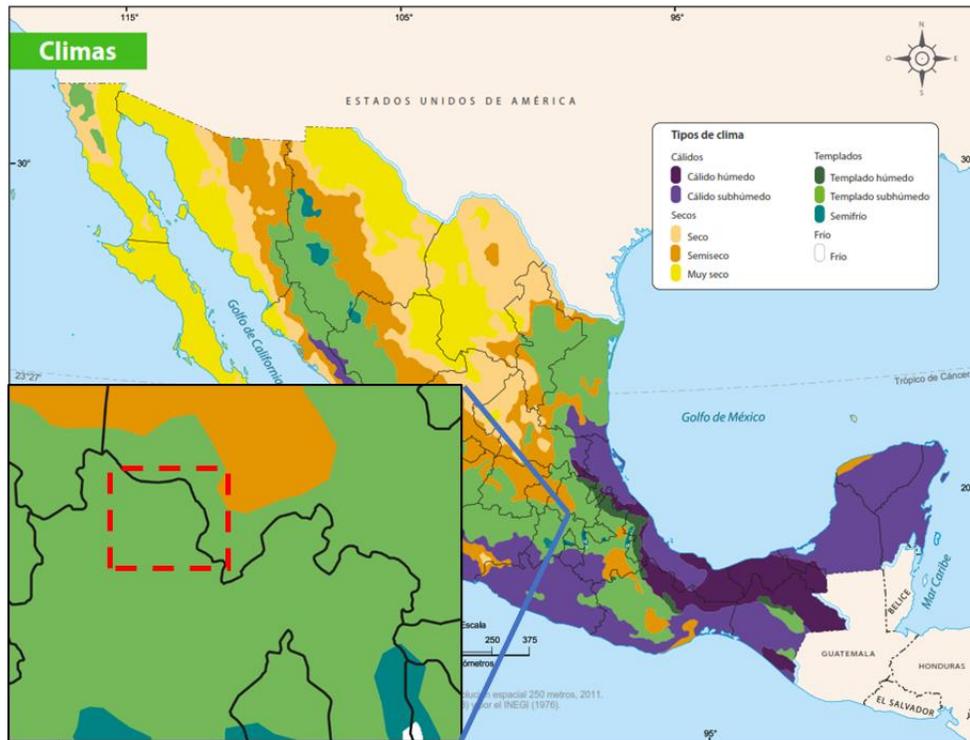


Figura 4.5 Clima promedio en la zona de estudio (INEGI, 2023)

4.5 Parámetros fisiográficos

Para obtener los parámetros fisiográficos de ambas cuencas se consultó la “Serie VII de Uso de suelo y Vegetación” así como el mapa digital de México y el Continuo de elevaciones mexicano. Esta información también proviene del INEGI y para determinar las características de las cuencas en estudio esta información fue procesada por medio de un sistema de información geográfica que permitió generar los siguientes mapas.

4.5.1 Uso de suelo y vegetación

De acuerdo con los datos disponibles en la serie VII del mapa de uso de suelo y vegetación del INEGI, generado para el territorio mexicano, se realizó la delimitación de las cuencas de estudio y se obtuvieron los siguientes mapas de uso de suelo y vegetación para cada una de las cuencas en estudio, los cuales se muestran en las figuras 4.6 y 4.7 para la cuenca del río Tlautla y Río Rosas, respectivamente.

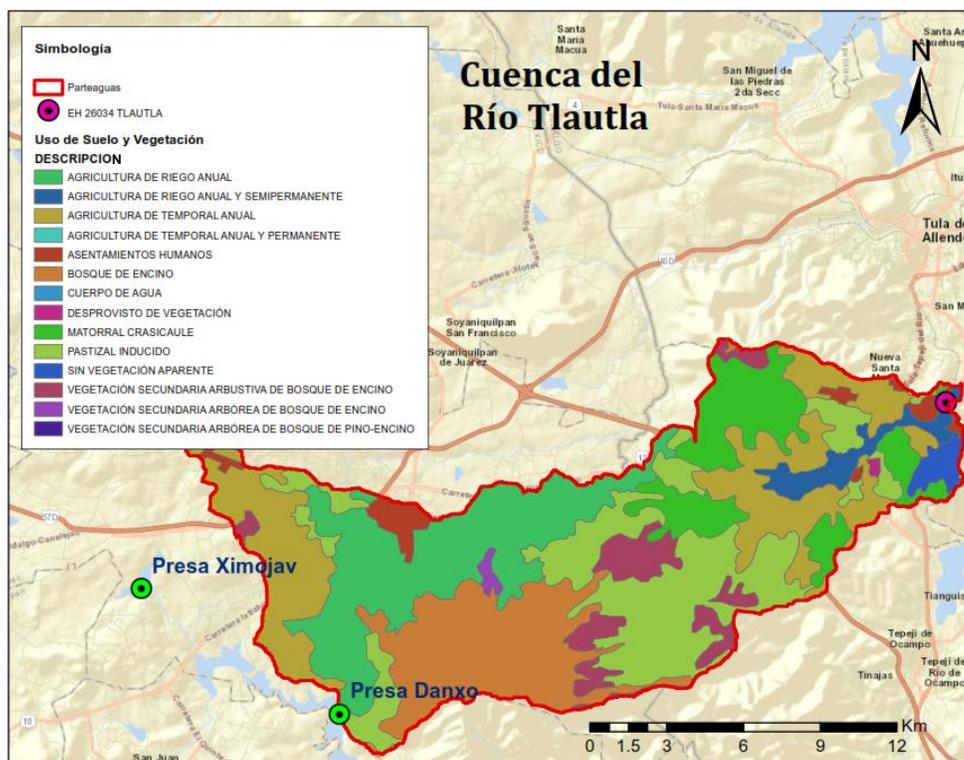


Figura 4.6 Mapa de uso de suelo y vegetación, cuenca río Tlautla. Fuente: Diseño propio elaborado con datos obtenidos de la serie VII de uso de suelo y vegetación.

A partir de estos mapas se generaron las siguientes tablas en las cuales se registra el área total por cada uso de suelo, así como el porcentaje del área total que representa cada tipo.

Tabla 4.2 Usos de suelo en la cuenca del río Tlautla. Fuente: diseño propio tomando datos de INEGI

USO DE SUELO CUENCA RÍO TLAUTLA	ÁREA (km ²)	% DE ÁREA TOTAL
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	44.74	18.91
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	6.46	2.73
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	47.01	19.86
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	0.15	0.06
ASENTAMIENTOS HUMANOS	6.80	2.87
BOSQUE DE ENCINO	37.05	15.66
CUERPO DE AGUA	0.06	0.03
DESPROVISTO DE VEGETACIÓN	0.31	0.13
MATORRAL CRASICAULE	26.59	11.24
PASTIZAL INDUCIDO	50.16	21.20
SIN VEGETACIÓN APARENTE	2.98	1.26
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE ENCINO	0.89	0.38
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	0.06	0.02
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	13.40	5.66
TOTAL	236.66	100

De la misma forma para la cuenca del río Rosas se generó la siguiente información.

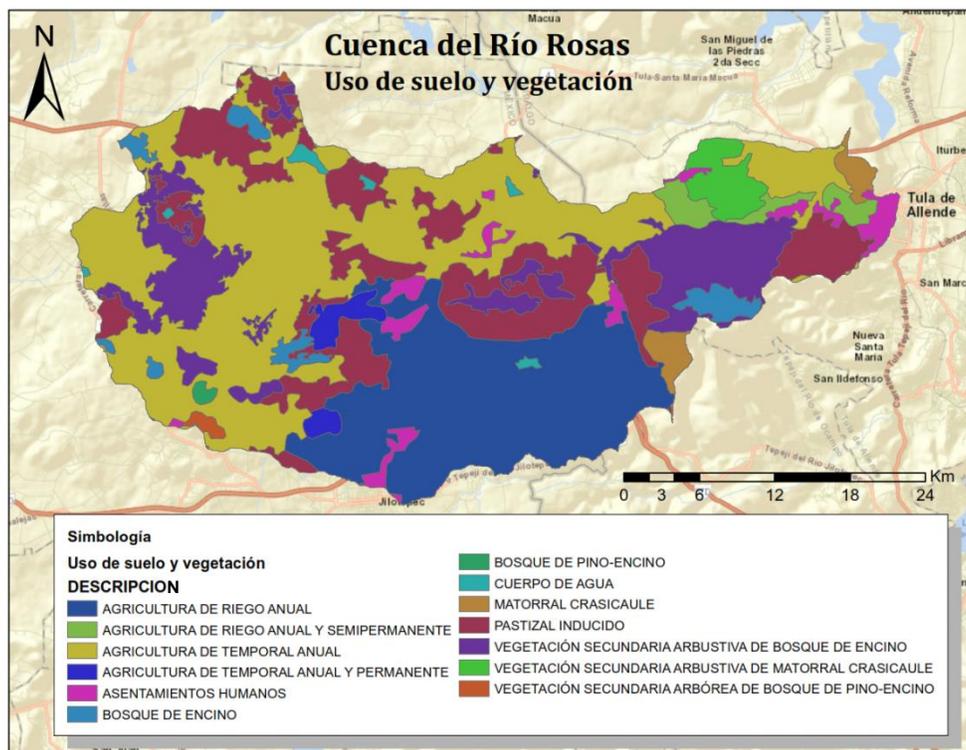


Figura 4.7 Mapa de uso de suelo y vegetación, cuenca río Rosas. Fuente: Diseño propio elaborado con datos obtenidos de la serie VII de uso de suelo y vegetación.

Tabla 4.3 Usos de suelo en la cuenca del río Tlautla. Fuente: diseño propio tomando datos de INEGI

USO DE SUELO CUENCA RÍO ROSAS	ÁREA (km ²)	% DE ÁREA TOTAL
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL	63.39	21.57
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	5.46	1.86
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL	101.84	34.65
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL Y PERMANENTE	4.23	1.44
ASENTAMIENTOS HUMANOS	8.84	3.01
BOSQUE DE ENCINO	6.85	2.33
BOSQUE DE PINO-ENCINO	0.58	0.20
CUERPO DE AGUA	1.66	0.56
MATORRAL CRASICAULE	4.43	1.51
PASTIZAL INDUCIDO	54.04	18.39
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBÓREA DE BOSQUE DE PINO-ENCINO	0.90	0.30
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE BOSQUE DE ENCINO	35.44	12.06
VEGETACIÓN SECUNDARIA ARBUSTIVA DE MATORRAL CRASICAULE	6.24	2.12
TOTAL	293.90	100

De la información anterior se puede notar que en ambas cuencas predomina el uso de suelo agrícola en todas sus modalidades, y que el porcentaje de área con asentamientos humanos

es bajo con respecto a los demás usos de suelo, lo que indica que en ambas cuencas se presenta una infiltración considerable

4.5.2 Edafología

De la página del INEGI se descargaron las capas correspondientes con la información de los tipos de suelo presentes dentro del territorio mexicano y se generaron los siguientes mapas que muestran la distribución espacial de los suelos predominantes presentes dentro de las cuencas en estudio. Cada uno de estos tipos de suelo presenta diferentes capacidades de infiltración del agua por lo que conocer la distribución espacial de cada uno de estos es importante para determinar las pérdidas del escurrimiento por infiltración.

A continuación, se muestran los mapas de la distribución espacial de los tipos de suelo de suelo en las figuras 4.8 para la cuenca del río Tlautla y 4.9 para la cuenca del río Rosas.

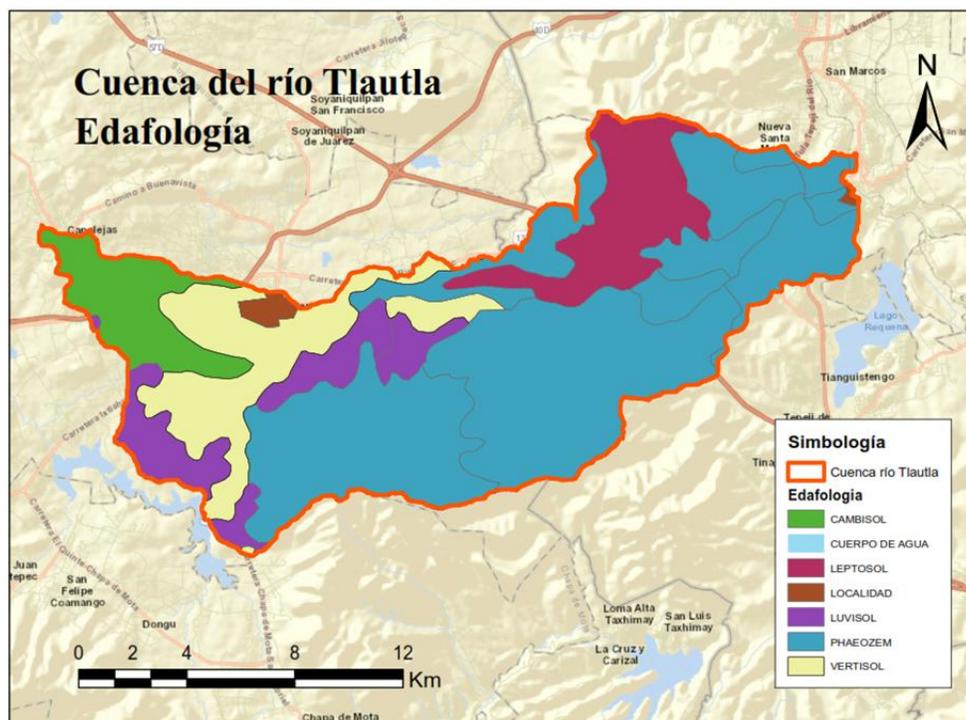


Figura 4.8 Mapa de edafología y tipos de suelo, cuenca río Río Tlautla. Fuente: Diseño propio elaborado a partir del conjunto de datos edafológicos de INEGI

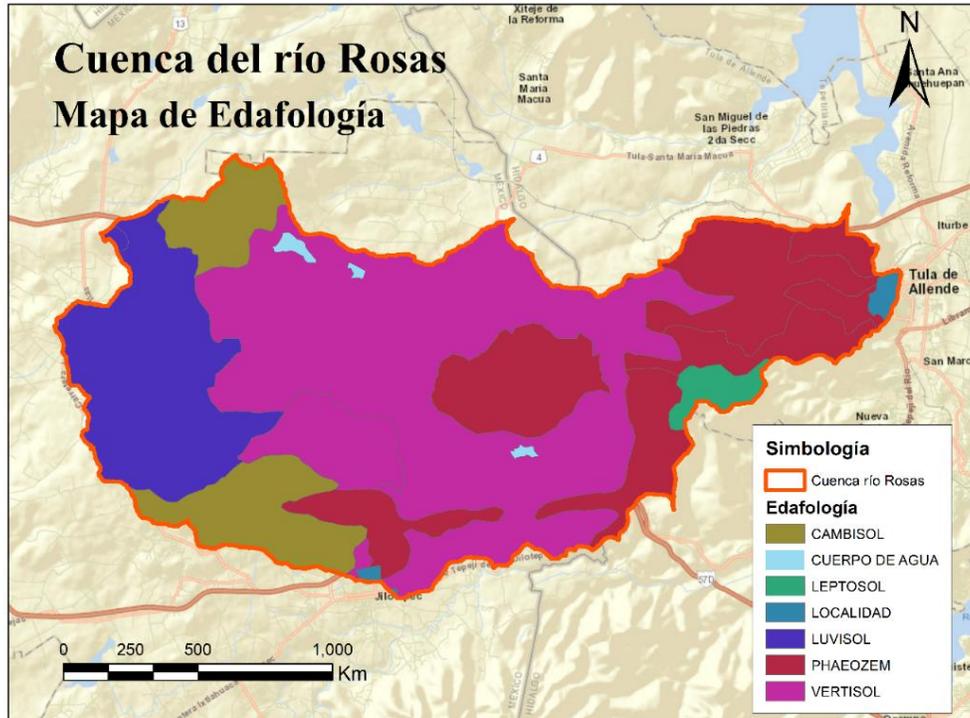


Figura 4.9 Mapa de edafología y tipos de suelo, cuenca río Rosas. Fuente: Diseño propio elaborado a partir del conjunto de datos edafológicos de INEGI

4.5.3 Mapa de pendientes

Las elevaciones de las cuencas en estudio se han tomado del modelo digital de elevaciones que proporciona INEGI a través del Continuo de elevaciones mexicano (CEM). Se descargó un modelo digital de elevaciones con una resolución de 15 metros, el cual da una suficiente aproximación de la superficie del terreno en la zona de estudio. Estos modelos, además de servir como insumo para el procesamiento y obtención del número de curva de forma discretizada, también muestran la distribución espacial de pendientes dentro del área de las cuencas.

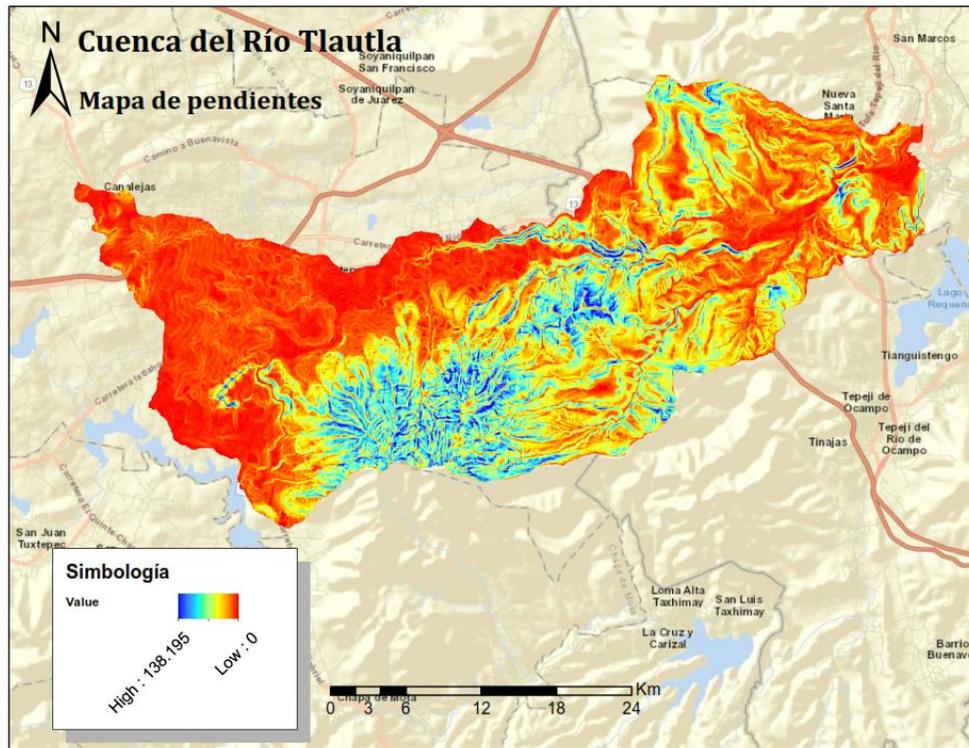


Figura 4.10 Mapa de pendientes, cuenca del río Tlautla. Fuente: Diseño propio elaborado a partir de la información proporcionada por el continuo de elevaciones mexicano de INEGI

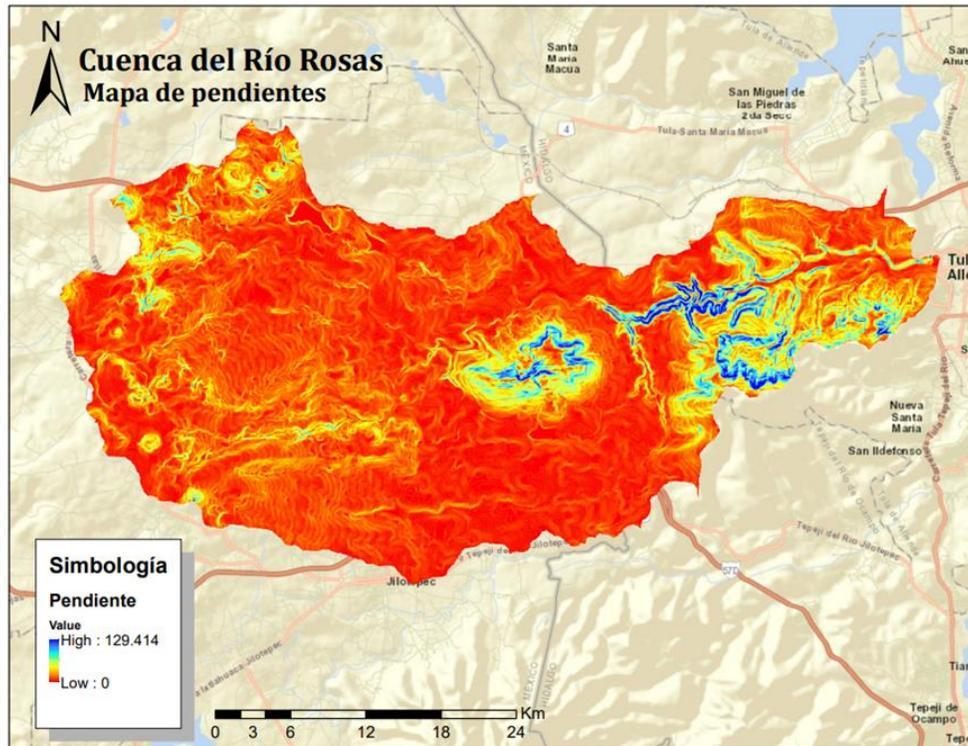


Figura 4.11 Mapa de pendientes, cuenca del río Rosas. Fuente: Diseño propio elaborado a partir de la información proporcionada por el continuo de elevaciones mexicano de INEGI

4.5.4 Elevaciones de la cuenca

Con base en la información obtenida del Continuo de elevaciones mexicano (CEM) del INEGI, se obtuvo un modelo digital de elevaciones para cada una de las cuencas con valores promedio que aproximan a la superficie del terreno. La representación de las elevaciones del terreno se aprecia de manera clara en las figuras 4.12 y 4.13.

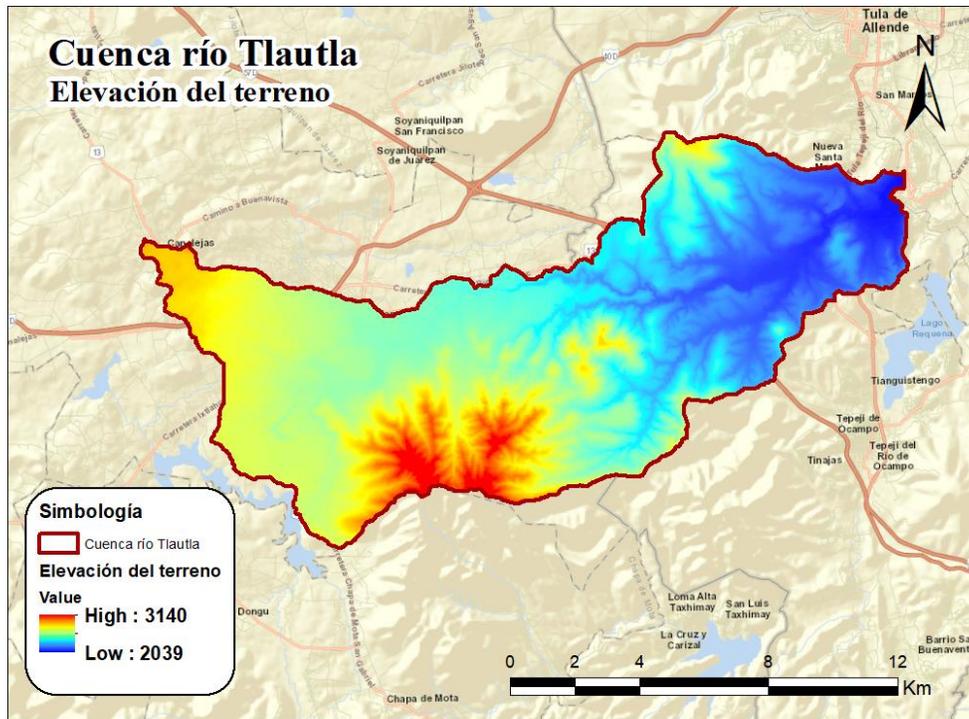


Figura 4.12 Mapa de elevaciones, cuenca del río Tlautla. Fuente: Diseño propio elaborado a partir de la información proporcionada por el continuo de elevaciones mexicano de INEGI

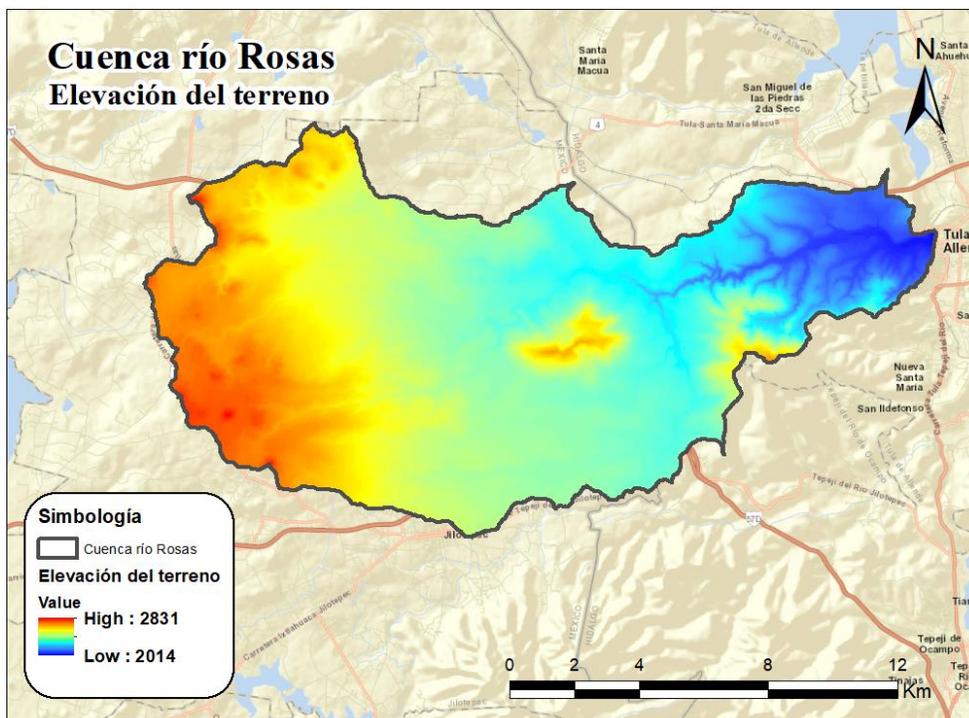


Figura 4.13 Mapa de elevaciones, cuenca del río Rosas. Fuente: Diseño propio elaborado a partir de la información proporcionada por el continuo de elevaciones mexicano de INEGI

4.6 Estaciones climatológicas e hidrométricas

Las estaciones climatológicas que se consideraron en este estudio se seleccionaron con base en dos factores principales: la cercanía a la zona de estudio y el número de años de registro. Además, se tomaron en cuenta las elevaciones en las que se encuentran las estaciones seleccionadas ya que este es un factor importante que influye en la ocurrencia de las precipitaciones en diferentes zonas del país. A continuación, se enlistan las estaciones climatológicas (pluviómetros) que se consideraron para el análisis (Tabla 4.4) así como su ubicación geográfica con respecto a las cuencas en estudio (Figuras 4.14 y 4.15)

Tabla 4.4 Estaciones climatológicas seleccionadas

ID	Clave	Estado	Nombre	Elevación m.s.n.m
1	13068	Hidalgo	EL SALTO	2178
2	13075	Hidalgo	JASSO	2061
3	13080	Hidalgo	PRESA ENDHO	2035
4	13084	Hidalgo	PRESA REQUENA	2123
5	13089	Hidalgo	TEPEJI DEL RIO	2132
6	13092	Hidalgo	TULA (DGE)	2045
7	15001	Edo Mx	ACAMBAY	2544
8	15002	Edo Mx	ACULCO (SMN)	2490
9	15024	Edo Mx	PRESA DANXHO	2490
10	15032	Edo Mx	HUEHUETOCA	2258
11	15064	Edo Mx	OXTHOC	2353
12	15071	Edo Mx	PRESA EL TIGRE	2710
13	15074	Edo Mx	PRESA LA CONCEPCION	2300
14	15078	Edo Mx	PRESA FRANCISCO TRINIDAD FABELA	2718
15	15081	Edo Mx	REPRESA EL ALEMAN	2365
16	15084	Edo Mx	SAN ANDRES TIMILPAN	2658
17	15109	Edo Mx	SANTA MARIA MAGDALENA CAHUACAN	2709
18	15115	Edo Mx	SANTO TOMAS PUENTE COLGANTE	2250
19	15132	Edo Mx	VILLA DEL CARBON	2545
20	15139	Edo Mx	ATLACOMULCO I (DGE)	2550
21	15156	Edo Mx	SAN MIGUEL JAGÑEYES	2288
22	15187	Edo Mx	PRESA HUAPANGO	2640



Figura 4.14 Mapa de ubicaciones, estaciones climatológicas consideradas en el análisis. Fuente: Elaboración propia



Figura 4.15 Mapa de ubicaciones, estaciones hidrométricas consideradas en el análisis. Fuente: Elaboración propia

Se tiene una estación hidrométrica a la salida de cada una de las cuencas en estudio y dos más sobre el cauce del río Tula en la zona en la que desemboca el río Tlautla (Figura 4.15).

5. Aplicación y Resultados

La metodología para obtener los hidrogramas de diseño comienza con la conformación de la región homogénea que abarca tanto la cuenca del río Rosas como la del río Tlautla. Esta región se forma a partir de un análisis exhaustivo de los registros de alturas de precipitación en 24 horas disponibles en cada una de las estaciones que se consideraron dentro de este estudio de caso. Para conformar la región homogénea se aplicó la técnica de coeficiente de variación por momentos-L y se verificaron los resultados obtenidos empleando el método de Coeficiente de variación convencional ya que ambas técnicas arrojan un resultado de forma gráfica en el que se aprecia de manera clara cuales son las estaciones que pertenecen a dicha región, en especial en el método de los momentos-L. Una vez conformada la región homogénea se llevó a cabo el proceso de regionalización de lluvias empleando la técnica de “estaciones-año” la cual genera, para cada estación climatológica de la región, un registro estandarizado que se forma al dividir la serie de máximos anuales de cada estación entre su media. De esta forma, se agruparon cada uno de los registros estandarizados y se colocaron uno a uno a continuación del otro para generar el registro único que corresponde a la región homogénea que se analizó y que es aplicable tanto para el río Rosas como el río Tlautla.

Para obtener la lluvia de diseño de 24 horas se aplicó un análisis de frecuencias a la serie estandarizada obtenida con el fin de ajustar una función de probabilidad y obtener los factores regionales asociados a distintos periodos de retorno, los cuales son válidos y aplicables en cualquier sitio con escasa o nula información dentro de la zona de estudio.

La estimación de las avenidas de diseño se llevó a cabo mediante el modelo lluvia-escurrimiento por parámetros distribuidos desarrollado por el Instituto de ingeniería denominado “Modelo de pronóstico del escurrimiento” (MPE) el cual hace uso de los parámetros fisiográficos de las cuencas, así como los hietogramas de diseño generados en la regionalización de lluvias.

Las características fisiográficas de la cuenca se obtienen a partir de un geoprocesamiento y discretización de la cuenca con ayuda del software HEC-GeoHMS en su versión como complemento para ArcMap. En este proceso se define una malla de cuadrícula que subdivide a cada cuenca y que contiene las propiedades requeridas de cada una de las celdas del terreno que representan. Estas propiedades son: la ubicación en X y Y en el sistema de coordenadas UTM Zona 14, el área de la celda, longitud del tramo de cauce y valor promedio del número de curva obtenido mediante la herramienta *Visor de números de escurrimiento* del Instituto Mexicano de Tecnología del agua. (IMTA, 2023)

Una vez que se obtuvieron los insumos necesarios se generó el modelo dentro del MPE para su calibración y finalmente la estimación de los caudales de diseño asociados a diferentes periodos de retorno.

5.1 Regiones homogéneas

Para conformar la región homogénea de cada cuenca en estudio fue necesario analizar los datos de lluvias disponibles en las estaciones climatológicas seleccionadas tomando en cuenta el criterio de cercanía con la zona de estudio. Estos registros de lluvias fueron descargados del registro de la base de datos climatológica Nacional (Sistema CLICOM), los cuales están disponibles en la dirección electrónica <http://clicom-mex.cicese.mx>. Se tomó en consideración la recomendación de (Escalante Sandoval & Reyes Chavez, 2002) descartar en primera instancia las estaciones que contaran con menos de 10 años de registros, sin embargo, cada una de las estaciones cuenta con más de 25 años de registros.

Posteriormente, se realizó el análisis de las series de tiempo con el fin de identificar los datos atípicos y los meses en los que no se tiene un registro continuo a modo de depurar los registros y quedar únicamente con los meses en los que se tienen datos completos. Una vez que se realizó la depuración, se consideraron series de máximos anuales para cada estación, descartando los años en los que no se tienen registros continuos dentro de las épocas de lluvias.

Se determinaron los parámetros estadísticos básicos para cada una de las series de máximos anuales y se realizó la comparativa de todos los registros con base en la determinación del coeficiente de variación para observar el comportamiento de estos valores e identificar algún registro que no tuviera un comportamiento similar a la de las otras estaciones climatológicas.

5.1.1 Parámetros estadísticos de las series de lluvias.

Para comenzar con la conformación de la región homogénea se obtuvieron los parámetros estadísticos básicos utilizando las expresiones descritas en el capítulo 2.

A partir de esto, se generó la tabla 5.1 con los valores correspondientes para cada una de las estaciones analizadas considerando los estadísticos muestrales de las series de máximos anuales ya depurados.

Tabla 5.1 Parámetros estadísticos de las muestras

Estación	Años de registro	Media	Varianza	Desviación Estandar	Coefficiente de Variación	Hp Max (mm)	Hp Min (mm)
13068	61	45.76	162.60	12.75	0.279	80.0	20.0
13075	64	45.27	198.88	14.10	0.312	90.0	21.5
13080	41	47.85	433.20	20.81	0.435	138.8	20.1
13084	58	46.31	172.06	13.12	0.283	84.0	25.0
13089	56	50.15	471.51	21.71	0.433	150.0	28.0
13092	51	46.31	148.49	12.19	0.263	80.0	25.0
15001	33	47.26	251.58	15.86	0.336	100.0	29.0
15002	25	51.14	219.49	14.82	0.290	85.0	30.5
15024	51	53.56	183.31	13.54	0.253	97.5	29.5
15032	35	46.67	268.89	16.40	0.351	112.4	25.0
15064	38	51.09	149.34	12.22	0.239	84.0	29.0
15071	45	43.41	180.79	13.45	0.310	95.0	27.0
15074	37	53.06	273.46	16.54	0.312	100.7	28.0
15078	41	49.37	280.32	16.74	0.339	115.7	24.0
15081	37	43.96	127.70	11.30	0.257	76.5	18.3
15084	36	57.89	277.16	16.65	0.288	95.0	29.5
15109	22	55.51	188.60	13.73	0.247	96.0	40.5
15115	46	39.92	85.95	9.27	0.232	65.1	23.3
15132	22	50.51	155.14	12.46	0.247	72.0	31.5
15139	31	45.14	103.05	10.15	0.225	65.7	32.5
15156	25	45.73	308.03	17.55	0.384	112.5	29.0
15187	31	59.17	325.64	18.05	0.305	104.0	30.0

5.1.2 Aplicación del método del coeficiente de variación.

Como se menciona en el capítulo 3, el método del coeficiente de variación es un método gráfico que permite visualizar la tendencia de las series de tiempo al comparar los valores del coeficiente de variación, el cual es el resultado de dividir la media muestral entre la desviación estándar de cada una de las series y ordenarlas de manera descendente para formar una gráfica que muestra cual dato presenta un comportamiento distinto a través del coeficiente de correlación R^2 asociado a una curva de tendencia lineal.

Para las series de datos de las estaciones climatológicas consideradas se obtuvo la siguiente gráfica en la que se muestra también la línea de tendencia con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.8976$ lo que indica que no todas las series analizadas tienen un comportamiento estadístico similar. Estos resultados obtenidos en una primera aplicación del método indican que no todas las estaciones analizadas pertenecen a una misma región homogénea debido a que el análisis se llevó a cabo empleando los datos de las 22 estaciones consideradas inicialmente por lo que al emplear el método del coeficiente de variación por momentos-L se pretende obtener el grupo de estaciones que si cuentan con un comportamiento estadístico

similar y por ende al aplicar el primer método del coeficiente de variación se esperaría que la línea de tendencia lineal arroje un coeficiente de correlación R mayor.

En la figura 5.1 se muestra la gráfica obtenida, en la que se aprecian varios cambios abruptos en cuanto a la tendencia de la línea azul que representa los valores ordenados descendientemente, así como el coeficiente de correlación R^2 del ajuste de una función lineal representada con la recta en color rojo.

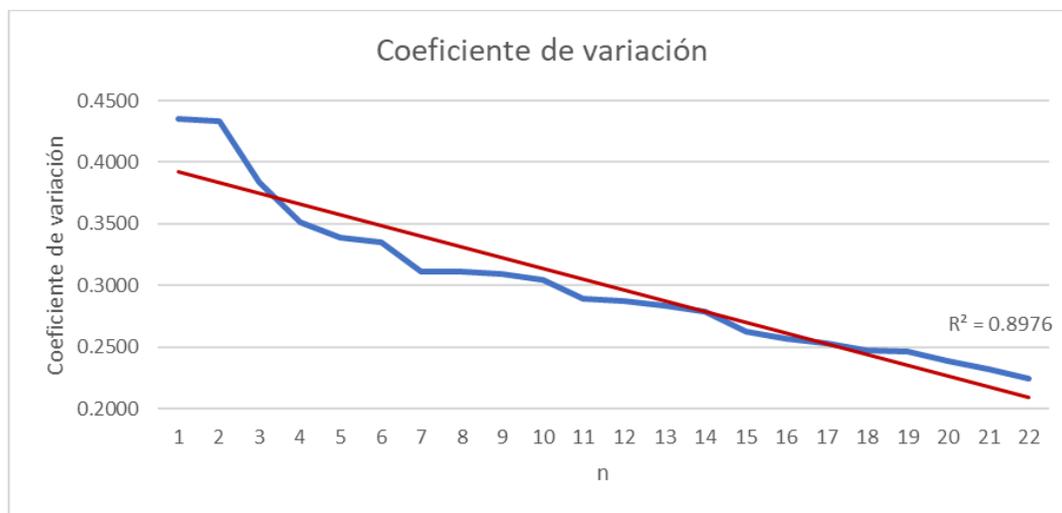


Figura 5.1 Coeficientes de variación ordenados de manera descendente

5.1.3 Aplicación de la técnica del coeficiente de variación por momentos-L

La técnica del coeficiente de variación empleando los momentos-L presenta un cambio en la metodología para obtener la región homogénea ya que para cada una de las series de datos se obtienen los estadísticos muestrales por el método de los momentos de probabilidad pesada, lo cual genera una variación en dichos valores con respecto a los estadísticos muestrales ordinarios.

5.1.3.1 Estadísticos muestrales por momentos de probabilidad pesada.

Se obtuvieron los momentos de probabilidad pesada ya que estos se relacionan directamente con los momentos-L mediante las expresiones definidas en el capítulo 2 para tal caso. De esta manera al obtener los momentos-L se aplicaron las ecuaciones correspondientes para determinar los valores de los coeficientes de sesgo, curtosis y variación, siendo estos últimos valores los que definen directamente la región homogénea. De esta forma el análisis se llevó a cabo de manera separada en cada registro y se obtuvo un resumen como el que se presenta en la tabla 5.2 en la cual se muestran los parámetros estadísticos de la estación 15187.

Tabla 5.2 Parámetros y momentos de la muestra, ejemplo de la estación 15187

PARÁMETROS		
n	31	Núm. datos
m	59.17	Media
S	18.05	Desv. Est
S ²	325.64	Varianza
MOMENTOS DE PROBABILIDAD PESADA		
M ₀	59.17	β ₀
M ₁	34.61	β ₁
M ₂	24.95	β ₂
M ₃	19.69	β ₃
MOMENTOS L		
λ ₁	59.17	
λ ₂	10.05	
λ ₃	1.20	
λ ₄	1.57	
COEFICIENTES		
τ ₂	0.1698	Variación
τ ₃	0.1196	Sesgo
τ ₄	0.1562	Curtosis

Una vez que se generó una tabla para cada serie de datos se extrajeron los valores de coeficiente de variación τ_2 y se conjuntaron en la tabla resumen 5.3.

Tabla 5.3 Resumen de coeficientes de variación

Id	Estación	τ_2	$(\tau_2 - \tau_{2med})^2$
1	13068	0.1633	0.00001
2	13075	0.1700	0.02172
3	13080	0.2163	0.04679
4	13084	0.1517	0.02302
5	13089	0.2058	0.00011
6	13092	0.1457	0.00037
7	15001	0.1705	0.02908
8	15002	0.1629	0.02653
9	15024	0.1452	0.02108
10	15032	0.1653	0.02732
11	15064	0.1362	0.01855
12	15071	0.1592	0.02535
13	15074	0.1761	0.03101
14	15078	0.1739	0.03025
15	15081	0.1536	0.02359
16	15084	0.1509	0.02277
17	15109	0.1286	0.01655
18	15115	0.1296	0.01679
19	15132	0.1430	0.02045
20	15139	0.1263	0.01596
21	15156	0.1717	0.02948
22	15187	0.1698	0.02884

Para la serie de valores de coeficiente de variación obtenidos en cada estación climatológica se obtuvo la media y desviación estándar, esto con el fin de obtener el límite superior e inferior de la región homogénea.

Media de los valores de coeficiente de variación

$$\bar{\tau}_2 = 0.15980$$

Desviación estándar de los valores de coeficientes de variación

$$S = 0.022603$$

Los límites superior e inferior de la región homogénea son entonces:

$$Lim_{superior} = \bar{\tau}_2 + S = 0.16108 + 0.023687 = 0.1824$$

$$Lim_{inferior} = \bar{\tau}_2 - S = 0.16108 - 0.023687 = 0.1372$$

Para observar visualmente la región delimitada se graficaron en el plano los valores de $\bar{\tau}_2$ obtenidos para cada estación en el eje Y así como los límites representados por una recta, ver figura 5.2.

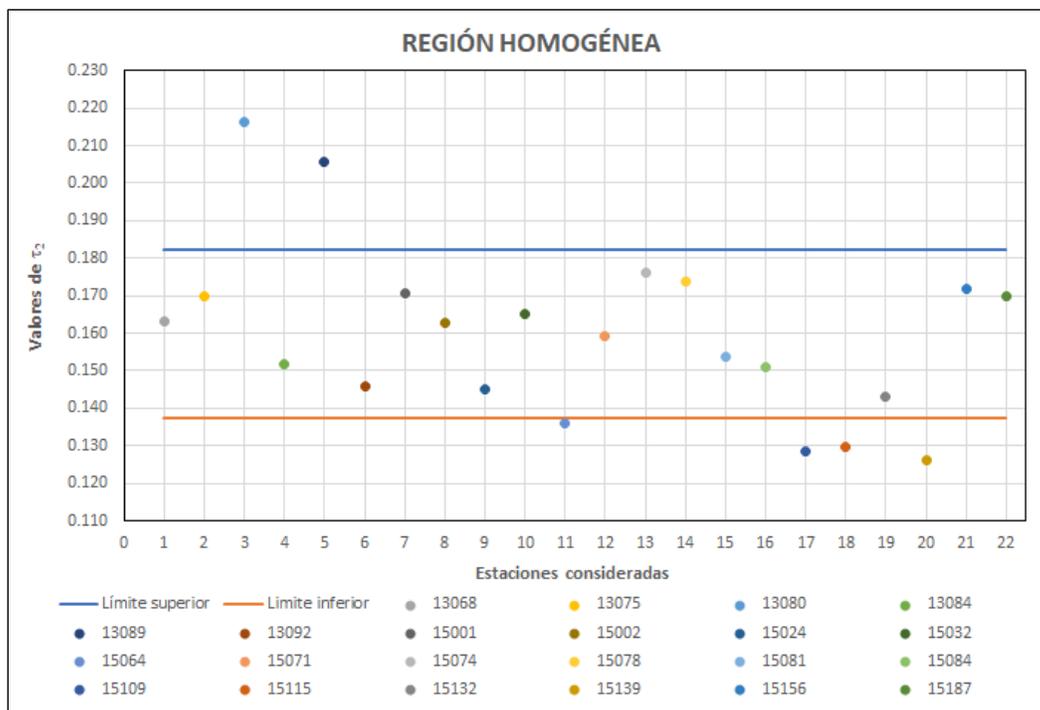


Figura 5.2 Conformación de la región homogénea

En esta gráfica el límite superior está representado por la línea de color azul y el límite inferior de color naranja. Los puntos de colores representan los valores de cada coeficiente de variación cada uno asociado al ID que se asignó en la tabla 5.3. De esta gráfica se observa claramente que los valores de $\bar{\tau}_2$ que salen de la región homogénea son los que están asociados a las estaciones con ID 3, 5, 11, 17, 18 y 20. Como resultado de este análisis se concluye entonces que las 6 estaciones antes mencionadas no presentan un comportamiento estadístico suficientemente similar al resto del grupo de estaciones analizadas por lo que se considera que estas estaciones climatológicas no forman parte de la región homogénea.

En resumen, se tiene que de 22 estaciones climatológicas analizadas mediante la técnica de momentos-L y coeficiente de variación, solo 16 conforman a una región homogénea y cuyos datos se tomaron en cuenta para llevar a cabo la regionalización de lluvias que se presenta en el siguiente apartado. Estos resultados se presentan en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Resumen de la conformación de la región homogénea, Técnica del coeficiente de variación con momentos-L.
Fuente: Elaboración propia.

Id	Estación	τ_2	$(\tau_2 - \tau_{2med})^2$	Límite superior	Limite inferior	Condición
1	13068	0.1633	0.00001	0.1824	0.1372	Dentro
2	13075	0.1700	0.02172	0.1824	0.1372	Dentro
3	13080	0.2163	0.04679	0.1824	0.1372	Fuera
4	13084	0.1517	0.02302	0.1824	0.1372	Dentro
5	13089	0.2058	0.00011	0.1824	0.1372	Fuera
6	13092	0.1457	0.00037	0.1824	0.1372	Dentro
7	15001	0.1705	0.02908	0.1824	0.1372	Dentro
8	15002	0.1629	0.02653	0.1824	0.1372	Dentro
9	15024	0.1452	0.02108	0.1824	0.1372	Dentro
10	15032	0.1653	0.02732	0.1824	0.1372	Dentro
11	15064	0.1362	0.01855	0.1824	0.1372	Fuera
12	15071	0.1592	0.02535	0.1824	0.1372	Dentro
13	15074	0.1761	0.03101	0.1824	0.1372	Dentro
14	15078	0.1739	0.03025	0.1824	0.1372	Dentro
15	15081	0.1536	0.02359	0.1824	0.1372	Dentro
16	15084	0.1509	0.02277	0.1824	0.1372	Dentro
17	15109	0.1286	0.01655	0.1824	0.1372	Fuera
18	15115	0.1296	0.01679	0.1824	0.1372	Fuera
19	15132	0.1430	0.02045	0.1824	0.1372	Dentro
20	15139	0.1263	0.01596	0.1824	0.1372	Fuera
21	15156	0.1717	0.02948	0.1824	0.1372	Dentro
22	15187	0.1698	0.02884	0.1824	0.1372	Dentro

Para corroborar los resultados obtenidos a partir de momentos-L, se aplicó de nueva cuenta la técnica de coeficiente de variación, pero considerando solo las 16 estaciones que resultaron después de este análisis para observar cómo se comportó el coeficiente de correlación R^2 el

cual paso de un valor de 0.8976 con las 22 estaciones analizadas inicialmente a un valor de 0.9507 el cual es considerando como un correlación aceptable considerando ahora sólo las estaciones que pertenecen a la región homogénea delimitada (ver figura 5.3). Esto indica un mejor ajuste en la línea de tendencia de los valores de coeficiente de variación, por lo que se concluye que la aplicación de la técnica de momentos-L identificó una región homogénea que fue corroborada haciendo una combinación con el método de coeficiente de variación convencional.

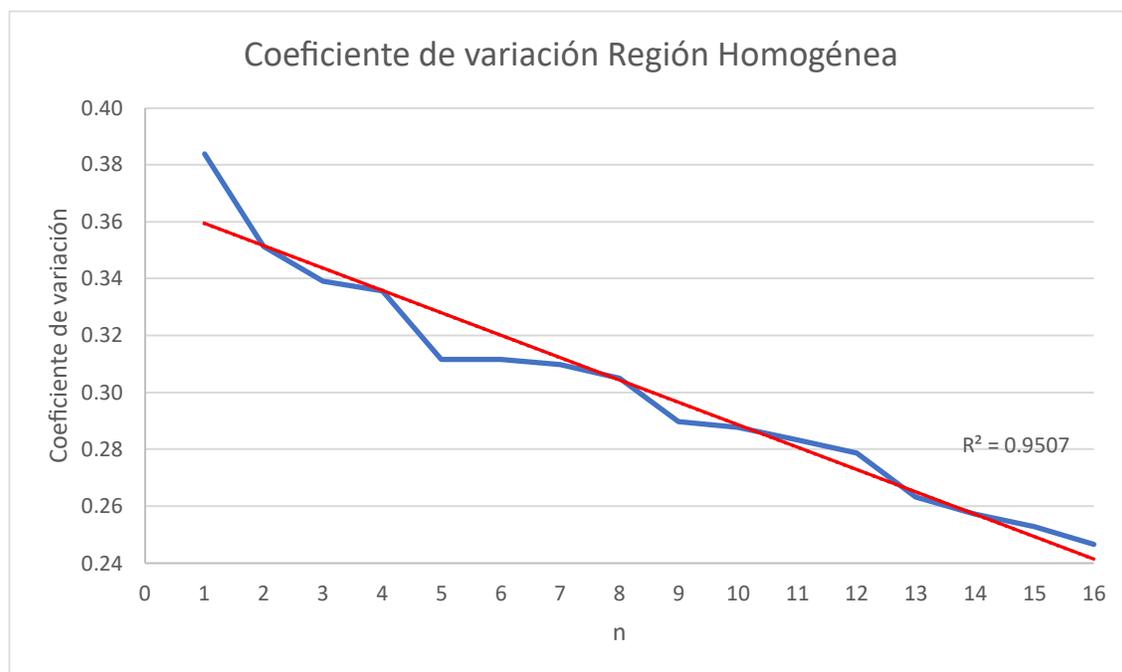


Figura 5.3 Coeficientes de variación ordenados de mayor a menor con línea de tendencia

5.3 Lluvias de diseño

Después de identificar la región homogénea, compuesta por 16 registros de precipitaciones máximas anuales observadas cada 24 horas, se procedió a aplicar la regionalización de lluvias utilizando la técnica de "Estaciones año", siguiendo el procedimiento detallado en el apartado 3.3.1.

La razón fundamental para emplear esta técnica de regionalización es que no requiere que los datos de insumo tengan un tamaño de muestra ni periodo de registro en común ya que las estaciones con las que se cuenta para este trabajo tienen una variación considerable en cuanto a estas características.

Es importante mencionar que el empleo de esta técnica regional indica que se debe realizar una prueba de homogeneidad e independencia de cada uno de los registros de lluvias que se conforman a la región homogénea para garantizar que los datos con los que se trabaja provengan de fenómenos aleatorios (en este caso la ocurrencia de lluvias) y que tales eventos se rigen bajo las leyes de la probabilidad. En este caso, dichas pruebas se realizan al registro estandarizado que se obtiene luego de aplicar la técnica regional ya que finalmente estos valores se obtienen a partir de los registros de todas las estaciones climatológicas que conforman a la región homogénea, por ello los resultados de las pruebas muestran si todas y cada una de las estaciones con las que se ha trabajado cumplen con la condición de homogeneidad e independencia de eventos antes mencionadas.

5.3.1 Estaciones-año

Para la aplicación de la técnica de estaciones-año se obtuvieron las series moduladas de cada registro de lluvias, las cuales se muestran a continuación en la tabla 5.6. Esto se llevó a cabo al dividir los valores de la serie de máximos anuales (tabla 5.5) entre su media, con el objetivo de agrupar cada una de estas series moduladas y generar un registro único con un número total de 640 datos, tamaño que es resultado de sumar todos los años registrados en cada una de las estaciones climatológicas de la región.

Tabla 5.5 Serie de valores máximos anuales observados

Año	13068	13075	13080	13084	13089	13092	15001	15002	15024	15032	15064	15071	15074	15078	15081	15084	15109	15115	15132	15139	15156	15187	
1950						43.0																	
1951		29.0				35.1																	
1952		43.0		42.0		45.0			37.5														
1953	35.0	54.0		38.0		55.2			36.0														
1954		36.0		25.0	31.8	44.6			48.0														
1955	40.0	36.0		30.0	135.0	52.7			75.0														
1956	32.5	50.0			32.5	63.1																	
1957	44.5	21.5			60.0	42.1			54.0														
1958	42.0	50.0		50.0		38.8	85.0		54.5														
1959	42.5	30.0		28.0	33.5	70.1	30.0		55.1														
1960	53.5	57.5		66.0		41.0	48.0		48.0														
1961	27.5	38.0		28.0	52.4	40.0			36.0	49.1	40.0	27.0	36.1	43.5	35.5		60.0	50.0	52.0	60.0	29.0		
1962	73.0	40.5		42.0	38.0	31.1	52.5		29.5	34.1	39.1	37.5	78.0		37.2			40.0	71.0	48.5	49.2		
1963	35.0	78.0		66.4	45.0	64.1	41.5		56.4	32.9	51.0	54.0			55.2			61.2		56.7	43.0		
1964	48.0	34.5		38.0	42.0	31.9	72.0	75.0	39.2		46.0	71.0	31.7	38.5	34.2		40.5	33.0	42.0	52.3	35.1		
1965	50.0	54.0		45.0	49.0	70.8	30.0	40.0	59.0	64.5	47.0	40.0	28.0	36.5	32.5	37.2	46.0	34.3	65.0	37.5	112.5		
1966	65.0	37.0		27.0	59.0	65.0	42.0		53.1	112.4	37.0	37.0	83.8	24.0	60.0		75.5	70.5	48.8	48.0	40.4	82.5	
1967	60.0	49.5		42.0	47.5	65.1	52.5		40.0	37.2	32.0	40.0	55.8	52.0		54.0	74.5	46.0	72.0	59.0	54.5		
1968	50.0	25.0		41.0	34.0	31.6	41.0		43.5	38.0	54.0	34.0	52.2	50.0		46.6	52.0	46.0	40.2	38.0	41.3		
1969	30.5	30.5		48.0	35.0	38.1	57.0		51.0	35.2						42.0	49.5	60.0	62.2		40.0		
1970	80.0	26.0		47.0	32.0	47.7	62.0		63.5	32.0	67.0		36.1	61.0	41.8	51.5	78.0	35.2		60.8	34.7		
1971		38.0	48.0	50.0	42.0	43.0	53.5		62.0	30.5		45.5	40.0	48.0	41.5	50.5	67.0	34.7	60.5	36.5	37.9		
1972	36.5	45.5	29.0	38.0	38.5	49.4	51.0	42.0	44.0	39.8	48.0	33.5	63.5	67.4	35.1	40.5	47.5	23.3		36.0	32.6		
1973	61.0	90.0	37.5	79.0	51.0	42.5	40.0	85.0	60.0	37.7	56.0	49.5	39.5	37.0	35.6	29.5	43.5	28.4	41.0	46.4	35.0		
1974	49.0	55.0	54.0	55.0	65.0	31.5	29.0		67.0	33.8	54.0	78.5	54.2	42.5			96.0	35.8	45.5	65.4	43.1	95.0	
1975	54.0	45.5	56.5	40.5	44.0	38.5	40.0			58.5		31.5	57.0	39.0	29.7	60.0	47.0	27.5	40.5	44.5	47.1	59.0	
1976	47.0	47.0	39.5	43.5	69.0	35.5	40.0		58.5	25.0	38.0	49.0		66.0	52.8	56.0	43.0	35.8	52.2	51.8	49.0	68.0	
1977	63.3	76.0	40.0	54.0	49.0	47.3	50.0		65.0	37.0	45.0	60.0		37.0	32.3	57.0	-	28.6	41.7	34.0	55.0	40.0	
1978	36.5	34.0	40.4	38.0	69.0	34.0	54.0	36.0	53.5			36.5	74.0	40.0	38.5	90.0	-	41.9	66.8	37.3	35.0	62.0	
1979	37.0	41.5	39.5	51.5	35.0	31.0	40.0	67.0	69.0		52.5	28.5		26.0	55.0	55.0	48.5	30.3		32.5		64.0	
1980	42.0	44.0	60.5	56.0	39.5	43.8	40.0	37.0	60.0	50.8	33.0	31.5	100.7	41.5	45.0		56.0	36.2		34.1	32.3	66.5	
1981	65.3	80.0	60.3	39.0	40.0	51.5	40.0	62.0	53.5	54.0	29.0	36.0	33.8	34.9	34.9		51.3	42.0	31.5	65.7	40.0	60.5	
1982	20.0	28.0	37.0	36.0	28.0	45.3		30.5	36.5	25.0	62.0	30.0	39.5	46.3	18.3		49.6	41.5	35.3	40.1	35.0	48.0	
1983	34.0	52.0	28.0	65.0	47.0	44.0	50.0	52.0	48.0	55.2	69.0	48.0	52.4	48.3	49.5		56.5		39.0	43.9	48.0	65.0	
1984	51.0	43.5	27.3	56.0	63.2	45.0		42.0	33.5	41.0	54.0	28.5	65.6	35.8	42.2		45.7	36.3	63.5	60.0		44.7	
1985	29.4	55.0	46.0	45.0	37.2	45.0	33.0		48.5	48.8	34.0	44.0	45.1	44.0	76.5		-	51.0		38.0	45.0		
1986	54.0	36.5	54.0	47.0	54.0	71.0	100.0		59.0	37.0	60.0	46.0	49.0	57.0	51.5	51.8	49.4	33.6		37.7	42.0	36.5	
1987	37.5			66.0	34.7	45.0	35.0			71.0	49.0	54.5	31.7	47.2	43.5		49.2	38.0		41.2	44.4		
1988	80.0	58.5	43.0	66.0	80.0	37.0				65.8		40.0		54.5	46.0			40.0		48.0			
1989	42.2	50.8	63.5	36.0	46.3	40.0			46.5			42.5		31.0		93.2				40.4			
1990	31.0	39.5	35.0	31.0	52.5	25.0			39.0		52.0	36.0				71.2				35.0			
1991	44.9	67.0	46.8	38.0	40.0	35.0	58.0	82.9				32.0						38.5		35.9			
1992	43.4	68.0	32.0	52.0	41.5	60.0	35.0	53.4			62.0	42.5							59.3	41.7			
1993	35.8	60.0	25.0	44.2	41.0	35.0	32.5	50.1			66.0	44.0											
1994	43.2	40.0	60.0	84.0	45.9	40.0				31.0		65.0	31.0			72.5						43.0	
1995	49.2	35.0	40.6	38.0	40.0	54.0		55.5	72.0			45.0		52.0				36.3				46.5	
1996	61.0	26.0	20.1	45.0	34.5	52.0		31.8	73.5			36.5		67.0		33.4		26.0				65.5	
1997	42.5	48.0	42.0	36.0	34.0			35.2	41.0		32.0	45.0	53.0	61.0	38.2			34.5				35.1	
1998	32.5		47.0	74.0	44.0			49.1	60.0	55.3		49.5	48.0	55.0	45.5		58.2		49.6			70.1	
1999	49.5	30.5	32.0	37.0				54.8	97.5	41.0		56.0	69.2	45.0	58.5		41.8		37.0			52.0	
2000	51.8	44.5	38.5	41.0	45.5				43.0	38.5		50.5		57.0		46.9							
2001	29.8	44.0	26.0	59.0	150.0	38.0						34.5		91.0		45.2		28.5				104.0	
2002	51.5	51.0	38.5	35.0	58.0	80.0					38.0	38.0		55.0		62.5		65.1				83.0	
2003	46.0	31.5	73.0	30.0	46.0	45.8			54.0		51.0	40.0	59.8		64.0	87.9		35.1				70.0	
2004	42.2	40.5	87.0	43.0	70.0	45.0	29.5	53.6			54.0		74.0		29.0	50.4		42.3				96.0	
2005	43.1	46.0	31.5	43.5	51.0		36.5		55.5		84.0		54.0		50.9	68.5		43.1				42.0	
2006	43.0	39.5	69.0	29.0	55.5		59.0		44.0	43.3	58.0		45.0			42.8						60.0	
2007	49.5	45.0	60.0	57.0	45.0					49.8			56.5		40.2	58.4						62.0	
2008	40.4	49.0	138.8	56.0	45.5					66.7		95.0	65.0	55.0	40.2	95.0		30.0				64.0	
2009	44.3	64.0	39.0	56.0	67.5			57.1	59.0	45.1			36.0	49.0	42.5	45.2			37.0			53.0	
2010	38.7	37.0	53.0		38.0								28.5						51.0				
2011	29.0	37.5	74.0		74.5		38.5	59.5			47.0	54.0	61.0	34.0	47.0	64.2		37.0	37.2			64.0	
2012		48.0	49.0		29.5			50.6	61.9		60.0	28.0	45.5	115.7	36.7	55.2		50.0	44.8			30.0	
2013	47.0	31.0						57.2	81.0	45.3	61.0	42.0	54.0	45.0	53.6	74.5		44.0				40.0	
2014	27.3	31.0		43.0				40.3	60.0	46.6	55.0		66.0		55.8	72.4		42.0				45.0	
2015	61.2	31.0		45.0					40.0	55.6	60.0				31.5	47.4		50.0					
2016	65.0	53.5																					
Media	45.76	44.98	47.85	46.23	50.15	46.00	47.26	51.14	53.25	46.67	51.09	43.41	53.06	49.37	43.96	57.89	55.51	39.92	50.51	45.14	45.73	59.17	
N° Años	61	64	41	58	56	51	33	25	51	35	38	45	37	41	37	36	22	46	22	31	25	31	

Tabla 5.6 Series moduladas para cada estación de la región homogénea

Año	13068	13075	13080	13084	13089	13092	15001	15002	15024	15032	15064	15071	15074	15078	15081	15084	15109	15115	15132	15139	15156	15187	
1950						0.93																	
1951		0.64				0.76																	
1952		0.95		0.91		0.97			0.70														
1953	0.76	1.19		0.82		1.19			0.67														
1954		0.80		0.54	0.63	0.96			0.90														
1955	0.87	0.80		0.65	2.69	1.14			1.40														
1956	0.71	1.10			0.65	1.36																	
1957	0.97	0.47			1.20	0.91			1.01														
1958	0.92	1.10		1.08		0.84	1.80		1.02														
1959	0.93	0.66		0.60	0.67	1.51	0.63		1.03														
1960	1.17	1.27		1.43		0.89	1.02		0.90														
1961	0.60	0.84		0.60	1.05	0.86	0.00		0.67	1.05	0.78	0.62	0.68	0.88	0.81		1.08	1.25	1.03	1.33	0.63		
1962	1.60	0.89		0.91	0.76	0.67	1.11		0.55	0.73	0.77	0.86	1.47		0.85			1.00	1.41	1.07	1.08		
1963	0.76	1.72		1.43	0.90	1.38	0.88		1.05	0.70	1.00	1.24		1.26	1.26			1.53		1.26	0.94		
1964	1.05	0.76		0.82	0.84	0.69	1.52	1.47	0.73		0.90	1.64	0.60	0.78	0.78			0.73	0.83	0.83	1.16	0.77	
1965	1.09	1.19		0.97	0.98	1.53	0.63	0.78	1.10	1.38	0.92	0.92	0.53	0.74	0.74	0.64	0.83	0.86	1.29	0.83	2.46		
1966	1.42	0.82		0.58	1.18	1.40	0.89		0.99	2.41	0.72	0.85	1.58	0.49	1.36	1.30	1.27	1.22	0.95	0.90	1.80		
1967	1.31	1.09		0.91	0.95	1.41	1.11		0.75	0.80	0.63	0.92	1.05	1.05		0.93	1.34	1.15	1.43	1.31	1.19		
1968	1.09	0.55		0.89	0.68	0.68	0.87		0.81	0.81	1.06	0.78	0.98	1.01		0.81	0.94	1.15	0.80	0.84	0.90		
1969	0.67	0.67		1.04	0.70	0.82	1.21		0.95	0.75						0.73	0.89	1.50	1.23		0.87		
1970	1.75	0.57		1.01	0.64	1.03	1.31		1.19	0.69	1.31		0.68	1.24	0.95	0.89	1.41	0.88		1.35	0.76		
1971		0.84	1.00	1.08	0.84	0.93	1.13		1.16	0.65		1.05	0.75	0.97	0.94	0.87	1.21	0.87	1.20	0.81	0.83		
1972	0.80	1.01	0.61	0.82	0.77	1.07	1.08	0.82	0.82	0.85	0.94	0.77	1.20	1.37	0.80	0.70	0.86	0.58		0.80	0.71		
1973	1.33	1.99	0.78	1.71	1.02	0.92	0.85	1.66	1.12	0.81	1.10	1.14	0.74	0.75	0.81	0.51	0.78	0.71	0.81	1.03	0.77		
1974	1.07	1.21	1.13	1.19	1.30	0.68	0.61		1.25	0.72	1.06	1.81	1.02	0.86			1.73	0.90	0.90	1.45	0.94	1.61	
1975	1.18	1.01	1.18	0.87	0.88	0.83	0.85			1.25	0.73	1.07	0.79	0.68		1.04	0.85	0.69	0.80	0.99	1.03	1.00	
1976	1.03	1.04	0.83	0.94	1.38	0.77	0.85		1.09	0.54	0.74	1.13		1.34	1.20	0.97	0.77	0.90	1.03	1.15	1.07	1.15	
1977	1.38	1.68	0.84	1.17	0.98	1.02	1.06		1.21	0.79	0.88	1.38		0.75	0.73	0.98		0.72	0.83	0.75	1.20	0.68	
1978	0.80	0.75	0.84	0.82	1.38	0.73	1.14	0.70	1.00			0.84	1.39	0.81	0.88	1.55		1.05	1.32	0.83	0.77	1.05	
1979	0.81	0.92	0.83	1.11	0.70	0.67	0.85	1.31	1.29		1.03	0.66		0.53	1.25	0.95	0.87	0.76		0.72		1.08	
1980	0.92	0.97	1.26	1.21	0.79	0.95	0.85	0.72	1.12	1.09	0.65	0.73	1.90	0.84	1.02		1.01	0.91		0.76	0.71	1.12	
1981	1.43	1.77	1.26	0.84	0.80	1.11	0.85	1.21	1.00	1.16	0.57	0.83	0.64	0.71	0.79		0.92	1.05	0.62	1.46	0.87	1.02	
1982	0.44	0.62	0.77	0.78	0.56	0.98		0.60	0.68	0.54	1.21	0.69	0.74	0.94	0.42		0.89	1.04	0.70	0.89	0.77	0.81	
1983	0.74	1.15	0.59	1.40	0.94	0.95	1.06	1.02	0.90	1.18	1.35	1.11	0.99	0.98	1.13		1.02		0.77	0.97	1.05	1.10	
1984	1.11	0.96	0.57	1.21	1.26	0.97		0.82	0.63	0.88	1.06	0.66	1.24	0.73	0.96		0.82	0.91	1.26	1.33		0.76	
1985	0.64	1.21	0.96	0.97	0.74	0.97	0.70		0.91	1.05	0.67	1.01	0.85	0.89	1.74			1.28		0.84	0.98		
1986	1.18	0.81	1.13	1.01	1.08	1.53	2.12		1.10	0.79	1.17	1.06	0.92	1.15	1.17		0.89	0.89	0.84	0.84	0.92	0.62	
1987	0.82			1.43	0.69	0.97	0.74			1.52	0.96	1.26	0.60	0.96	0.99		0.89	0.95		0.91	0.97		
1988	1.75	1.29	0.90	1.43	1.60	0.80				1.41		0.92		1.10	1.05			1.00		1.06			
1989	0.92	1.12	1.33	0.78	0.92	0.86			0.87			0.98		0.63							0.90		
1990	0.68	0.87	0.73	0.67	1.05	0.54			0.73		1.02	0.83					1.23			0.78			
1991	0.98	1.48	0.98	0.82	0.80	0.76	1.23	1.62				0.74							0.96		0.80		
1992	0.95	1.50	0.67	1.12	0.83	1.30	0.74	1.04			1.21	0.98								1.17	0.92		
1993	0.78	1.33	0.52	0.95	0.82	0.76	0.69	0.98			1.29	1.01											
1994	0.94	0.88	1.25	1.81	0.92	0.86			0.58		1.27	0.71				1.25						0.73	
1995	1.08	0.77	0.85	0.82	0.80	1.17		1.09	1.34			1.04		1.05					0.91			0.79	
1996	1.33	0.57	0.42	0.97	0.69	1.12		0.62	1.37			0.84		1.36		0.58		0.65				1.11	
1997	0.93	1.06	0.88	0.78	0.68			0.69	0.77		0.63	1.04	1.00	1.24	0.87			0.86				0.59	
1998	0.71		0.98	1.60	0.88			0.96	1.12	1.18		1.14	0.90	1.11	1.04	1.01		1.24				1.18	
1999	1.08	0.67	0.67	0.80				1.07	1.82	0.88		1.29	1.30	0.91	1.33	0.72		0.93				0.88	
2000	1.13	0.98	0.80	0.89	0.91				0.80	0.82				1.15		0.81							
2001	0.65	0.97	0.54	1.27	2.99	0.82						0.79		1.84		0.78			0.71			1.76	
2002	1.13	1.13	0.80	0.76	1.16	1.73					0.74	0.88		1.11		1.08		1.63				1.40	
2003	1.01	0.70	1.53	0.65	0.92	0.99			1.01		1.00	0.92	1.13		1.46	1.52		0.88				1.18	
2004	0.92	0.89	1.82	0.93	1.40	0.97	0.62	1.05			1.06		1.39		0.66	0.87		1.06				1.62	
2005	0.94	1.02	0.66	0.94	1.02		0.77		1.04		1.64		1.02		1.16	1.18		1.08				0.71	
2006	0.94	0.87	1.44	0.63	1.11		1.25		0.82		0.93	1.14		0.85		0.74						1.01	
2007	1.08	0.99	1.25	1.23	0.90					1.07			1.06		0.91	1.01						1.05	
2008	0.88	1.08	2.90	1.21	0.91					1.43		2.19	1.23	1.11	0.91	1.64		0.75				1.08	
2009	0.97	1.41	0.82	1.21	1.35			1.12	1.10	0.97			0.68	0.99	0.97	0.78		0.93				0.90	
2010	0.85	0.82	1.11		0.76								0.54					1.28					
2011	0.63	0.83	1.55		1.49			0.75	1.11		0.92	1.24	1.15	0.69	1.07	1.11		0.93	0.74			1.08	
2012		1.06	1.02		0.59			0.99	1.16		1.17	0.64	0.86	2.34	0.83	0.95		1.25	0.89			0.51	
2013	1.03	0.68						1.12	1.51	0.97	1.19	0.97	1.02	0.91	1.22	1.29		1.10				0.68	
2014	0.60	0.68		0.93				0.79	1.12	1.00	1.08		1.24		1.27	1.25		1.05				0.76	
2015	1.34	0.68		0.97					0.75	1.19	1.17			0.64		0.82		1.25					
2016	1.42	1.18																					

5.3.2 Pruebas de homogeneidad e independencia

Una vez conformada la serie única de valores estandarizados se aplicaron las pruebas de homogeneidad e independencia para corroborar que la serie estandarizada, a pesar de estar

conformada por datos de diferentes estaciones climatológica, sigue rigiéndose bajo las leyes de la probabilidad y se comporta como una variable aleatoria.

5.3.2.1 Prueba de independencia de Anderson

Al aplicar la prueba de Anderson se obtuvo el siguiente correlograma en el que se relacionan el coeficiente de autocorrelación serial con los diferentes tiempos de retraso. Esta metodología se describe en el capítulo 3, en el que se muestran las expresiones empleadas para obtener el correlograma que se muestra en la figura 5.4.

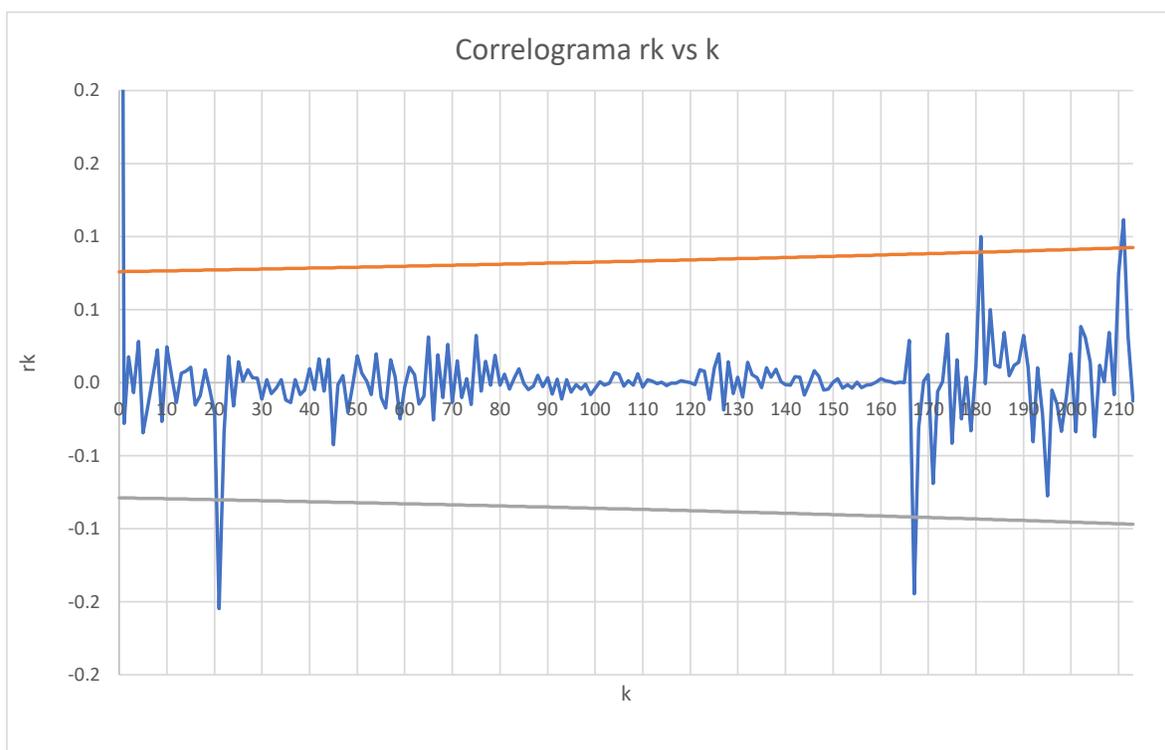


Figura 5.4 Correlograma obtenido de la prueba de Anderson

En esta grafica se observa que menos del 10% de los valores del coeficiente sobrepasan los límites de confianza por lo que la serie se considera independiente y se rige bajo las leyes de la probabilidad.

5.3.2.2 Pruebas de homogeneidad de Helmert, T Student y Cramer

Las tablas 5.7 a 5.9 contienen un resumen de los resultados obtenidos al aplicar las pruebas de homogeneidad de Helmert, T de Student y Cramer a la serie única de valores estandarizados generada anteriormente.

Tabla 5.7 Resumen de la aplicación de la prueba de Helmert

Prueba de Helmert	
# C	326
# S	313
Helmert	-13
$\sqrt{n-1}$	25.3
Serie homogénea	

Tabla 5.8 Resumen de la aplicación de la prueba T Student

Prueba t student							
Serie completa		Primer mitad		Segunda mitad			
n	640	n	320	n	320	td	0.36
μ	1.00	μ	1.00	μ	1.00	t ₉₅	2.584
σ^2	0.09	σ^2	0.08	σ^2	0.10		
σ	0.30	σ	0.28	σ	0.31		
Serie homogénea							

Tabla 5.9 Resumen de la aplicación de la prueba de Cramer

Prueba de Cramer								
Serie completa		n60		n30				
n	640	n	384	n	192	τ_{60}	0.00	
μ	1.00	μ	1.00	μ	1.00	τ_{30}	0.00	
σ^2	0.09	σ^2	0.09	σ^2	0.09	t ₆₀	0.05	
σ	0.30	σ	0.30	σ	0.30	t ₃₀	0.0	
Serie homogénea							t ₉₅	2.0

Al aplicar las pruebas de homogeneidad se obtiene como resultado que la serie es homogénea en todos los casos ya que se cumplen con los criterios establecidos por cada una de dichas pruebas.

Al registro único conformado por todos los datos de las series moduladas se le aplicó el análisis de frecuencias correspondiente para ajustar una distribución de probabilidad y obtener de esta manera los factores regionales. Para llevar a cabo el ajuste de funciones de probabilidad se utilizó la herramienta “Ax.exe”, la cual es un programa de cómputo desarrollado en el Centro Nacional de prevención de desastres (CENAPRED).

Este programa toma como datos de entrada los valores ordenados de la serie modulada para determinar la función de probabilidad que mejor se ajusta a la serie de datos analizada y da como salida una tabla comparativa de los errores estándar calculados para cada función de probabilidad que sirve como guía para comparar y elegir un ajuste. Esta tabla comparativa se muestra en la figura 5.5.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	.079	-----	.079	-----
Lognormal	.028	.018	.032	2.239
Gumbel	.019	-----	.020	-----
Exponencial	.053	-----	.691	-----
Gamma	.044	.025	.072	.032
Doble Gumbel	.044			

Mínimo error estándar: .018
Calculado por la función: Lognormal (momentos) 3 p.

Figura 5.5 Resumen de errores estándar en Ax. (Jiménez, 1997)

Debido a que los valores que se analizan corresponden a un registro de valores máximos anuales se toma el ajuste de la función de probabilidad de Gumbel por momentos ya que esta distribución ajusta de mejor forma los datos registrados de eventos extremos, además de que los resultados del programa indican que Gumbel es la segunda función con el mínimo error estándar para esta serie única de datos con un valor de 0.019. Se muestra la gráfica del ajuste de la función Gumbel en la figura 5.6.

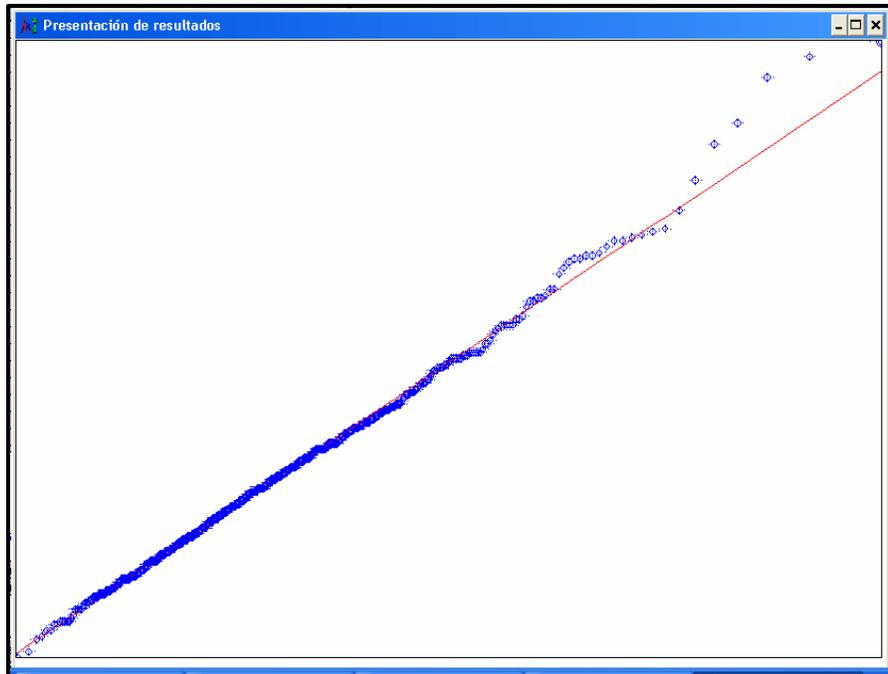


Figura 5.6 Grafica de ajuste de la distribución Gumbel (Momentos)

Una vez determinado el ajuste de la función Gumbel se extrapolaron los valores de la serie para obtener los factores regionales asociados a un periodo de retorno, los cuales al ser multiplicados por la media se convierten en lluvias de diseño en 24 horas. En la tabla 5.10 se muestran los valores obtenidos a partir de la extrapolación (factores regionales) y en la tabla 5.11 se incluyen las lluvias de diseño de 24 horas asociadas a cada una de las estaciones de la región homogénea.

Tabla 5.10 Factores regionales extrapolados a partir de la función de distribución Gumbel

Tr	Factor regional
2	0.95
5	1.22
10	1.39
20	1.56
50	1.78
100	1.95
200	2.11
500	2.33
1000	2.49
2000	2.66
5000	2.87
10000	3.04

Tabla 5.11 Lluvias de diseño de 24 horas asociadas a diferentes periodos de retorno

LLUVIAS DE DISEÑO POR ESTACION CLIMATOLÓGICA															
ID	Estación	Media hp (mm)	FR Tr	0.95	1.22	1.39	1.56	1.78	1.95	2.11	2.33	2.49	2.66	2.87	3.04
				2	5	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10000
1	13068	45.76		43.47	55.83	63.61	71.39	81.46	89.24	96.56	106.63	113.95	121.73	131.34	139.12
2	13075	45.27		43.01	55.23	62.93	70.62	80.58	88.28	95.52	105.48	112.72	120.42	129.93	137.62
3	13084	46.31		43.99	56.50	64.37	72.24	82.43	90.30	97.71	107.90	115.31	123.18	132.91	140.78
4	13092	46.31		44.00	56.50	64.38	72.25	82.44	90.31	97.72	107.91	115.32	123.20	132.92	140.80
5	15001	47.26		44.89	57.65	65.69	73.72	84.12	92.15	99.71	110.11	117.67	125.71	135.63	143.66
6	15002	51.14		48.59	62.40	71.09	79.78	91.04	99.73	107.91	119.17	127.35	136.04	146.78	155.48
7	15024	53.56		50.89	65.35	74.45	83.56	95.34	104.45	113.02	124.80	133.37	142.48	153.73	162.83
8	15032	46.67		44.34	56.94	64.87	72.81	83.08	91.01	98.48	108.74	116.21	124.15	133.95	141.88
9	15071	43.41		41.24	52.96	60.34	67.72	77.27	84.65	91.60	101.15	108.09	115.47	124.59	131.97
10	15074	53.06		50.41	64.73	73.75	82.77	94.45	103.47	111.96	123.63	132.12	141.14	152.28	161.30
11	15078	49.37		46.90	60.23	68.62	77.01	87.87	96.27	104.17	115.03	122.93	131.32	141.68	150.08
12	15081	43.96		41.76	53.63	61.10	68.57	78.24	85.72	92.75	102.42	109.45	116.92	126.16	133.63
13	15084	57.89		54.99	70.62	80.46	90.30	103.04	112.88	122.14	134.87	144.14	153.98	166.13	175.97
14	15132	50.51		47.98	61.62	70.21	78.79	89.91	98.49	106.57	117.69	125.77	134.35	144.96	153.55
15	15156	45.73		43.44	55.79	63.56	71.34	81.40	89.17	96.49	106.55	113.86	121.64	131.24	139.01
16	15187	59.17		56.22	72.19	82.25	92.31	105.33	115.39	124.86	137.88	147.34	157.40	169.83	179.89

5.3.3. Comparación de factores regionales obtenidos

Los resultados obtenidos en esta regionalización de lluvias se compararon con los factores regionales obtenidos en un estudio realizado por el CENAPRED (Domínguez, et al., 2017), en el cual se actualizaron los factores regionales para diferentes periodos de retorno en 66 regiones delimitadas. Se llevó a cabo la comparación con los factores obtenidos para las regiones del Estado de México e Hidalgo en ambas subregiones de este. A partir de la comparación se observó que los resultados del análisis regional de este trabajo son muy similares a los obtenidos para la región del Estado de México y difieren en mayor medida en ambas regiones de Hidalgo, especialmente en los periodos de retorno más grandes. Los resultados de esta comparación se encuentran detallados en la tabla 5.5.

Tabla 5.12 Comparación de los factores regionales obtenidos vs resultados del estudio de regionalización elaborado para el CENAPRED (Domínguez Mora R., et al., 2017)

Clave Región	18	23	24	Factores obtenidos
Tr [años]	Estado de México	Hidalgo [Mayores]	Hidalgo [Menores]	
2	0.95	0.92	0.91	0.95
5	1.22	1.34	1.24	1.22
10	1.40	1.62	1.51	1.39
20	1.57	1.88	1.83	1.56
50	1.79	2.23	2.22	1.78
100	1.95	2.49	2.49	1.95
200	2.12	2.74	2.75	2.11
500	2.33	3.08	3.08	2.33
1000	2.50	3.34	3.33	2.49
2000	2.66	3.60	3.58	2.66
5000	2.88	3.94	3.92	2.87
10000	3.04	4.19	4.16	3.04

5.4 Hietogramas de diseño.

Para generar los hietogramas de diseño para cada una de las cuencas en estudio se tomaron varias consideraciones con el fin de obtener una modelación completa. El primer aspecto importante fue considerar el factor de convectividad R que relaciona las precipitaciones de 24 horas con la de una hora. Según el mapa de Labrada, 2018 (Figura5.7) se tiene que la región en la que se sitúa la zona de estudio se determinó el factor R con un valor igual a 0.65.

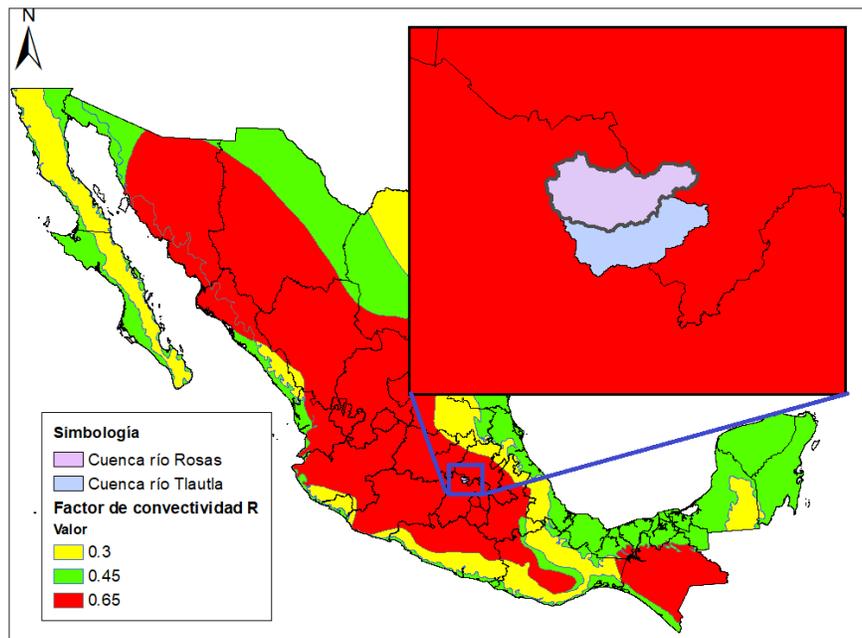


Figura 5.7 Determinación de R en la ubicación de la zona de estudio. Tomado de (Labrada Montalvo, 2018)

Además de esto se considera de igual forma el tamaño de las cuencas ya que debido a su extensión y forma se considera poco probable que la tormenta de diseño se presente simultáneamente en toda el área de la cuenca. Por ello, se aplica el factor de reducción por área actualizado por Sánchez, (2017), las cuales se muestran en el mapa de la figura 3.2 del capítulo 3.

Ambas cuencas que se analizan en este trabajo pertenecen a la región hidrológica 26, por lo que se empleará la ecuación 5.1 para determinar el FRA en cada cuenca.

$$FRA = -0.046 \ln(A) + 0.9587 \quad (5-1)$$

Donde:

FRA	Factor de reducción por área
A	Área de la cuenca en estudio, en km^2

Esta ecuación se aplica en cada una de las cuencas para generar los hietogramas de diseño, pero ahora tomando en cuenta que las lluvias de diseño no ocurren simultáneamente en toda el área de aportación, así como la diferencia de tamaños que existe entre ambas cuencas, de esta forma se generan hietogramas distintos para cada cuenca en particular.

5.4.1 Hietogramas de diseño para la cuenca del río Tlautla

Como se mencionó anteriormente, la cuenca del río Tlautla ha sido recortada de su tamaño original con un área total de $236.66 km^2$. Con esta información y los resultados de la regionalización se generaron los hietogramas de diseño asociado a los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años para cada una de las cuencas.

El hietograma de diseño se generó considerando una duración de tormenta de 1 hora

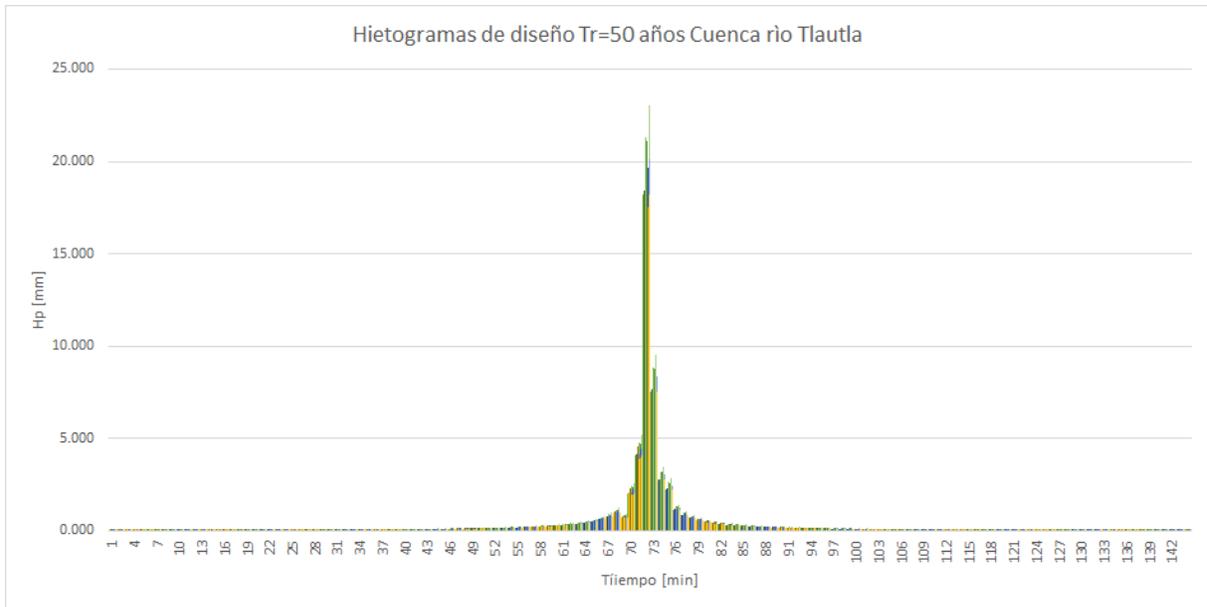


Figura 5.8 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 50 años, cuenca río Tlautla

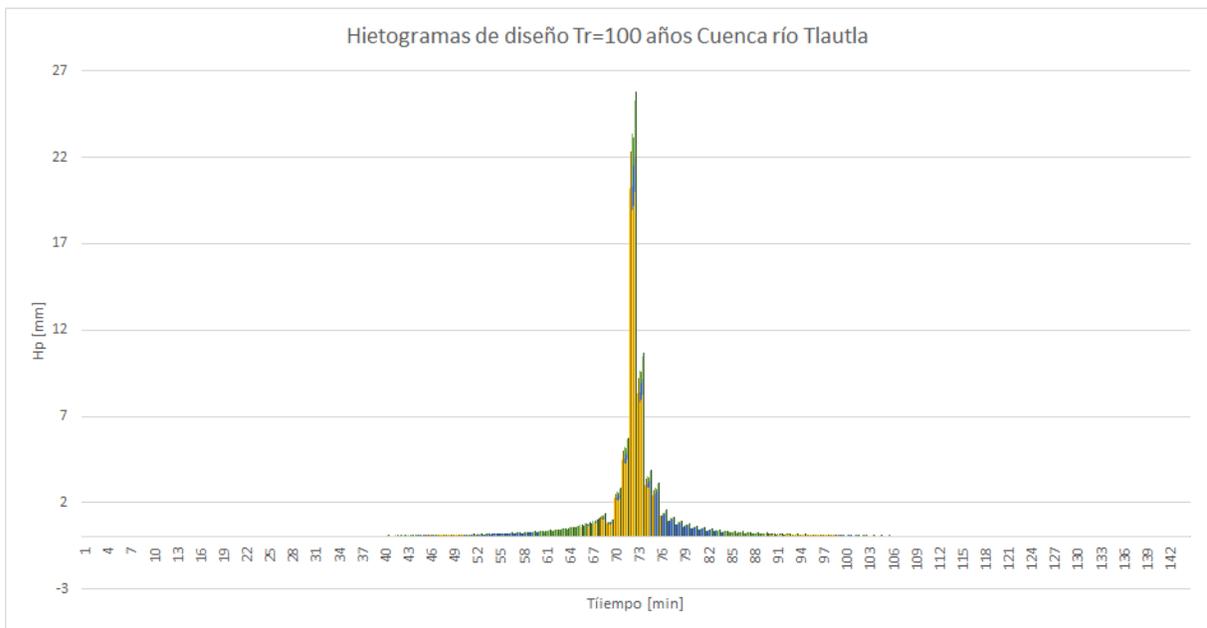


Figura 5.9 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 100 años, cuenca río Tlautla

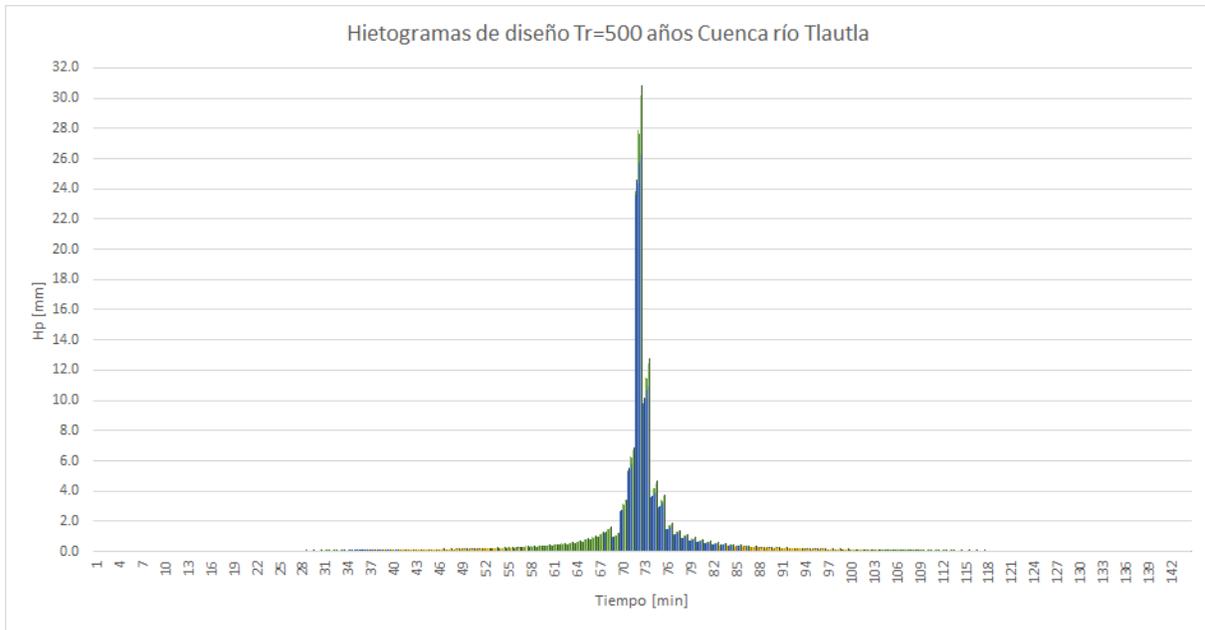


Figura 5.10 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 500 años, cuenca río Tlautla

5.4.2 Hietogramas de diseño para la cuenca del río Rosas

Por su parte, la cuenca del río Rosas tiene un área de aportación de 293.90 km^2 . Los hietogramas de diseño obtenidos a partir de esta información y los resultados de la regionalización se presentan a continuación.

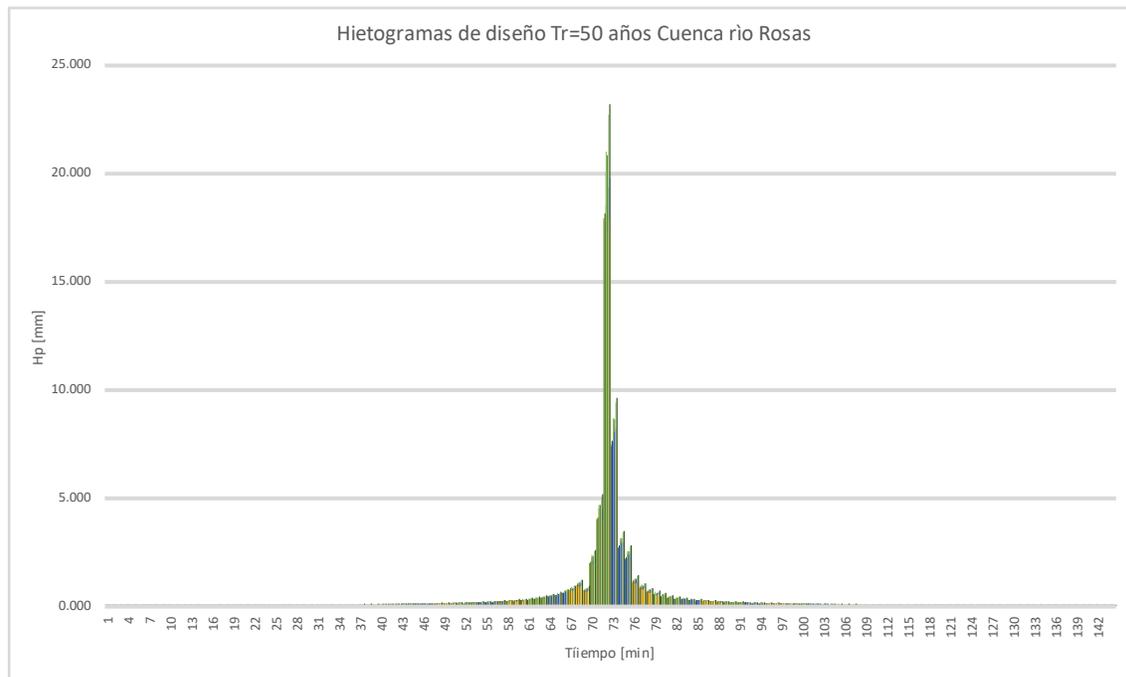


Figura 5.11 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 50 años, cuenca río Rosas

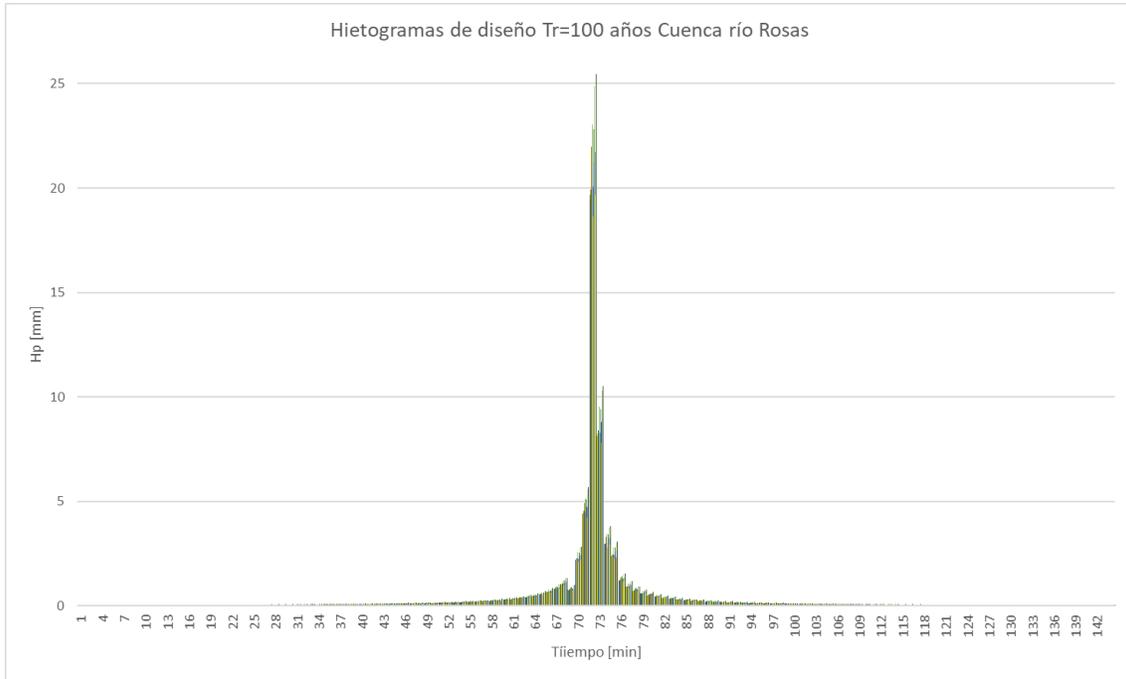


Figura 5.12 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 100 años, cuenca río Rosas

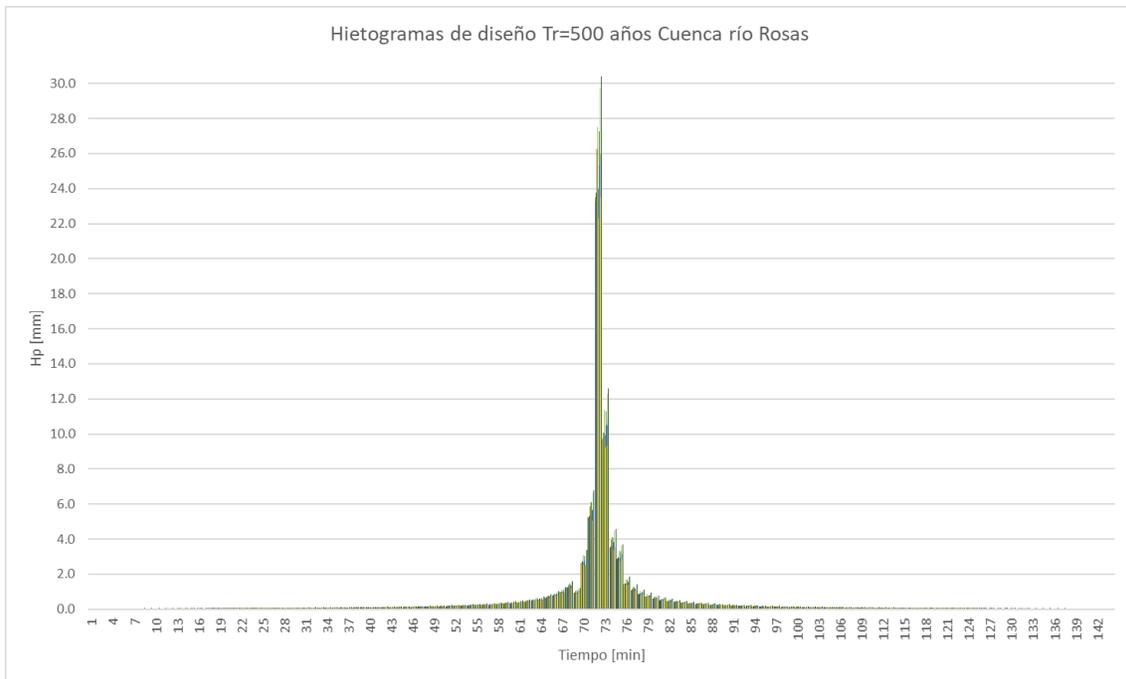


Figura 5.13 Hietograma de diseño para un periodo de retorno de 500 años, cuenca río Rosas

5.5 Caracterización de las cuencas

La obtención de los parámetros fisiográficos que son necesarios para la implementación del modelo de pronóstico de escurrimiento se realizó mediante un geoprocesamiento del modelo digital de elevaciones MDE o continuo de elevaciones mexicano CEM obtenido de la página del INEGI con una resolución de 15 metros. El geoprocesamiento se llevó a cabo dentro del software de Sistemas de información geográfica ArcMap de la compañía ESRI, en la versión 10.8 en conjunto con la extensión del HEC-GeoHMS instalada dentro del mismo entorno del SIG.

La caracterización y discretización de las cuencas en estudio se llevó a cabo con el objetivo de generar un archivo de texto en el que se plasmaran las propiedades fisiográficas de cada cuenca en forma de una malla de celdas a las que se le asignan dichas propiedades promedio. Las propiedades necesarias que se obtuvieron para cada malla de celdas son las siguientes:

- Ubicación geográfica de cada celda (X,Y) en coordenadas UTM Zona 14
- Área de cada celda
- Longitud del tramo de cauce contenido en la celda
- Promedio de número de curva o número de escurrimiento (NC) en el área de la celda

A continuación, se describen los procesos para la delimitación de las cuencas en estudio, así como su caracterización y la discretización para obtener los archivos de texto finales que sirven de insumo para el modelo lluvia-escurrimiento. El procesamiento general se divide en las siguientes cinco etapas:

- 1. Preprocesamiento.** En esta etapa se lleva a cabo el procesamiento del modelo digital del terreno para delimitar las áreas de aportación de cada cuenca. En este proceso se definen los parteaguas de las cuencas que se contienen dentro del modelo utilizado, así como la red de flujo y las subcuencas de aportación en las que se divide cada cuenca generada, esto con el fin de identificar las cuencas que interesa estudiar (figura 5.14).

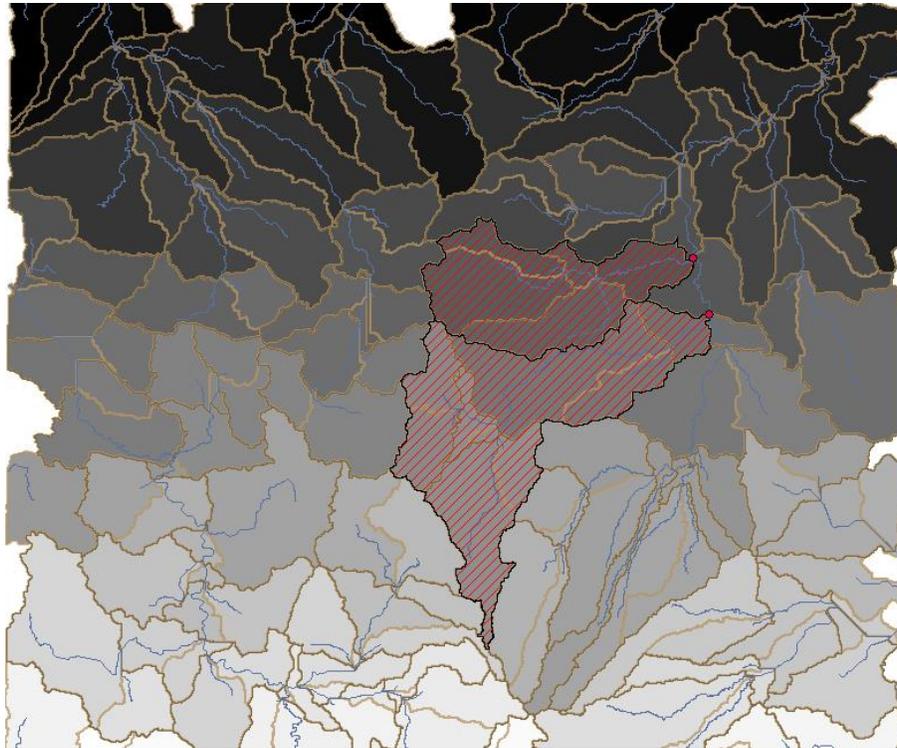


Figura 5.14 Cuencas y subcuencas generadas a partir del modelo digital utilizado

2. **Delimitación de la cuenca.** En esta etapa se selecciona la cuenca que se pretende caracterizar con base en la información generada durante los procesos anteriores. La selección de la cuenca en estudio depende directamente del punto de salida que se establezca durante esta etapa, para que a partir de esta selección se inicie un nuevo proyecto dentro de HEC-GeoHMS, ver figura 5.15.

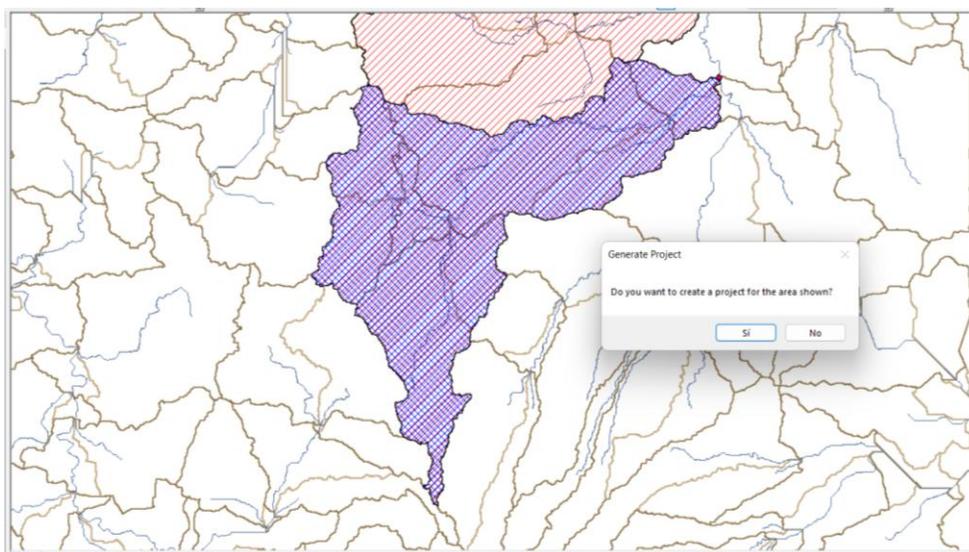


Figura 5.15 Generación del nuevo proyecto en HEC-GeoHMS

- 3. Caracterización de la cuenca.** Durante esta etapa se obtienen las propiedades fisiográficas de la cuenca en estudio con base en los procesos con los que se cuenta en HEC-GeoHMS así como las capas generadas en la primera etapa. Propiedades como la pendiente media de la cuenca, la longitud de los cauces principales, centroides y elevaciones de estos se obtienen en este proceso y se generan capas que contienen esta información de manera general para toda la cuenca (figura 5.16).

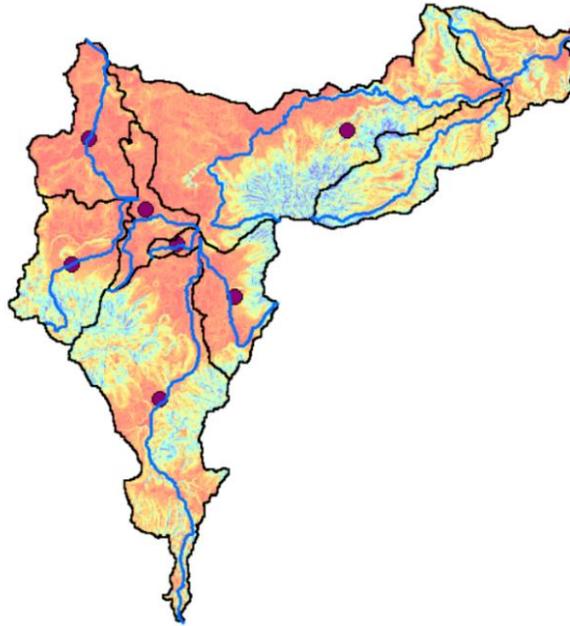


Figura 5.16 Caracterización de cuencas y subcuencas (Pendientes, centroides, cauces principales)

- 4. Determinación del número de curva.** En esta etapa de modelado se obtiene el número de curva para la cuenca en estudio con ayuda de la herramienta de visor de números de escurrimiento desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Para obtener el número de curva se requiere contar con la cuenca delimitada en un archivo de formato Shapefile proyectado en el sistema de coordenadas de cónica conforme de Lambert, ITRF 2008, el cual se ingresa en el entorno de la herramienta y regresa un archivo del mismo tipo en el que se contienen la distribución espacial de los números de curva presentes en el área de la cuenca en estudio (figura 5.17), (IMTA, 2023).



Figura 5.17 Entorno de la herramienta de visor de números de escurrimiento, IMTA

- 5. Etapa de mallado.** En la última etapa de la caracterización ya se cuenta con la cuenca delimitada con sus características fisiográficas, así como el número de curva para toda el área de aportación, por lo que el proceso final consiste en obtener estas características en forma de una malla de celdas y generar el archivo de texto. Para ello se lleva a cabo un geoproceto de mallado en el que se define un tamaño específico de celdas, así como el sistema de mallado que se utiliza para representar el terreno en las tres dimensiones. El método que se empleó para generar la malla es **SHG** grid system, el cual es un sistema de celdas cuadradas de resolución variable desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (**HEC**). Finalmente se obtiene la malla en una nueva capa de formato Shapefile, la cual contiene todas las propiedades necesarias descritas en el inicio de este apartado para finalmente ser exportadas a un archivo de texto simple. El resultado final se aprecia en las figuras 5.18 y 5.19.

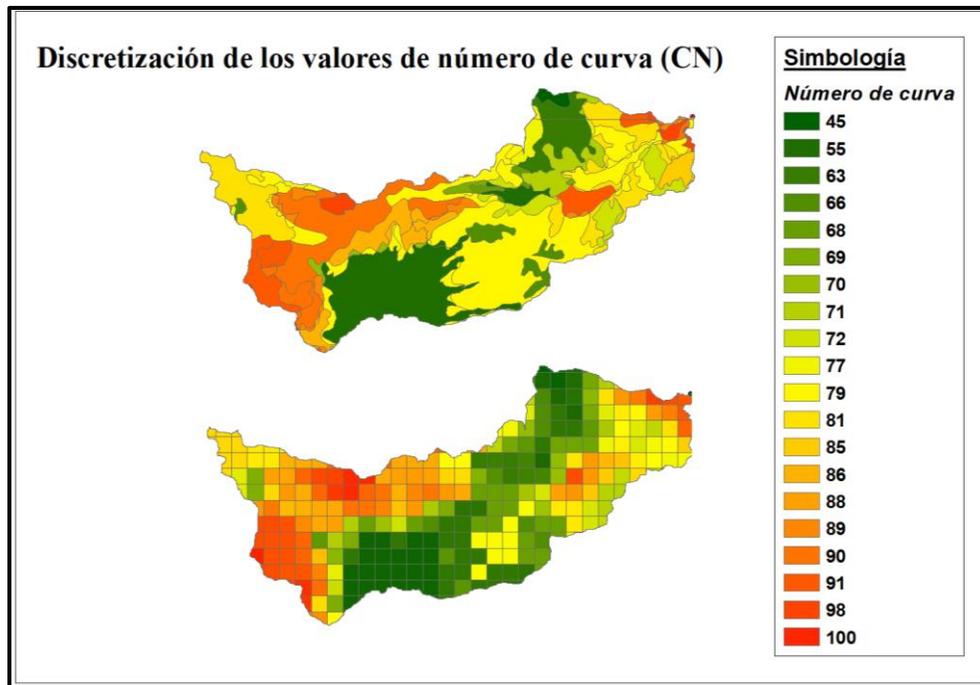


Figura 5.18 Visualización de la malla de celdas con número de curva asignado. Cuenca Tlaxcala

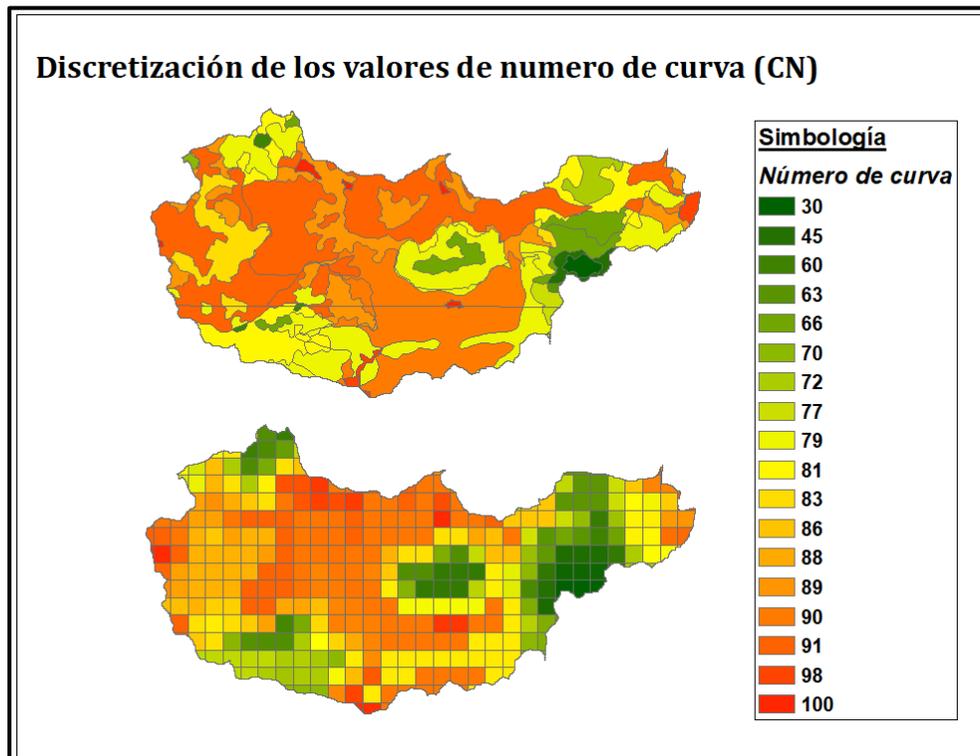


Figura 5.19 Visualización de la malla de celdas con número de curva asignado. Cuenca Rosas

Para obtener finalmente el archivo de texto que se necesita como dato de entrada para el modelo MPE se exporta la tabla de atributos de la malla de celdas en la cual ya debe contener los campos necesarios con sus datos asignados a cada celda. La tabla de atributos se pega en un archivo nuevo de Excel y se guarda como un archivo de texto delimitado por espacios en los que únicamente debe contener las 5 columnas con las propiedades antes mencionadas para cada una de las cuencas analizadas. Los archivos de texto finales se encuentran listos para ser ingresados al MPE junto con los hietogramas de diseño para obtener finalmente las estimaciones de eventos de diseño.

5.6 Modelación en el MPE

El modelo de pronóstico del escurrimiento (MPE) es un modelo lluvia-escurrimiento por parámetros distribuidos que usa como insumo las características fisiográficas de una cuenca o zona en estudio, así como las condiciones de lluvia que se desea modelar. Las características fisiográficas se ingresan como un archivo de texto que se genera siguiendo el procedimiento descrito en el apartado anterior, el subcapítulo 5.5. Las características de las lluvias de diseño se ingresan en conjunto como una serie de hietogramas de precipitación puntuales, los cuales se asocia a un par de coordenadas que representan la ubicación de cada una de las estaciones climatológicas que conforman la región.

A partir de esto el modelo necesita ser calibrado para obtener una representación adecuada de la relación lluvia-escurrimiento y que los resultados que arroje sean respaldados por medio de eventos que se han presentado y registrado con anterioridad en las estaciones hidrométricas instaladas en la zona.

5.6.1 Avenidas históricas

Para obtener las avenidas de diseño fue necesario realizar un proceso de calibración del modelo antes de generar los resultados finales, esto con el fin de asegurar que el programa está replicando correctamente las condiciones del terreno que se está modelando en función de un evento atípico observado con anterioridad en las estaciones hidrométricas que miden diariamente la magnitud del caudal de los ríos en cuestión.

Del análisis de los registros hidrométricos de las estaciones consideradas se identificaron los 5 eventos de mayor magnitud registrados y se analizaron las fechas cercanas a la ocurrencia de cada uno de estos eventos. Se analizaron treinta días totales siendo el día del máximo valor observado el día número dieciséis, esto para tener una mejor lectura de como fue el

comportamiento del hidrograma antes y después de la ocurrencia del evento, así como para visualizar de qué manera se produjeron las lluvias que generaron dicho evento.

5.6.1.1. Río Rosas

Para la cuenca del río Rosas se analizó el registro de gastos medios diarios de la estación hidrométrica número 26247 “Las Rosas” ubicada en la salida de la cuenca. Esta estación cuenta con un periodo de registro de 1954 a 2014 y de acuerdo con su serie histórica el año 1976 fue la fecha en la que se presentó el caudal más grande. Se generó la tabla 5.6 para esta cuenca en la que se plasmaron 5 de estos eventos atípicos

Tabla 5.13 Eventos máximos registrados en la cuenca del río Rosas

Eventos máximos históricos-26247 LAS ROSAS		
Evento	Gasto (m ³ /s)	Fecha
1	77.470	30/9/1976
2	63.330	26/9/1974
3	61.270	5/7/1958
4	59.470	28/9/1971
5	59.288	28/8/1999

Se seleccionaron los tres primeros eventos de mayor magnitud y se graficaron en un mismo plano junto con los registros de lluvias presentados en las estaciones que pertenecen a la región homogénea con el fin de observar el comportamiento de estos dos tipos de registro y visualizar la relación existente entre cada tipo de registro. A continuación, se muestran las gráficas de los eventos seleccionados (figuras 5.20 a 5.22); se destaca el hecho de que el evento 3 cuenta con escasos registros de lluvias por lo que se descartó este evento para calibración en primera instancia.

En el caso del primer evento se aprecia que el hidrograma generado tiene 3 gastos “pico” de magnitud similar y que los registros de lluvia no presentan el mismo comportamiento por lo que el evento seleccionado para la calibración del modelo para el río Rosas fue el segundo evento, cuyo gasto pico se registró el día 26 de septiembre de 1974 con una magnitud de 63.33 m³/s. Para este evento se tiene registro de precipitaciones los 30 días considerados en las 16 estaciones que conforman la región homogénea, por lo que se consideró la mejor opción para realizar la calibración del modelo.

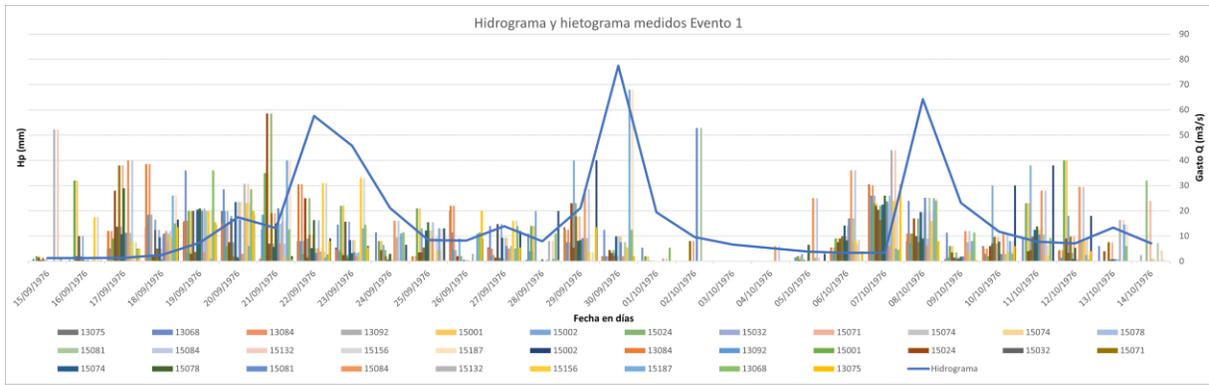


Figura 5.20 Hietograma e hidrograma medidos, evento 1

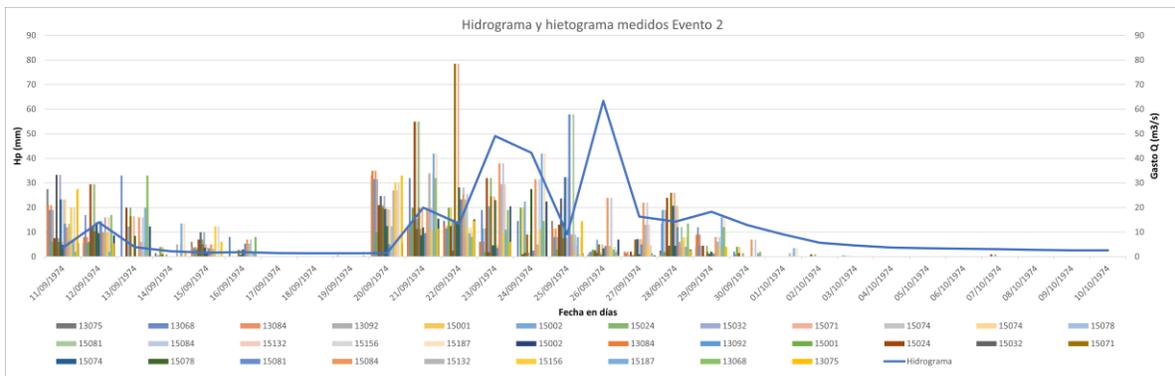


Figura 5.21 Hietograma e hidrograma medidos, evento 2

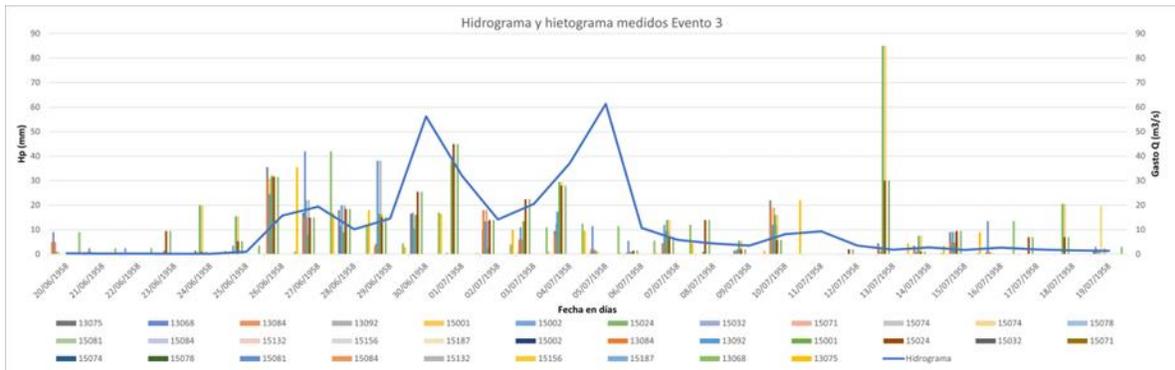


Figura 5.22 Hietograma e hidrograma medidos, evento 3

5.6.1.1 Río Tlautla

En el caso del río Tlautla se tiene que, para el primer evento, no se cuenta con registros de lluvia por lo que se tomaron los tres casos siguientes para graficar y comparar las lluvias con los gastos medidos. Se generó la información de la tabla 5.7.

Tabla 5.14 Eventos máximos registrados en la cuenca del río Tlautla

Eventos maximos históricos-26034 TLAUTLA		
Evento	Gasto (m3/s)	Fecha
1	118.524	6/07/1937
2	96.899	28/09/1971
3	91.554	28/09/1967
4	90.70891	28/08/1976
5	87.991	11/09/1958

Para el evento número 2 se tiene que 13 de las 16 estaciones climatológicas de la región homogénea presentaron registros de lluvia en la fecha seleccionada por lo que no se consideró una opción viable para usar en la calibración (figura 5.23).

Para calibrar el modelo del río Tlautla se utilizó el tercer evento ocurrido el día 28 de septiembre de 1967 con un gasto pico registrado de 91.554 m³/s al ser considerada como la opción más representativa y la que genera un hidrograma con una forma más “Convencional” con respecto a este tipo de eventos extremos, por lo que se tomó como base este evento para obtener los parámetros de calibración que se usarán para obtener los resultados finales.

Aunque el evento 4 es el que tiene registros de lluvias en todas las estaciones de la región dentro del periodo considerado, la forma del hidrograma no comparte una relación directa con las observaciones realizadas en los pluviómetros ya que el gasto pico se presenta durante lluvias de menor magnitud, según la gráfica de la figura 5.25.

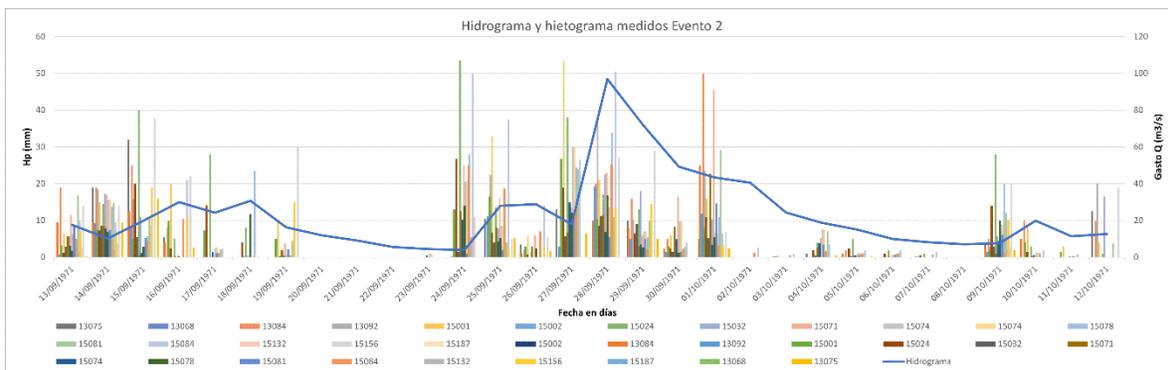


Figura 5.23 Hietograma e hidrograma medidos, evento 2

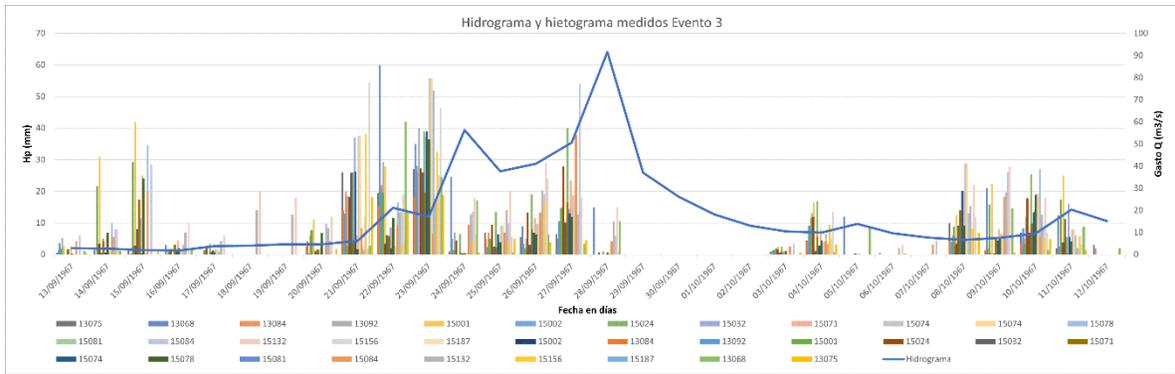


Figura 5.24 Hietograma e hidrograma medidos, evento 3

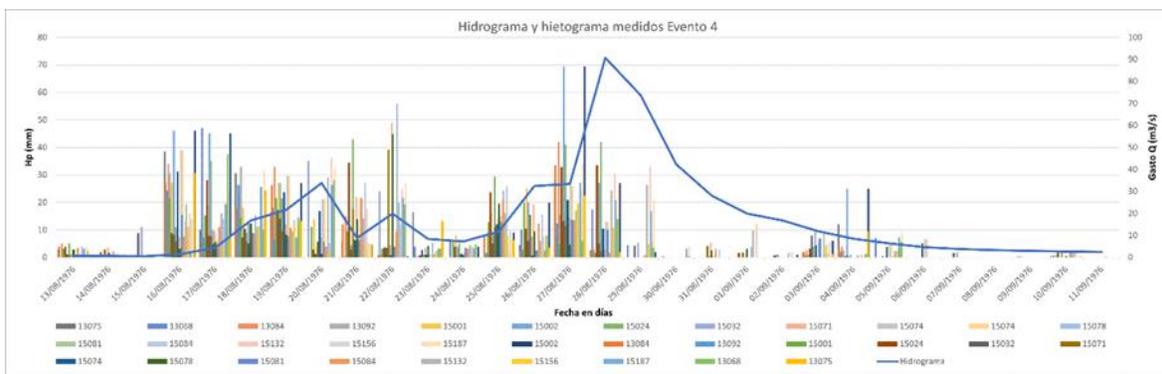


Figura 5.25 Hietograma e hidrograma medidos, evento 4

5.6.2 Calibración del modelo

Para emplear el MPE en la estimación de las avenidas de diseño es necesario calibrarlo a partir de los eventos históricos más adversos registrados en las estaciones hidrométricas. Esto se lleva a cabo ingresando los datos de lluvias, la malla con características fisiográficas y el hidrograma observado que se seleccionó previamente para cada una de las cuencas en estudio.

Para comenzar, se ingresaron las fechas de inicio y fin de la tormenta de calibración. Como se mencionó con anterioridad el periodo de modelación para emplear en la calibración es de 30 días; 15 días antes, el día del gasto pico y 14 días después de la ocurrencia del gasto máximo (figura 5.26).

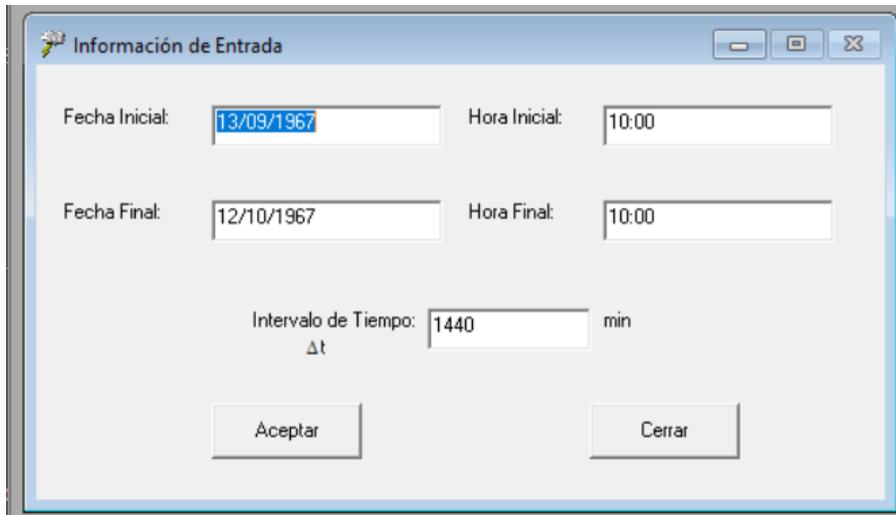


Figura 5.26 Datos de entrada, calibración cuenca río Tlautla

Una vez establecida la fecha de análisis, así como el intervalo de tiempo en el que se contemplan los cálculos (para este caso 1 día, 1440 minutos) se ingresa el archivo que contiene a la cuenca discretizada en forma de una malla de celdas para las cuales se ha determinado su ubicación (X y Y, UTM zona 14), la longitud de cauce así como el área y el número de curva promedio de cada celda, todo esto contenido en un archivo de texto con 5 columnas delimitadas por tabulación (figura 5.27).

Shg_x	Shg_y	Mod_Area	FlowLength	NC
435	2208	0.074	42.15	81
435	2209	0.253	42.3	81
436	2206	0.268	40.67	81
436	2207	0.587	40.89	81
436	2208	0.887	41.35	81
436	2209	0.266	41.61	81
437	2205	0.415	40.25	78
437	2206	0.899	39.75	78
437	2207	1	39.83	81
437	2208	0.802	40.24	81
437	2209	0.14	41.09	81
438	2200	0.051	41.33	91
438	2201	0.632	39.61	96
438	2202	0.548	39.25	91
438	2203	0.361	39.74	91
438	2204	0.426	39.38	86
438	2205	0.994	39.55	71
438	2206	1	38.37	71
438	2207	1	38.51	80
438	2208	0.39	38.63	80

Figura 5.27 Archivo de texto con características fisiográficas, cuenca río Tlautla

De la misma forma se debe ingresar el archivo de texto que contiene las lluvias generadas en cada una de las estaciones climatológicas de la región, dentro del periodo de tiempo considerado en el análisis (30 días). Dentro de este archivo de texto se deben tener las coordenadas (X y Y, UTM zona 14) de la ubicación de cada estación en las primeras dos columnas, seguidas de los registros puntuales de precipitación en 24 horas en cada uno de los días considerados en el análisis (figura 5.28).

Longitud	Latitud	T_10:00																		
470320.6988	2204000	1.5	1.5	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
465245.4746	2210000	0.5	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5
467361.4213	2208000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
463575.3964	2218000	5.3	0	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5
411494.7426	2207000	2.7	31	42	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
441901.6551	2199000	0	5	4	2.5	3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
477750.1763	2195000	0	0.7	11.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5
428099.7015	2187000	2.5	6	25	4.5	1.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.3
468383.6437	2178000	0	1	0.6	1.4	1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
417181.625	2192000	0.5	10	34.5	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.7
423053.0165	2198000	6	8	28.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.5
451097.0596	2180000	0	8	0	10	6	20	18	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
470592.9396	2193000	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
427816.8493	2218000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 5.28 Archivo de Texto con registro de lluvias

Al ingresar el archivo que contiene las lluvias se activa la ventana que permite visualizar el hietograma de precipitación media para el periodo determinado. En la misma ventana en donde aparecen los datos tabulados también se muestra el área de la cuenca en estudio con la cual se puede corroborar que el archivo de características fisiográficas se ha leído correctamente al compararla con el área obtenida previamente (figura 5.29).

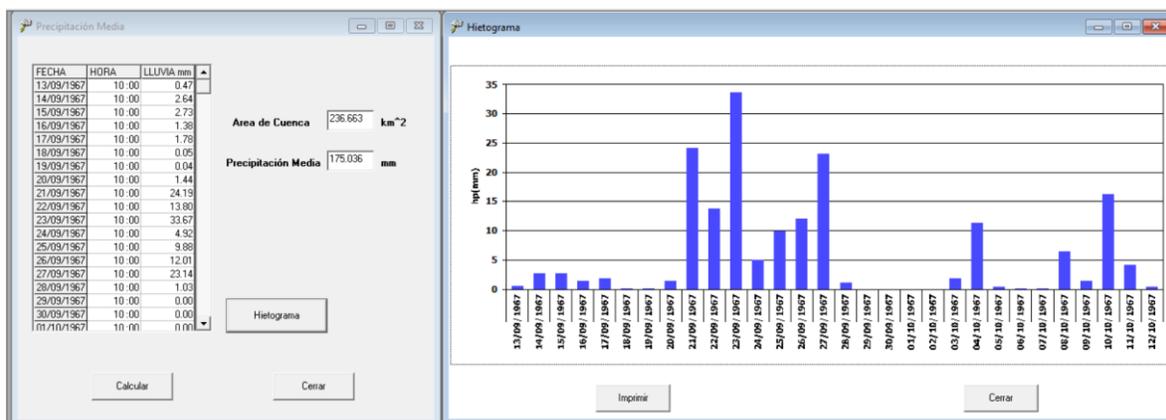


Figura 5.29 Hietograma de precipitación media de la cuenca del río Tlautla

Finalmente, para comenzar con la calibración del modelo se requiere ingresar de igual forma en un archivo de texto el hidrograma medido en la estación hidrométrica instalada en la salida de la cuenca. El archivo debe contener 4 columnas en las que se registran la hora de observación, el Gasto total, el gasto directo y el gasto base de la cuenca en estudio. En este caso no se cuenta con un gasto base determinado por lo que el gasto total corresponde a los valores observados en la estación hidrométrica (figura 5.30).

Hora	Qtotal	Qdirecto	Qbase
10:00	2.929	0	0
10:00	2.688	0	0
10:00	2.056	0	0
10:00	1.864	0	0
10:00	3.809	0	0
10:00	4.014	0	0
10:00	4.612	0	0
10:00	4.636	0	0
10:00	6.146	0	0
10:00	21.122	0	0
10:00	17.103	0	0
10:00	56.319	0	0
10:00	37.602	0	0
10:00	41.062	0	0
10:00	50.569	0	0
10:00	91.554	0	0

Figura 5.30 Archivo de texto con hidrograma observado

Una vez que se han ingresado los archivos necesarios, se puede comenzar con el cálculo del hidrograma para realizar la comparación de los valores observados y los valores medidos. En primera instancia, el programa da como resultados el hidrograma de precipitación en donde se muestran los valores de precipitación en exceso, así como las pérdidas que se han determinado en función de las características fisiográficas de la cuenca. En la parte inferior se grafican tanto el hidrograma medido considerado para la calibración, así como el hidrograma calculado por el programa (figura 5.31). Esto es muy útil ya que la calibración del modelo consiste en replicar las condiciones de lluvia del evento observado y obtener cómo resultado un hidrograma calculado similar al observado, en función de la forma, gasto máximo y volumen precipitado.

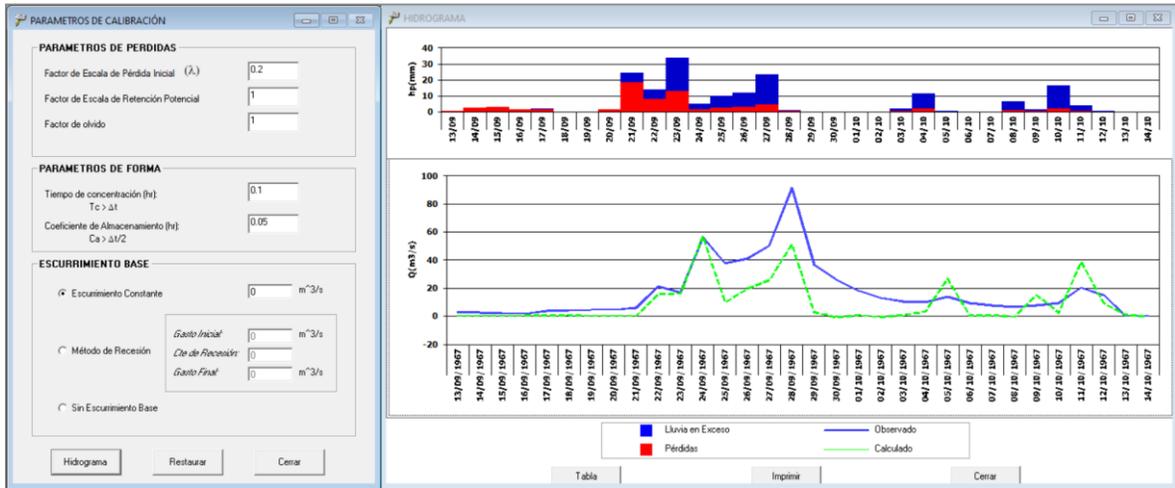


Figura 5.31 Hidrograma de resultados, primera corrida de calibración

Para cumplir con este objetivo, es necesario modificar los valores de los parámetros de pérdidas y de los parámetros de forma en función de los resultados obtenidos a partir de los valores por defecto que vienen incluidos en el programa. Cada uno de estos valores modifica de cierta manera el comportamiento de los escurrimientos, así como de los valores de la infiltración del suelo, lo que provoca un aumento o disminución del escurrimiento. Los resultados de los valores observados y los calculados también se muestran en una ventana en la que se indican los volúmenes de lluvia precipitados, así como el gasto máximo observado, entre otros parámetros de lluvias. Estos valores se muestran en la tabla resumen de la figura 5.32.

Observaciones:
(sin comas)

Lluvia

Area de cuenca	236.663	km ²
Lluvia media	175.036	mm
Pérdidas	66.736	mm
Lluvia en Exceso	108.299	mm

Volumen Escurrido

	Observado	Calculado	
Total	47791.728	25630.468	Mm3
Directo	47791.728	25630.468	Mm3
Base	0.000	0.000	Mm3

	Observado	Calculado	
Qmáximo	91.554	56.857	m3/s

Figura 5.32 Tabla resumen de resultados

Como se puede observar, los resultados calculados difieren en gran medida en cuanto a volúmenes escurridos y gastos con respecto a los valores observados, además de que la forma del hidrograma también presenta diferencias marcadas por lo que fue necesaria la calibración de los parámetros de pérdidas y de forma para lograr igualar los valores observados y que el modelo tenga validez para los casos de las lluvias de diseño.

5.6.3 Parámetros de calibración

Río Rosas

Para el río Rosas se tiene que la forma del hidrograma calculado en la calibración con el evento seleccionado coincide de cierta forma con el hidrograma observado, por lo que se buscó modificar la forma a partir del coeficiente de almacenamiento. Los parámetros finales de calibración se muestran a continuación en la figura 5.33 junto con la gráfica que muestra la forma obtenida a partir del ajuste de estos parámetros.

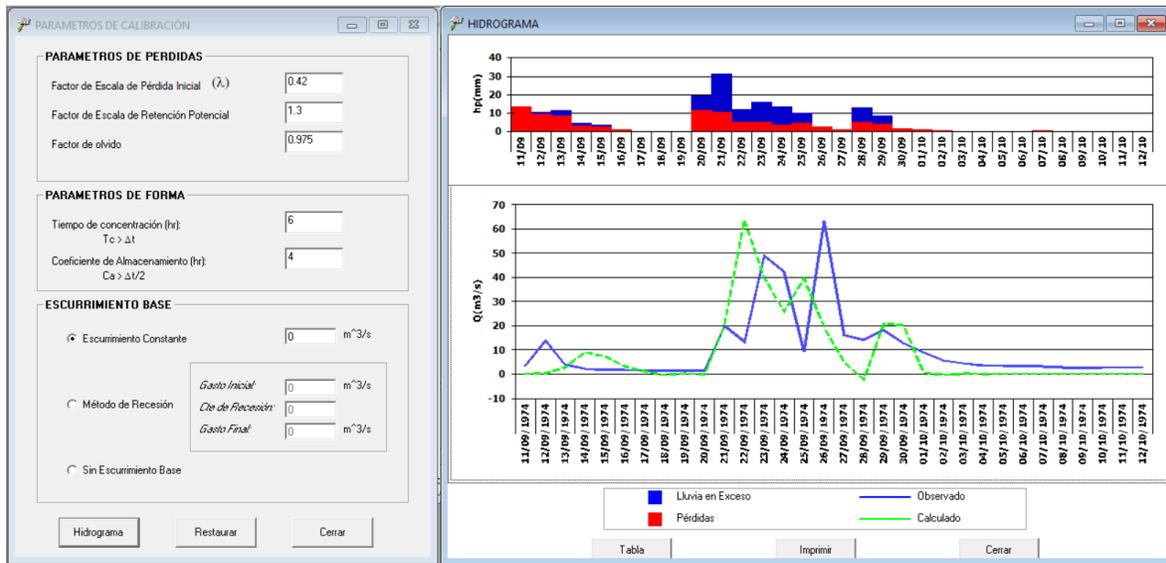


Figura 5.33 Resultados de la calibración, cuenca del río Rosas.

Además de esto, se muestra también la tabla resumen que indica un acercamiento considerado como suficiente para validar el modelo con los parámetros ajustados y de esta forma el modelo se empleó para obtener las avenidas para los eventos de diseño estimados previamente.

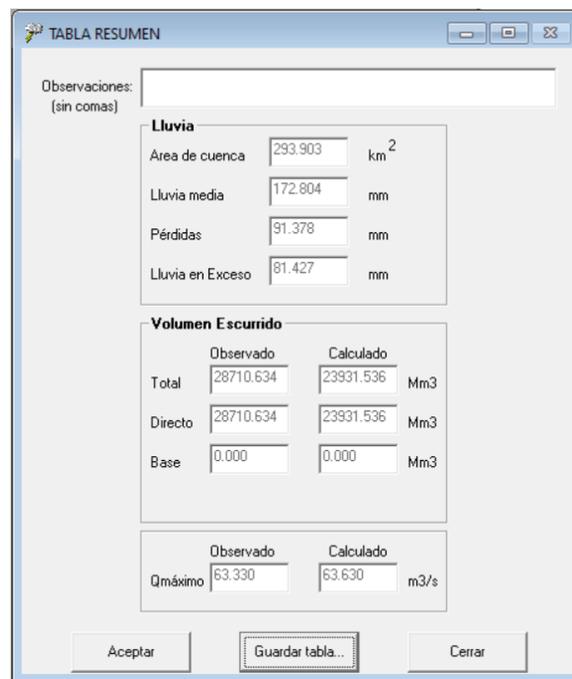


Figura 5.34 Resultados de la calibración volúmenes escurridos, cuenca del río Rosas.

A partir de esto se consideró que el modelo del río Rosas se encontraba calibrado y listo para ser usado en la estimación de los eventos de diseño que se han planteado.

Río Tlautla

En el caso del río Tlautla, se destaca el hecho de que el hidrograma calculado presenta un comportamiento suficientemente similar en comparación con el caudal observado, lo cual da un indicio de que la calibración se ha llevado a cabo de manera correcta. A pesar de que no se llegaron a los valores observados, se tomaron los parámetros obtenidos como válidos para estimar las avenidas de diseño. Se presentan los resultados obtenidos en la calibración en las figuras 5.35 y 5.36.

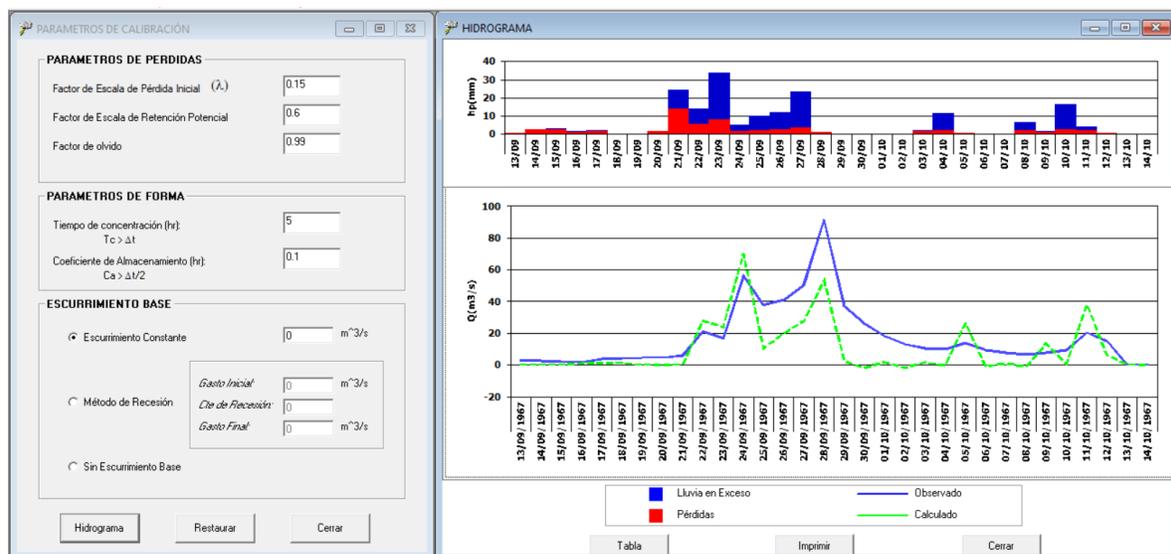


Figura 5.35 Resultados de la calibración, cuenca del río Tlautla.

Se puede apreciar en la figura 5.34 que la forma del hidrograma calculado es relativamente similar a la del evento observado puesto que se presentan dos “picos” en tiempos relativamente cercanos, aunque el segundo difiere en magnitud considerablemente. Nótese también la forma que toma en el tramo final en el que también se presenta un incremento del gasto en tiempos relativamente iguales. Esto es un fundamento suficiente que justifica que la calibración se haya aceptado como suficiente a pesar de diferir en magnitudes calculadas ya que se ha logrado replicar, en cierto grado, la respuesta de la cuenca en bajo condiciones de tormenta.

TABLA RESUMEN

Observaciones:
(sin comas)

Lluvia

Área de cuenca	236.663	km ²
Lluvia media	175.036	mm
Pérdidas	56.908	mm
Lluvia en Exceso	118.128	mm

Volumen Escurrecido

	Observado	Calculado	
Total	47791.728	27956.447	Mm3
Directo	47791.728	27956.447	Mm3
Base	0.000	0.000	Mm3

	Observado	Calculado	
Qmáximo	91.554	70.231	m3/s

Aceptar Guardar tabla... Cerrar

Figura 5.36 Resultados de la calibración volúmenes escurridos, cuenca del río Tlautla.

5.7 Avenidas de diseño

Una vez que los modelos creados en el MPE fueron calibrados con sus respectivos factores de pérdidas y de forma establecidos para cada cuenca en estudio, se ingresó la información de las lluvias de diseño en 24 horas generados previamente para diferentes periodos de retorno. En particular se tomaron 3 periodos de retorno 50, 100 y 500 años para generar las avenidas de diseño con una duración de la lluvia de 24 horas y un periodo de cálculo Δt de 10 minutos. Para obtener las avenidas de diseño se actualizaron los archivos de lluvias para cada periodo de retorno y se generó un modelo por cada uno, siempre considerando las mismas características fisiográficas de las cuencas, así como los parámetros de calibración obtenidos previamente.

A continuación, se muestran los resultados de la modelación obtenidos para los periodos de retorno considerados para el caso del río Tlautla (figuras 5.37 a 5.39) y del río Rosas (figura 5.41 a 5.43). Se muestran las tablas y gráficas originales que genera el programa MPE en cada caso.

5.7.1 Río Tlautla

Tr 50 años

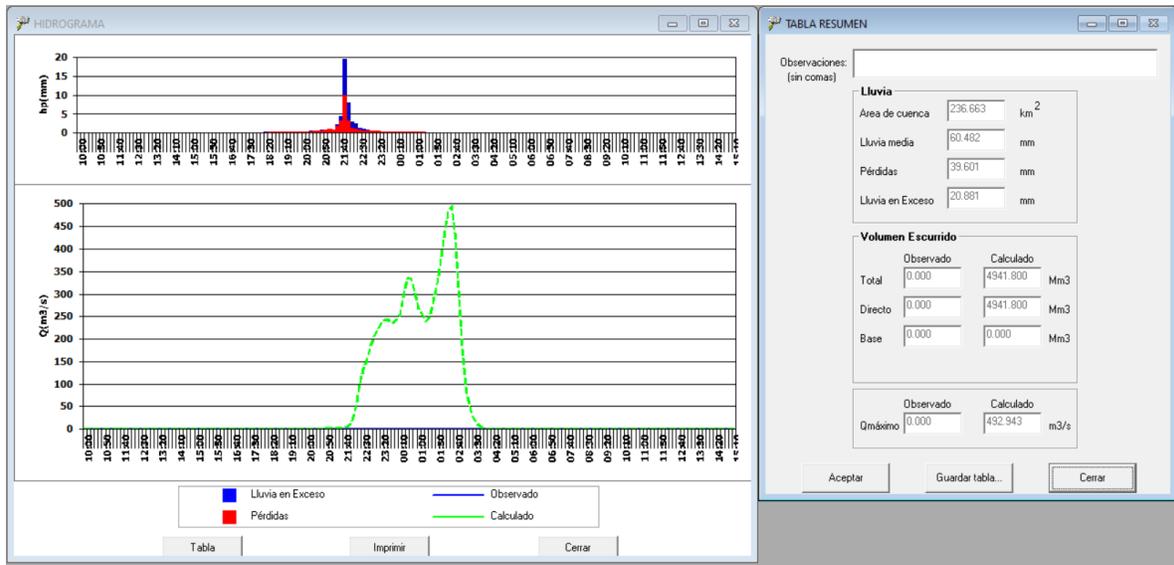


Figura 5.37 Hidrograma de diseño Tr 50 años, cuenca del río Tlautla.

Tr 100 años

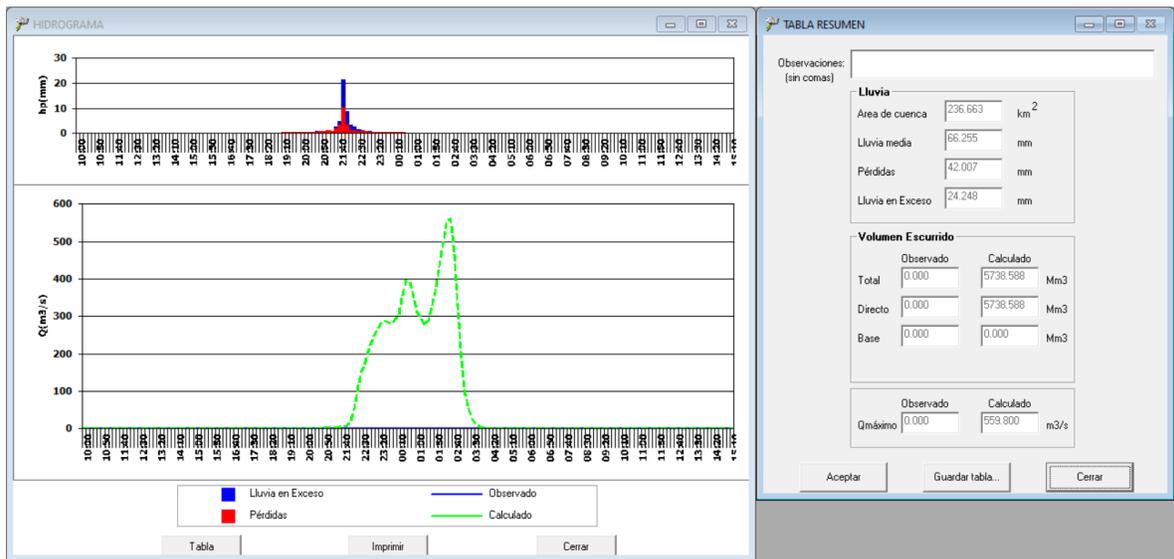


Figura 5.38 Hidrograma de diseño Tr 100 años, cuenca del río Tlautla.

Tr 500 años

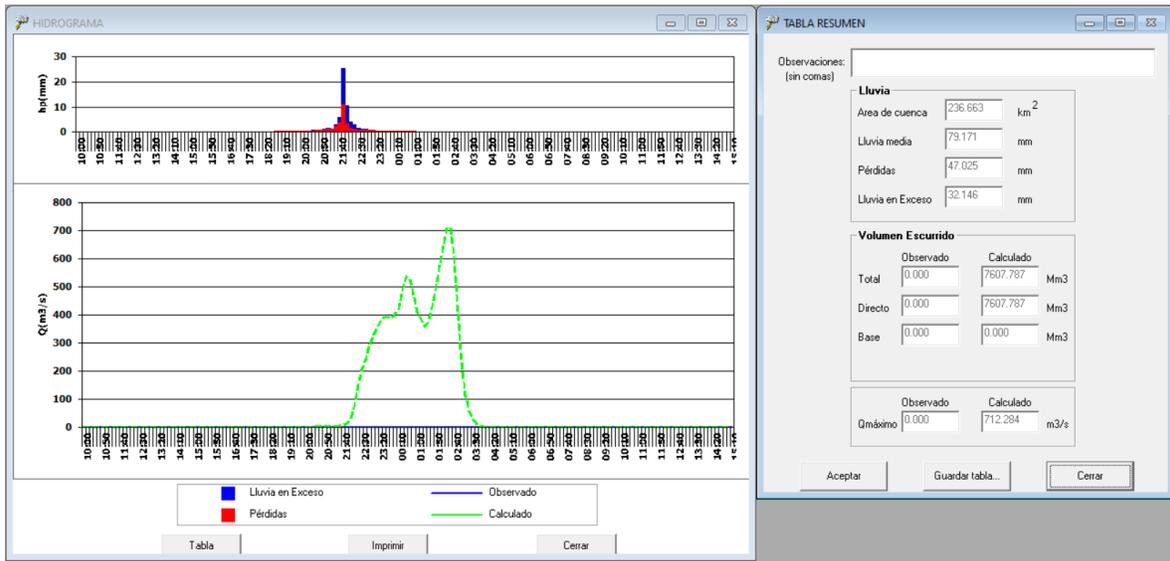


Figura 5.39 Hidrograma de diseño Tr 500 años, cuenca del río Tlautla.

A partir de estos resultados para cada periodo de retorno, se generó la siguiente gráfica en la que se comparan las formas y magnitudes en los hidrogramas. De esta manera se puede apreciar de mejor forma la variación de caudales calculados en el modelo MPE.

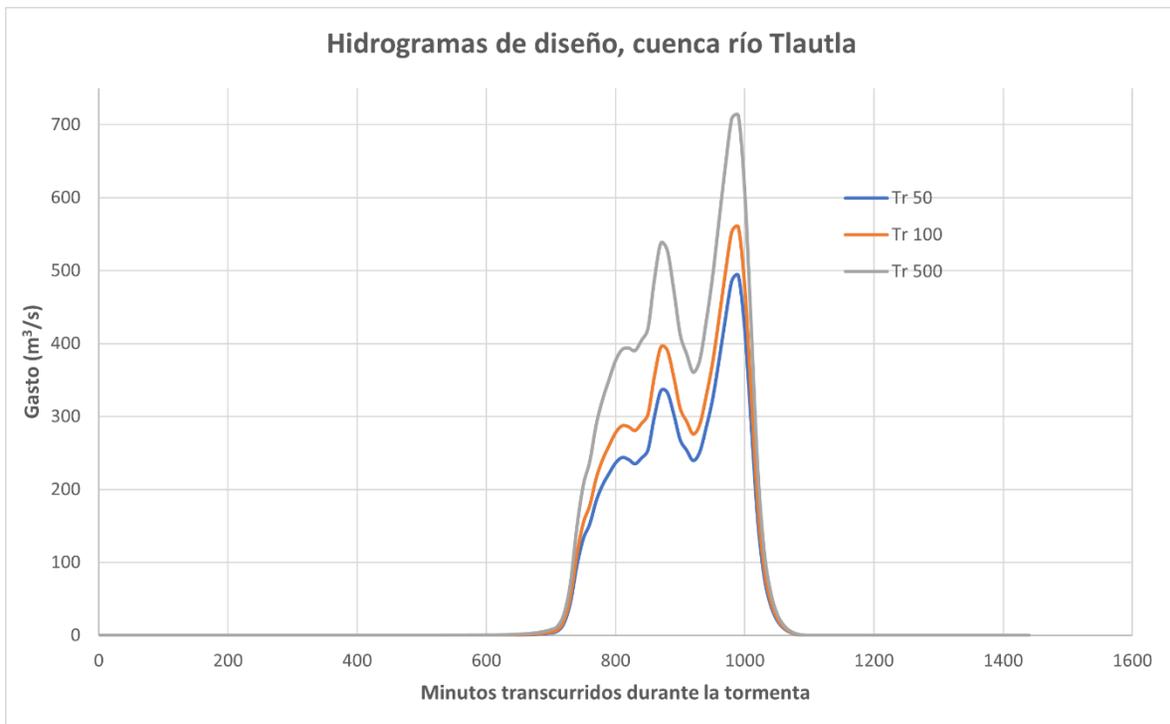


Figura 5.40 Hidrogramas de diseño, cuenca río Tlautla

5.7.2 Río Rosas

Tr 50 años

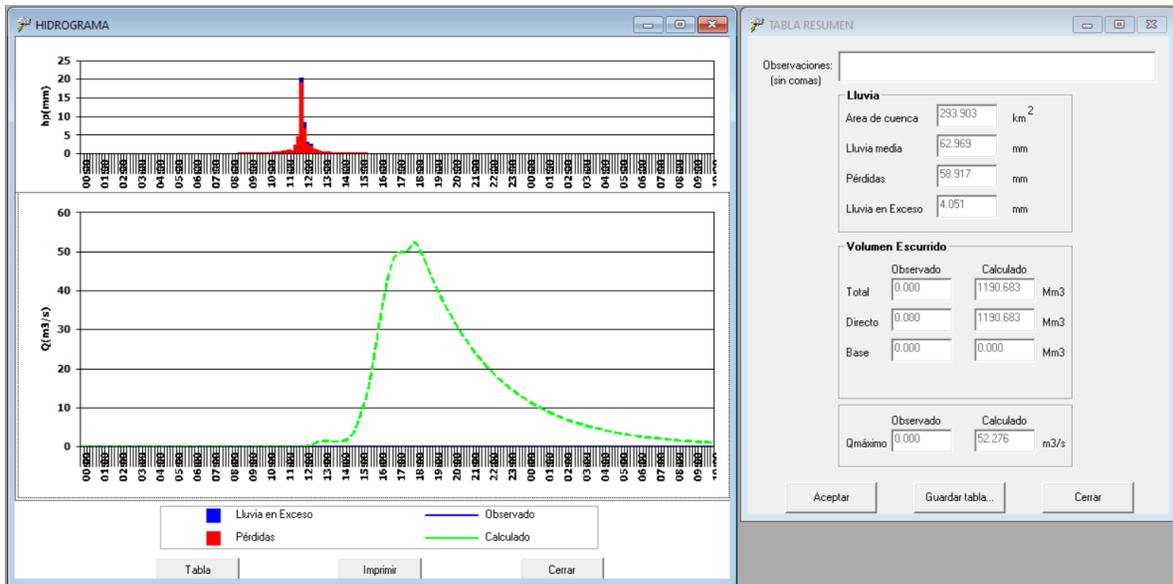


Figura 5.41 Hidrograma de diseño Tr 50 años, cuenca del río Rosas.

Tr 100 años

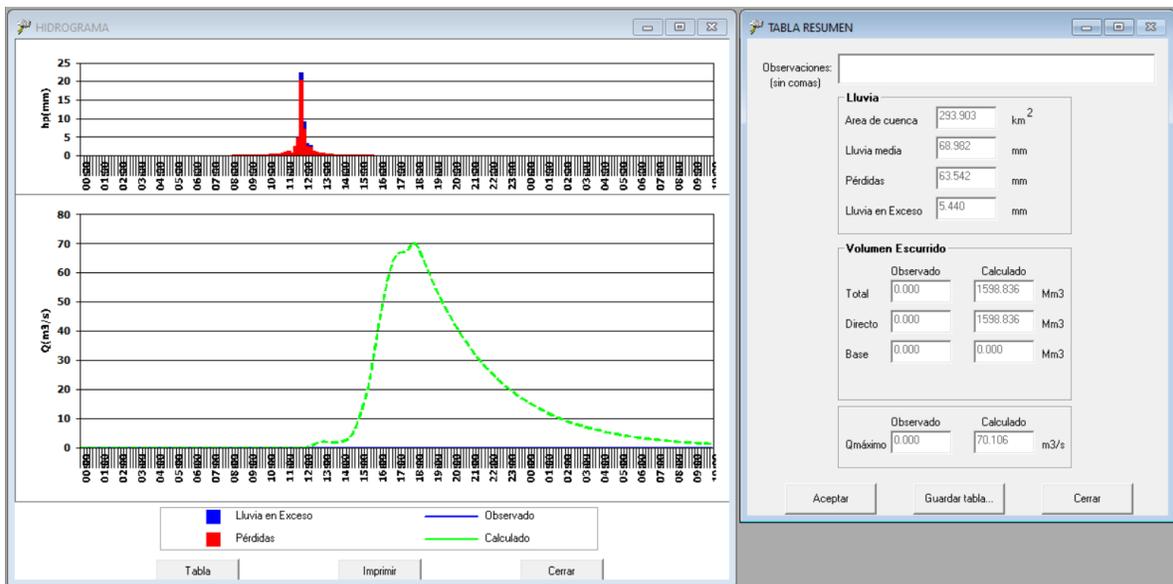


Figura 5.42 Hidrograma de diseño Tr 100 años, cuenca del río Rosas.

Tr 500 años

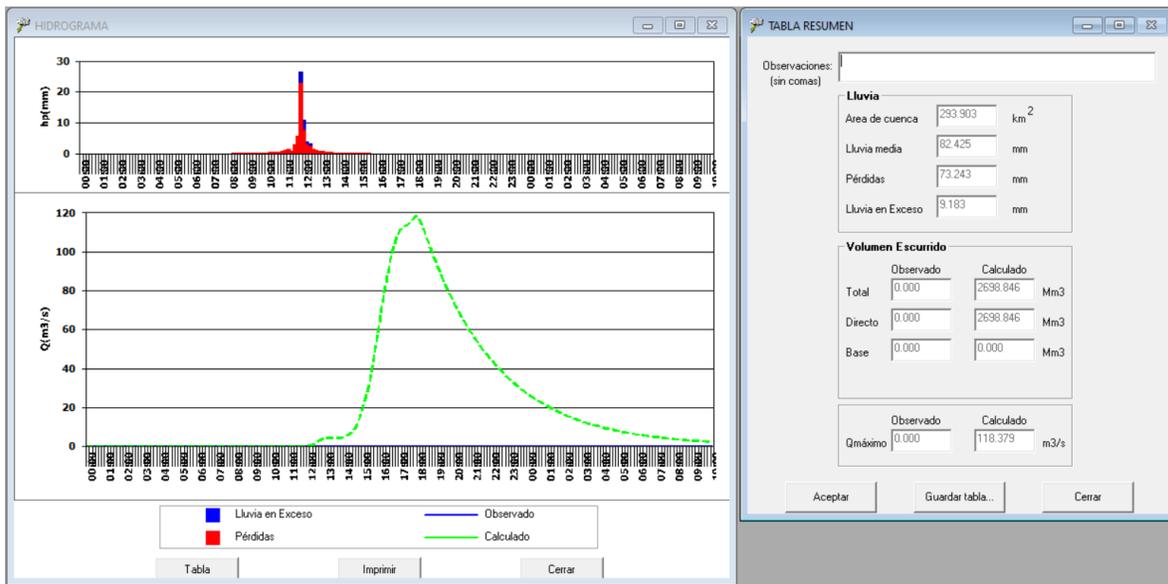


Figura 5.43 Hidrograma de diseño Tr 100 años, cuenca del río Rosas.

Para tener una comparación visual de las magnitudes del gasto máximo generado por los diferentes periodos de retorno se generó la siguiente gráfica en la que se observa que la forma de los hidrogramas de diseño es prácticamente la misma con la diferencia en que el hidrograma toma una forma alargada conforme crece el periodo de retorno.

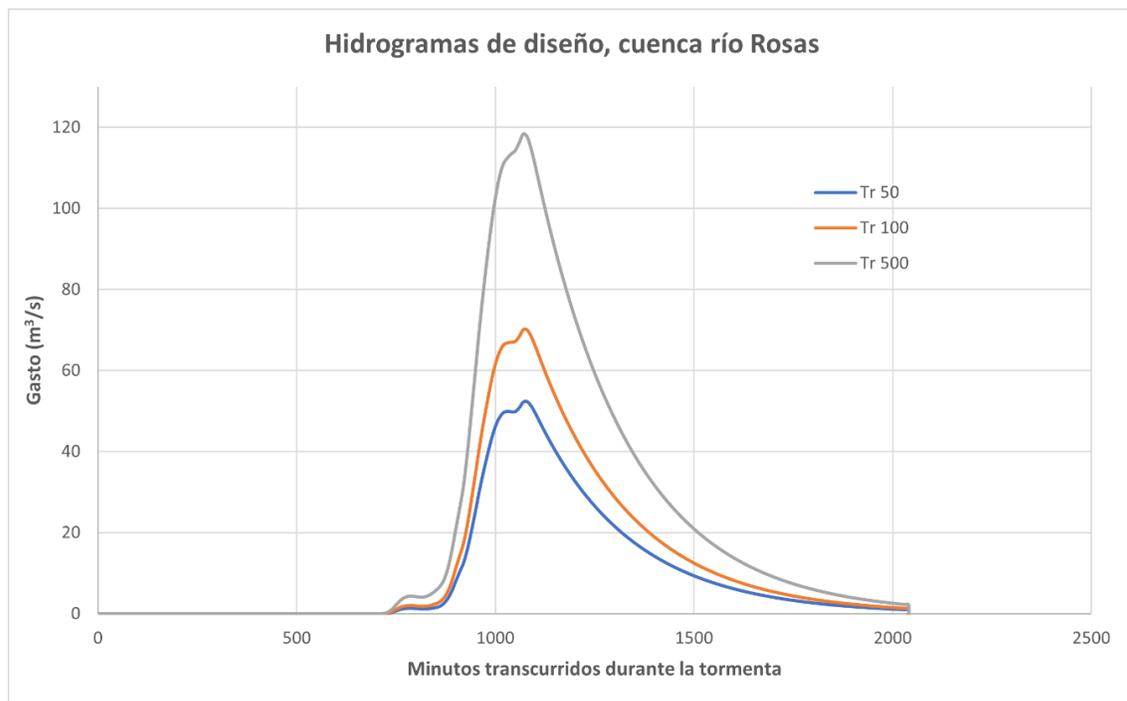


Figura 5.44 Hidrogramas de diseño, cuenca río Rosas

5.4 Análisis de resultados

A partir de los resultados con el MPE para ambas cuencas en estudio se generaron las siguientes tablas resumen que permiten hacer una comparativa de los resultados obtenidos en la estimación.

Tabla 5.15 Resumen de resultados obtenidos, cuenca río Rosas

RESULTADOS - TABLA RESUMEN CUENCA RÍO ROSAS						
Tr (Años)	Lluvia media (mm)	Pérdidas (mm)	Lluvia en exceso (mm)	Coefficiente de escurrimiento	Volúmen total escurrido (Mm ³)	Q _{máx} (m ³ /s)
50	62.97	58.92	4.05	0.064	1190.683	52.276
100	68.98	63.54	5.44	0.079	1598.836	70.106
500	82.43	73.24	9.18	0.111	2698.846	118.379

Tabla 5.16 Resumen de resultados obtenidos, cuenca río Tlautla

RESULTADOS - TABLA RESUMEN CUENCA RÍO TLAUTLA						
Tr (Años)	Lluvia media (mm)	Pérdidas (mm)	Lluvia en exceso (mm)	Coefficiente de escurrimiento	Volúmen total escurrido (Mm ³)	Q _{máx} (m ³ /s)
50	60.48	39.60	20.88	0.345	4941.800	492.94
100	66.26	42.01	24.25	0.366	5738.588	559.80
500	79.17	47.03	32.15	0.406	7607.787	712.28

Se observan diferencias notables en las magnitudes de los escurrimientos debido a que las pérdidas por infiltración son significativamente mayores en la cuenca del Río Rosas ya que gran parte del área de la cuenca se encuentra en terreno permeable y en la parte final del escurrimiento es en donde se presentan zonas urbanas, lo cual favorece la conformación del caudal.

Teniendo en cuenta que el coeficiente de escurrimiento es el cociente de la cantidad de agua que escurre entre la cantidad de agua total precipitada, así como la definición de periodo de retorno del capítulo 2.9 se aprecia una relación directa entre el periodo de retorno y el valor del coeficiente de escurrimiento ya que los eventos asociados a periodos de retorno grandes provocan que el suelo se sature rápidamente debido a la cantidad de agua precipitada y por tanto la capacidad de infiltración del suelo sea menor, teniendo coeficientes de escurrimiento mayores al generarse caudales de una magnitud mayor.

5.4.1 Recomendaciones

Los resultados de este trabajo indican que los periodos de retorno asociados a los eventos que se usaron para calibrar los modelos no son tan grandes como se pensaría, por lo que se deben tomar medidas inmediatas para prever este tipo de eventos considerando que podrían presentarse relativamente pronto. Además de que se debe considerar que las condiciones hidrometeorológicas de los últimos años han sido muy impredecibles en todo el país y se pueden presentar combinaciones de eventos en Hidalgo, Estado de México y la Ciudad de México todavía más desfavorables que las de los últimos años.

Por ello, se han propuesto una serie de recomendaciones de manera general para solventar el problema de las inundaciones que cada año se presentan en la ciudad de Tula de Allende y la zona del Valle del Mezquital.

1. **Sistemas de alerta temprana.** Establecer un sistema de alerta temprana que monitoree continuamente los niveles del río y las condiciones climáticas para anticipar y comunicar posibles inundaciones a la población y autoridades con suficiente tiempo para tomar medidas.
2. **Mejorar la infraestructura de drenaje.** Dar mantenimiento y expandir el sistema de drenaje pluvial y la infraestructura de control de inundaciones en la ciudad de Tula de Allende, incluyendo canales de desviación y sistemas de bombeo que sirvan para gestionar el exceso de caudales.
3. **Diques, bordos y muros de protección.** Construir diques y muros de protección en los puntos más vulnerables del río Tula y en donde históricamente se han presentado los desbordamientos más severos para contener los niveles del agua ante la presencia de grandes avenidas, como se muestra en la figura 5.45. Esto se puede hacer siempre y cuando se considere viable la situación después de analizar el comportamiento del río aguas abajo a fin de evitar trasladar el problema hacia esas zonas.
4. **Estudios e investigación.** Realizar estudios hidrológicos y topográficos detallados y actualizados para comprender mejor los patrones de inundaciones y así integrarlos con la información ya disponible a manera de mejorar las medidas de prevención y mitigación de inundaciones.
5. **Coordinación interinstitucional.** Establecer un lazo de colaboración institucional eficaz entre las autoridades locales, regionales y nacionales, así como con organizaciones no gubernamentales para abordar el problema de manera integral y proponer las soluciones específicas en cada zona de influencia.



Figura 5.45 Enrocado para protección de dique de terraplén reforzado

5 Conclusiones

En este trabajo se presentó un ejemplo del potencial daño que provocan las grandes avenidas que se presentan en los cauces naturales cuando ocurren las condiciones de lluvia más desfavorables. En este caso, la zona de conflicto ha pasado por varias de estas situaciones en las que los daños materiales e incluso la pérdida de vidas humanas han sido el resultado de la ocurrencia de estos eventos extraordinarios, por ello es que resulta necesario aplicar los métodos y técnicas que mejor describan la situación en la que se encuentra dicha zona de conflicto así como en las zonas de influencia, esto con el fin de prever los escenarios más desfavorables y aplicar planes de acción para la prevención y mitigación de los daños.

En este sentido, la aplicación de una regionalización de lluvias con validez en las cuencas de mayor influencia ha sido una de las alternativas por las que se ha optado debido a que la aplicación de estas técnicas de estimación permite realizar un análisis más apegado a la realidad al considerar aspectos como la ubicación espacial, la cantidad de datos observados disponibles y las propiedades estadísticas de estos. Como resultado de la regionalización aplicada en la zona de estudio se encontró que, de 22 estaciones climatológicas consideradas, sólo 16 de estas presentaron un comportamiento estadístico similar suficiente para conformar la región homogénea. Estos resultados fueron producto de la aplicación de dos técnicas para conformar regiones homogéneas las cuales se basan principalmente en las propiedades estadísticas de las series dejando de lado la ubicación espacial de éstas.

A partir de esto se muestra la importancia de usar estas técnicas de manera complementaria ya que al combinar y empatar resultados se obtienen regiones mejor delimitadas al considerar varias de las propiedades de las series de datos que se analizan y por ende conformar el grupo de estaciones de una manera más precisa y sustentada.

El análisis regional de lluvias, considerando los registros de precipitación de las estaciones que conforman la región homogénea, se llevó a cabo empleando la técnica de estaciones año dando como resultado factores regionales con valores muy similares comparados con los resultados obtenidos del estudio de regionalización para todo el país elaborado por parte del CENAPRED. En particular, los valores obtenidos en este trabajo coinciden en gran medida con los factores obtenidos para la región del estado de México, lo cual tiene mucho sentido ya que de las 16 estaciones que conforman la región, 12 de ellas se ubican dentro del territorio del estado de México. Por ello es por lo que la influencia de esta entidad se vio reflejada en los resultados al obtener factores de valores similares a los obtenidos anteriormente.

Durante el proceso de la obtención de las avenidas de diseño, se tuvo que hacer uso de herramientas un tanto avanzadas, con respecto a las empleadas en estudios previos, que permitieron realizar la discretización de las cuencas de una manera más detallada pero también de una forma práctica debido a que se combinaron herramientas de sistemas de información geográfica con herramientas especializadas en modelación hidrológica lo cual resalta el hecho de que actualmente ya se pueden hacer estimaciones precisas de los eventos de diseño si se hace uso de las herramientas más actuales disponibles en el mercado, como lo son los SIG y los modelos de parámetros distribuidos los cuales, empleados en combinación, permiten obtener modelos hidrológicos más apegados con la realidad y por tanto estimaciones con menor grado de incertidumbre.

De esta forma, se logró cumplir con el objetivo establecido al inicio del presente trabajo así como los objetivos secundarios ya que se obtuvieron las estimaciones de los eventos de diseño para ambas cuencas en estudio a partir de una serie secuencial de pasos que a su vez son también objetivos específicos que se deben cumplir para llegar al resultado final y de esta forma realizar una interpretación de los resultados para proporcionar las recomendaciones adecuadas que permitan dar una solución al problema de las inundaciones que se ha planteado en la parte introductoria.

Es importante reconocer la labor de todas la entidades e instituciones que han hecho un esfuerzo por generar herramientas que permitan a los especialistas realizar estudios, diseños y proyectos mejor sustentados en los principios físicos aplicables y con un grado de seguridad mayor. Todo esto es sumamente importante para el desarrollo del país y de la sociedad en general, ya que la prevención de los potenciales desastres que se pueden generar a partir de la ocurrencia de eventos extremos, como lo ha sido el caso del río Tula que año con año sigue generando severas inundaciones, debe ser un tema prioritario para los gobiernos y que debe ponerse especial atención a la brevedad.

Bibliografía

- Aparicio Mijares, F. J. (2012). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa Noriega Editores.
- Baeza Ramírez, C. (2007). *Estimación regional de factores de conectividad para el calculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia*. Ciudad de México.
- Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Chen, C.-l. (December de 1983). Rainfall Intensity-Duration-Frecuency Formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGraw Hill Interamericana.
- Domínguez Mora, R., Carrizosa Elizondo, E., Arganis Juárez, M. L., Hincapié López, C., Santana Soto, A. O., Ponce Soria, M., . . . Osnaya Romero, J. (2017). *Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuecnas de la republica mexicana*. Ciudad de México: CENAPRED.
- Domínguez Mora, R., Carrizosa Elizondo, E., Fuentes, G. E., Arganis Juárez, M. L., Osnaya, J., & Galván-Torres, A. (2018). Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la republica mexicana. *Técnoología y ciencias del agua*, 5-29.
- Domínguez Mora, R., Esquivel Garduño, G., Méndez Antonio, B., Mendoza Reséndiz, A., Arganis Juárez, M. L., & Carrizosa Elizondo, E. (2008). *Manual del modelo para pronóstico de escurrimiento*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Escalante Sandoval, C. A., & Reyes Chavez, L. (2002). *Técnicas estadísticas en hidrología*. Ciudad de México: UNAM Facultad de Ingeniería.
- IMTA, I. M. (2023). *Visor de números de escurrimiento*. Obtenido de <http://hidrosuperf.imta.mx/VNE/>

- Labrada Montalvo, P. (2018). *Análisis regional para lluvias de diseño con duraciones menores a un día*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ocampo, G. d. (2015). *Programa municipal de desarrollo urbano y ordenamiento territorial*. Gobierno del estado de Hidalgo.
- Ortiz, I., Cervantes, E., Ramírez, S., & Soto, D. (7 de Septiembre de 2022). *Corriente Alterna*. Obtenido de <https://corrientealterna.unam.mx/territorios/a-un-ano-de-la-inundacion-en-tula-las-damnificadas-enfrentan-danos-emocionales-y-falta-de-apoyo/>
- Sánchez Martínez, S. A. (2017). *Actualización de los factores de reducción por área para distintas regiones de la republica mexicana*. Ciudad de México.
- Secretaría de Medio Ambiente y recursos naturales. (1994). *Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad Regional del Proyecto Presa Yathé*. Hidalgo: Gobierno de México.
- SEMARNAT. (2007). *El Túnel Emisor Oriente duplicará la capacidad del drenaje profundo del Valle de México*. Ciudad de México.