



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO EN CUENCAS CON INFORMACIÓN
ESCASA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA
P R E S E N T A :

Claudia E. López Fuentes

TUTOR:

Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval



9 de Febrero de 2011

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ramón Domínguez Mora
Secretario: M.I. Víctor Franco
Vocal: Dr. Carlos A. Escalante Sandoval
1^{er.} Suplente: Dr. Lilia Reyes Chávez
2^{do.} Suplente: Dr. Óscar A. Fuentes Mariles

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Carlos Agustín Escalante Sandoval

NOMBRE DEL DIRECTOR DE TESIS

Agradecimientos

Quiero agradecer al Dr. Carlos Escalante por su apoyo y paciencia, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo y en el aula.

Al M. en I. Víctor Franco por todo su apoyo y ayuda, así como su amistad y confianza en mí, gracias a él me inició el gusto por el área de hidráulica. Le agradezco por haberme invitado a formar parte del grupo privilegiado de sus becarios de Instituto de Ingeniería, UNAM.

Al Dr. Ramón Domínguez por el apoyo y tiempo brindado durante la realización de este trabajo.

A la M. en I Alejandro Maya, por todo su apoyo durante los cursos de maestría, así como por la convivencia durante la misma.

A todos mis profesores, amigos y compañeros; así mismo quiero hacer un agradecimiento al Instituto de Ingeniería por brindarme el apoyo durante mis estudios de licenciatura y de maestría, por todas las enseñanzas y facilidades para la realización de esta tesis.

Al. Dr. J. Fernando González Villarreal por permitirme formar parte de su equipo de trabajo y enseñarme que el trabajo es disciplina.

Dedicatorias

Dedico este trabajo a...

A mis padres Juan José López G y Virginia Fuentes A.; a mis hermanas Karla Ivonne y Michelle, gracias por su apoyo y cariño. Quiero dedicarle este trabajo porque me impulsaron a continuar y terminar mis metas.

A Alejandro Maya, porque formar parte de mi vida y por ayudarme a continuar con objetivos hacia adelante, por su amistad, cariño y su tiempo.

A toda mi familia. Quiero dedicarles este trabajo porque han sido como unos padres para mí, me han cuidado desde la cuna y tienen todo mi respeto y admiración.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería y Maestría (Norberto, Homero Contreras, Israel, Felipe y Javier) y amigos de licenciatura (Darío, Valeria, Jorge, Mauricio y Rodrigo. Les dedico este trabajo por la amistad y grandes momentos compartidos.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Necesidad de un Estudio Hidrológico en zonas de escasa información	2
1.1.1	Necesidades	2
1.1.2	Objetivo	2
2	ANTECEDENTES	3
2.1	Obtención de la información	3
2.1.1	Selección de las estaciones climatológicas e hidrométricas con influencia en la zona de estudio	3
2.1.2	Obtención de las características fisiográficas de la cuenca en estudio	4
2.1.2.1	Área de la cuenca	4
2.1.2.2	Forma de la cuenca	4
2.1.2.3	Pendiente de la cuenca	5
2.1.2.4	Elevación media de la cuenca	6
2.1.2.5	Red de drenaje	6
2.1.2.6	Geología	7
2.1.2.7	Cauce principal	7
2.1.2.8	Uso de sistemas de información geográfica	7
2.1.3	Detección de obras existentes y futuras	8
2.2	Manejo de la información	8
2.2.1	Datos de Precipitación	8
2.2.1.1	Integración de series	8
2.2.1.2	Deducción de datos faltantes. Métodos de interpolación	9
2.2.1.3	Detección de puntos extraños	21
2.2.1.4	Pruebas de homogeneidad	21

2.2.1.5	Pruebas de independencia	23
2.2.1.6	Pruebas de bondad de ajuste	23
2.2.1.7	Corrección por intervalo fijo	24
2.2.1.8	Corrección por magnitud de cuenca	24
3	METODOLOGÍA	27
3.1	Teoría Distribucional	27
3.1.1	Análisis probabilístico	27
3.1.1.1	Análisis de frecuencias	28
3.1.1.2	Estadísticos básicos de las series de tiempo	28
3.1.2	Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad	30
3.1.2.1	Distribución Gumbel	30
3.1.2.2	Distribución Normal	30
3.1.2.3	Distribución Log – Normal- 2p	31
3.1.2.4	Distribución Log – Normal- 3p	31
3.1.2.5	Distribución Gamma- 2p	32
3.1.2.6	Distribución Gamma- 3p	32
3.1.2.7	Distribución General de Valores Extremos (GVE)	32
3.1.2.8	Distribución Generalizada Pareto	33
3.1.2.9	Distribución Uniforme	33
3.1.2.10	Distribución Exponencial con parámetro β	34
3.1.2.11	Distribución Exponencial con parámetro β y X_0	34
3.1.3	Extrapolación de Eventos	34
3.2	Construcción de curvas $h_p - d - T$	35
3.3	Construcción de curvas $I - d - T$	37
3.4	Precipitación media	39

3.4.1	Criterios para el cálculo de la precipitación media	40
3.5	Precipitación Efectiva	42
3.5.1	Número de escurrimiento, N	42
3.5.2	Coefficiente de escurrimiento, Ce	46
3.5.3	Índice de infiltración, Φ	48
3.6	Hietogramas de precipitación de diseño utilizando las relaciones I – d – T	48
3.6.1	Método del bloque alterno	48
3.7	Relación Lluvia – Escurrimiento	49
3.7.1	Hidrograma Unitario, HU	49
3.7.1.1	Tradicional	49
3.7.1.2	Instantáneo	50
3.7.1.3	Sintético	52
3.8	Comportamiento del flujo en la cuenca	55
3.8.1	Análisis del comportamiento de obras existentes en la cuenca	55
3.8.1.1	Transito de avenidas en la obra de excedencias	55
3.8.1.2	Funcionamiento de vaso	57
3.8.1.3	Generación Sintética de Escurrimientos Mensuales para un Funcionamiento de Vaso en una cuenca con información escasa	58
3.8.1.4	Cálculo de la evapotranspiración	66
4	CASO DE APLICACIÓN. CUENCA DEL RÍO SONORA	69
4.1	Selección de estaciones pluviométricas	73
4.2	Características fisiográficas y subdivisión en subcuencas	75
4.3	Registros de lluvia media diaria por subcuenca	76
4.3.1	Análisis de los registros	80
4.3.1.1	Pruebas de homogeneidad	80

4.3.1.2	Prueba de Independencia	84
4.4	Aplicación de la teoría distribucional	85
4.5	Construcción de las curvas $i - d - Tr$	96
4.5.1	Factor de reducción por duración	96
4.5.2	Factor de reducción por área (FRA)	100
4.6	Selección del criterio para estimar pérdidas	104
4.6.1	Precipitación efectiva (Pe)	106
4.6.1.1	Método de bloques alternos	106
4.7	Relación lluvia - escurrimiento	112
4.8	Comportamiento del sistema de obras existentes y futuras de la cuenca	118
4.8.1	Configuración 1. Condiciones actuales	118
4.8.2	Configuración 2. Construcción de la presa Puerta del Sol	122
4.8.3	Configuración 2. Construcción de la presa Las Chivas	126
4.8.4	Configuración 4. Construcción de las presas Puerta del Sol y Las Chivas	129
4.8.5	Selección de la configuración óptima	132
4.8.6	Funcionamiento de vaso	132
4.8.6.1	Cálculo de la Evapotranspiración	133
4.8.6.2	Generación sintética de la precipitación potencial	137
5	CONCLUSIONES	143
5.1	Conclusiones de los resultados	143
6	REFERENCIAS	145
	ANEXO I	
	ANEXO II	

1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo se propone una metodología para analizar la Hidrología de una cuenca que sólo cuenta con registros de altura de precipitación.

Los estudios hidrológicos implican recopilación de la mayor cantidad de información posible para simular las condiciones reales de la zona, y aún cuando es posible contar con la mayoría, la calidad de ésta no permite que pueda ser totalmente considerada para el análisis.

Un problema claro que se describe a continuación es la falta de información y la continuidad de ella, dado que se complica la toma de muestras en el mismo sitio durante un periodo de tiempo suficientemente largo y confiable. Cuando es necesario diseñar o revisar alguna obra, el inconveniente más común es definir una metodología que permita obtener los datos para diseñar; esto debido a la dificultad para la obtención de éstos y la urgencia.

Es sabido que los registros pluviográficos proporcionan información detallada de la distribución temporal de la lluvia; sin embargo, debido a la facilidad de operación es más común contar con registros de lluvias acumuladas (pluviométricos); y debido a las necesidades, esta información debe ser utilizada con el cuidado pertinente para tratar de obtener resultados confiables, es decir que representen los fenómenos naturales y que también predigan eventos a mediano y largo plazo.

1.1 Necesidad de un estudio hidrológico en zonas de escasa información

El mantenimiento y la continuidad de las estaciones climatológicas e hidrométricas son uno de los factores más importantes para que la información proveniente de ellas pueda sea de calidad. Nuestro país cuenta con un gran número de estaciones climatológicas con pluviómetros; no sucede lo mismo con pluviógrafos y estaciones hidrométricas, y éste es un problema que se ve con mayor frecuencia en la zona noroeste México. Sin embargo, este inconveniente no debe ser un impedimento para simular y optimizar el funcionamiento hidrológico de una zona determinada.

1.1.1 Necesidades

Generalmente, en las zonas en las que la información es escasa, el análisis de la información debe ser realizado partiendo de un objetivo específico; es decir, que el detalle con el que debe ser tratada la información dependerá de la importancia que tendrán los resultados; ya que el uso y aprovechamiento de los recursos debe ser óptimo para garantizar la demanda.

1.1.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo es proporcionar una herramienta de trabajo para la realización de estudios hidrológicos en cuencas en las que la información predominante se concreta a la lluvia acumulada en 24 horas. Así mismo, se utiliza la metodología propuesta en la cuenca del río Sonora, en la cual, además de tener, en su mayoría, registros de precipitación acumulada, el clima juega un papel sumamente importante; por otro lado, las autoridades han considerado la construcción de obras en distintas zonas de la cuenca, las cuales serán analizadas en este trabajo.

2 ANTECEDENTES

2.1 Obtención de la información

2.1.1 Selección de las estaciones climatológicas e hidrométricas con influencia en la zona de estudio

La selección de las fuentes de información depende de la delimitación de la zona de estudio, es decir, delimitar la cuenca en la que está contenida la zona de análisis, con el fin de identificar aquellos puntos en los que existen estaciones climatológicas tanto dentro de la cuenca como las que están fuera pero con influencia en ella.

Además de ubicar las estaciones, es necesario descartar aquellas en las que la información no sea de calidad, esto con el fin de mitigar las alteraciones a la representación de las condiciones reales. Este análisis es muy importante tomarlo en consideración para la información de precipitación, y de manera especial, para los datos de escurrimiento, debido a que su medición, actualmente, es automática y muchas veces se puede captar información errónea.

Una vez que se ha revisado la calidad de la información, es necesario comparar los tiempos de operación en las estaciones; es decir, identificar si existen periodos de tiempo de registro simultáneos, así como buscar algún patrón en la información, tal como la presencia de algún evento extremo coincidente.

2.1.2 Obtención de las características fisiográficas de la cuenca en estudio

Las características fisiográficas de una cuenca que influyen de manera más importante en el comportamiento del escurrimiento son el área, elevación y pendiente de la cuenca, así como longitud y pendiente del cauce principal de la red de drenaje. Para el cálculo de estas características existen varios criterios con el fin de definir lo mejor posible la relación entre el escurrimiento y éstas.

2.1.2.1 Área de la cuenca

El concepto del área de una cuenca se define como el área observada en proyección horizontal y limitada por el parteaguas; de acuerdo con su tamaño, puede clasificarse el área como

Tabla 2.1 Clasificación de una cuenca en función de su área

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
< 25	muy pequeña
25 a 250	pequeña
250 a 500	intermedia – pequeña
500 a 2500	intermedia – grande
2500 a 5000	grande
> 5000	muy grande

2.1.2.2 Forma de la cuenca

La forma de una cuenca influye en el comportamiento del escurrimiento, ya que éste puede tener un comportamiento de manera diferente aún cuando dos cuencas tengan la misma área. Este comportamiento se observa de manera directa en la forma del hidrograma, Fig. 2.1.

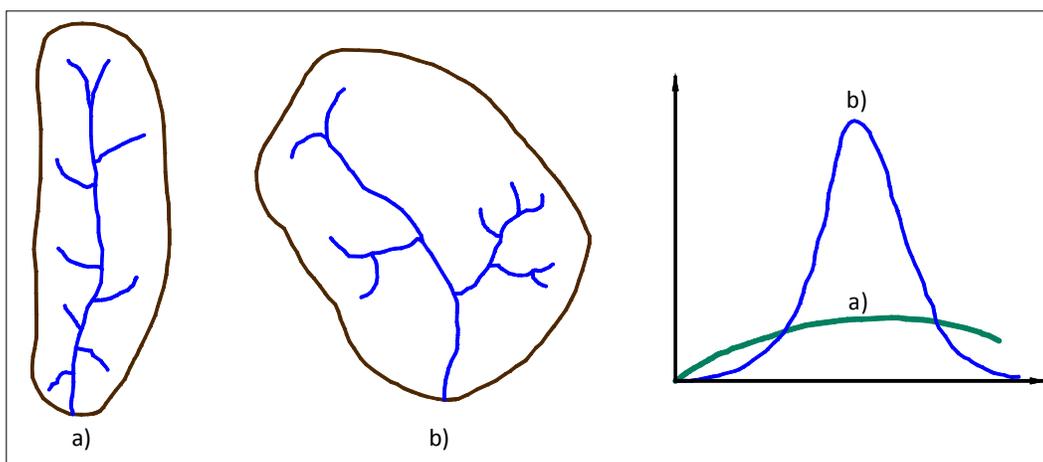


Figura 2.1 Influencia de la forma de una cuenca

Así mismo, en función de las salidas de la cuenca, éstas se clasifican en endorreicas y exorreicas. Las primeras tienen el punto de salida dentro de los límites de la cuenca, en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca.

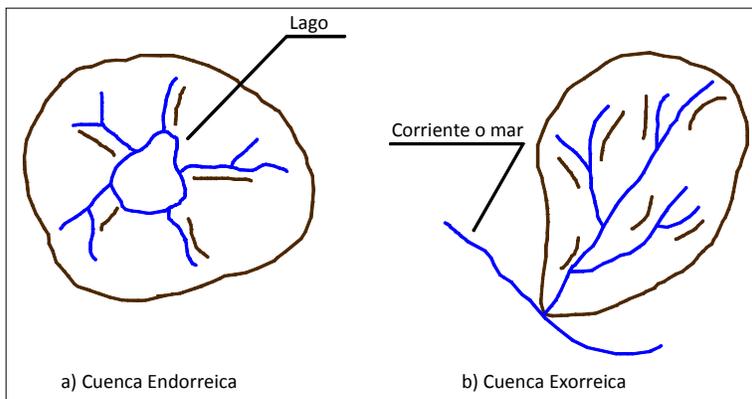


Figura 2.2 Clasificación de una cuenca en función de las salidas

2.1.2.3 Pendiente de la cuenca

La pendiente de una cuenca tiene influencia en el comportamiento de la infiltración, el escurrimiento, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo en los cauces. La pendiente controla el tiempo del flujo sobre el terreno e influye de manera directa en la magnitud de las avenidas. En la práctica se conocen tres criterios para calcular la pendiente (Springall, 1970):

Tabla 2.2 Criterios para el cálculo de la pendiente de una cuenca

Alvord	Horton	Nash
<ul style="list-style-type: none"> • Se analiza la pendiente entre curvas de nivel • Analiza la zona o franja definida por las líneas medias que pasan entre curvas de nivel (desnivel, ancho, área y longitud de la curva de nivel) • La pendiente se obtiene con el promedio pesado de las pendientes de las zonas en relación a su área 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere del trazo de una malla en función del área sobre el plano de la cuenca orientada en el sentido del cauce principal • Considera el desnivel ente curvas de nivel, número de intersecciones en dirección x y y, longitud total de las líneas de la malla dentro de la cuenca • Se cuentan las intersecciones o tangencias de la malla con las curvas de nivel • Proporciona pendiente en el eje x y y de la malla • La pendiente de la cuenca puede ser el promedio aritmético de las pendientes 	<ul style="list-style-type: none"> • Se traza una malla con al menos 100 intersecciones dentro de la cuenca • Para cada intersección se mide la distancia mínima ente curvas de nivel • La pendiente de ese punto es igual al desnivel que existe entre las curvas de nivel y la mínima distancia medida • La media aritmética de todas las pendientes es la pendiente de la cuenca

En la práctica se ha encontrado que se obtienen con los criterios mencionados dos valores semejantes y el otro resulta muy diferente con respecto a los otros dos.

2.1.2.4 Elevación media de la cuenca

Influye sobre la precipitación que se genera sobre la cuenca y su conocimiento es útil en problemas de transposición de tormentas.

El criterio más simple para valuar la elevación media de la cuenca consiste en utilizar una malla de cuadros, de manera que se tengan al menos 100 intersecciones dentro de la cuenca. La elevación media de la cuenca se calcula como el promedio aritmético (media) de las elevaciones de todas las intersecciones que están dentro de la cuenca.

2.1.2.5 Red de drenaje

La red de drenaje es el sistema de cauces por el cual fluyen los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos en forma temporal o permanente. Su conocimiento es de gran importancia porque manifiesta, sus efectos en la formación y rapidez de drenado de los escurrimientos ordinarios o extraordinarios, también señala cuáles son las condiciones físicas del suelo y de la superficie de la cuenca.

Tabla 2.3 Características que determinan la red de drenaje

Característica	Descripción
Tipo de corriente	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Perenne</i>: Conducen agua todo el tiempo, ya que en época de sequía es abastecida continuamente ya que el nivel freático permanece siempre por arriba del fondo del cauce. • <i>Intermitente</i>: Lleva agua la mayor parte del tiempo, principalmente en época de lluvias. • <i>Efímera</i>: Sólo lleva agua después de que llueve e inmediatamente después.
Orden de la corriente	Indica el grado de bifurcación o ramificación de una corriente dentro de la cuenca
Longitud de tributarios	Es un indicador de la pendiente de la cuenca y del grado de drenaje
Densidad o frecuencia de corriente	Con ella se trata de proporcionar una medida real de la eficiencia de drenaje de una cuenca y está en función del área y número de corrientes de cada orden
Densidad de drenaje	Proporciona información del tipo y permeabilidad del suelo, así como de su cobertura vegetal

2.1.2.6 Geología

Clasificar los tipos de roca y fallas, fracturas, etc., así como el tipo de región de la cuenca son parte fundamental de la geología para el estudio hidrológico:

La influencia del tipo de suelo en el régimen hidrológico de la corriente y el transporte de material sólido es un factor de gran importancia. Esto se debe a que determina la naturaleza y el tipo de vegetación existente en la zona, y resulta posible estimar una capacidad de infiltración y de retención.

2.1.2.7 Cauce principal

Tabla 2.4 Características físicas del cauce principal

Característica	Descripción
Longitud	De ella depende la respuesta hidrológica de un río $t_c = 0.000325 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right)$
Perfil	Proporciona información de la variación de elevaciones, se obtiene dibujando el recorrido horizontal contra su elevación
Pendiente	Es un indicador de velocidad de propagación de las ondas de una avenida y la capacidad de transporte de sedimentos El criterio más usado es el de Taylor Schwartz, el cual permite obtener la pendiente promedio del cauce principal considerando que el río está formado por una serie de canales con pendiente uniforme y cuyo tiempo de recorrido es igual al del río $S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$

2.1.2.8 Uso de sistemas de información geográfica

Existen varios sistemas de información geográfica que se utilizan para el cálculo de las características fisiográficas de la cuenca; con estos sistemas se logra generar un modelo digital de elevaciones de la zona de estudio por medio de matrices facilitando la generación rápida de las propiedades hidrológicas, desde la delimitación de la cuenca, hasta las características del cauce principal.

En forma general, puede decirse que la mayor parte de estas características fisiográficas son fáciles de obtener, pero algunas de ellas involucran procesos de cálculo laboriosos que han disminuido con el uso de los Sistemas de Información Geográfica.

2.1.3 Detección de obras existentes y futuras

Las obras hidráulicas existentes en una zona que se pretende analizar, juegan un papel muy importante en cuanto a la Hidrología se refiere; ya que de ellos depende obtener una buena simulación del comportamiento del flujo.

La presencia de una presa, un bordo, conductos, etc. alteran de manera importante el recorrido del flujo y su consideración en un estudio hidrológico permite establecer las condiciones óptimas para aprovechar esas obras y encontrar alternativas de obras futuras que mejoren el aprovechamiento de los recursos.

2.2 Manejo de la información

2.2.1 Datos de Precipitación

2.2.1.1 Integración de series

Cuando ha sido posible establecer el criterio de selección de la información de precipitación, es importante determinar el fin para el cual se han escogido los datos; es decir, el intervalo de tiempo del que se extraerán los datos; dicho intervalo puede ser anual, mensual, diario, horario, etc., así como valores máximos, mínimos o medios.

En general, se utilizan dos tipos de series:

1. Serie Anual de Máximos, la cual está integrada por cada uno de los valores (datos) más grandes de cada año de registro.
2. Serie de Excedentes Anuales, está formada por datos cuya magnitud es mayor que cierto valor base, el cual es determinado de manera que el número de eventos de la serie integrada sea igual al número de años de registro.

La ventaja de la serie anual es su rápida integración, sin embargo, su desventaja es que cada año queda representado por un solo evento y el máximo de otro año puede ser menor que el segundo valor en magnitud del año anterior, y sin embargo no fue considerado. La serie de excedentes anuales sí toma en cuenta los eventos secundarios de un año y para periodos de retorno menores a 10 años siempre da valores más grandes al ser procesados estadísticamente.

Al formar una serie de excedentes anuales se debe tener cuidado de cumplir con la independencia entre eventos seleccionados y para fines prácticos se acepta, en el caso de $hp_{máx}$, que las condiciones que generan una lluvia importante son independientes de otros eventos después de un lapso de tiempo de 15 días.

Para los gastos máximos anuales no se procesan por medio de la serie de excedentes anuales, pues su independencia entre eventos exige un año de lapso por lo cual cae en la serie anual.

2.2.1.2 Deducción de datos faltantes.

En ocasiones, se puede contar con registros de lluvia u otra variable, sin embargo, en la mayoría de los proyectos ésta información no se encuentra disponible. Por esta razón, el proyectista de obras hidráulicas debe hacer uso de modelos matemáticos que ayuden a pronosticar el fenómeno requerido.

Se han desarrollado varias técnicas de interpolación de lluvia puntual (modelos matemáticos) y, también los métodos de interpolación espacial. Son muchos los factores que afectan la distribución espacial de la precipitación sobre un área. Por lo tanto, la estimación adecuada depende del número y distribución de las estaciones de medición en el área, así como el método que se emplea para la estimación.

Métodos de Interpolación

Sean X_j y Y_j las coordenadas de un punto j en un espacio bidimensional y P_j , una función de las coordenadas X_j y Y_j , la que denota el proceso observado en “ n ” estaciones de medición, j es el subíndice que indica el sitio al cual se refiere el proceso medido, $j = 1, 2, \dots, n$, P_e es una estimación del proceso en un punto con coordenadas X_e y Y_e . La estimación puntual se hace de los datos medidos en las “ n ” estaciones y ésta puede ser representada por una combinación lineal pesada de aquellos valores medidos, es decir,

$$P_e = \sum_{j=1}^n W_j P_j$$

donde W_j es el peso o factor de peso del punto de muestreo j .

Esta ecuación es una forma general de la Función de Interpolación llamada *Condición de Linealidad*.

a. Método de Thiessen

En Hidrología ha sido tradición calcular la precipitación media en un área con base en los *Polígonos de Thiessen*, que en otras áreas del conocimiento se denominan Mosaicos de Dirichlet, Dominios de Verano o Regiones de Wigner – Serte. De acuerdo con este método, a cada estación hidrológica de una cuenca se le asocia un Polígono de Thiessen que define un área donde cada uno de sus puntos está más cerca de una estación que de cualquier otra.

El cociente que resulta de dividir el área de cada polígono entre el área total define un conjunto de pesos w_j , conforme a los cuales la precipitación media puede ser calculada como un promedio pesado. El error de estimación con el método de Thiessen es proporcional a la distancia del punto de estimación respecto a la estación más cercana. En una cuenca con una densa red de medición w_j , por lo cual, el cálculo con este método mejora los resultados.

La estimación del proceso P_e en el punto de interés e , es igual al valor observado de la estación de muestreo más cercana en el área. Esta estimación puede representarse con $P_e = P_j$.

Para j cuya distancia sea la menor de las “ n ” estaciones, es decir, si d_{ej} es la distancia entre el punto de interés e y la estación j , se calcula como la distancia entre dos puntos, dada por

$$d_{ej} = \sqrt{(X_e - X_j)^2 + (Y_e - Y_j)^2}$$

Para $j = 1, 2, \dots, n$

donde $d_{ej} = \text{Mín}(d_{e1}, d_{en})$ es la mínima distancia entre el punto e y alguna estación; el subíndice i es el que ubica el sitio de dicha estación; por lo que el factor de peso será:

$$W_j = 0 \quad ; \quad j \neq i$$

$$W_j = 1 \quad ; \quad j = i$$

b. Método Polinomial

Este método consiste en ajustar una ecuación global para el área en estudio j , ésta es función de las coordenadas del sitio a interpolar, empleando una función algebraica o una polinomial, siendo la forma general de la función polinomial:

$$P_e = \sum_{k=1}^m a_k \phi_k(X_e, Y_e)$$

donde

P_e valor interpolado en cualquier punto (X_e, Y_e)

a_k k – ésimo monomio en términos de las coordenadas (X_e, Y_e)

$\phi_k(X_e, Y_e)$ el número total de monomios, determinándose el grado de la función polinomial ajustada en la ecuación

Los monomios algebraicos en términos de las coordenadas X y Y se muestran en la tabla siguiente:

Grado	k	$\phi_k(X, Y)$	m
-------	-----	----------------	-----

0	1				1				1
1	2 a 3			X	Y				3
2	4 a 6		X ²	XY	Y ²				6
3	7 a 10		X ³	X ² Y	XY ²	Y ³			10
4	11 a 15	X ⁴	X ³ Y	X ² Y ²	XY ³	Y ⁴			15
5	16 a 21	X ⁵	X ⁴ Y	X ³ Y ²	X ² Y ³	XY ⁴	Y ⁵		21
6	22 a 28	X ⁶	X ⁵ Y	X ⁴ Y ²	X ³ Y ³	X ² Y ⁴	XY ⁵	Y ⁶	28

Se desea estimar el arreglo de parámetros a_k para $k = 1, 2, \dots, m$, por medio de la minimización de la suma del cuadrado de los errores, el cual está dado por:

$$f = \sum_{j=1}^n [P_j - \hat{P}_j]^2$$

Derivando la función f con respecto a los coeficientes a_k para $k = 1, 2, \dots, m$ ordenando e igualando la ecuación a cero se obtiene:

$$\sum_{i=1}^m a_i \sum_{j=1}^n \phi_k(X_j, Y_j) \phi_i(X_j, Y_j) = \sum_{j=1}^n P_j \phi_k(X_j, Y_j)$$

$k = 1, 2, \dots, m$.

La segunda sumatoria del lado izquierdo es únicamente función de las coordenadas de los puntos de las estaciones, los cuales están en forma de función polinomial en la ecuación.

$$P_e = \sum_{k=1}^m a_k \phi_k(X_e, Y_e)$$

Los coeficientes polinomiales, a_k se obtienen

$$a_k = \sum_{j=1}^n \alpha P_j$$

$k = 1, 2, \dots, m$.

donde

$$\alpha_{kj} = \sum_{i=1}^m Y_{ki} \phi_i(X_j, Y_j)$$

Para $k = 1, 2, \dots, m$.

Y_{ki} elementos del k – ésimo renglón y de la i – ésima columna de la matriz inversa de $[m \times n]$ cuyos elementos son:

$$\theta_{ki} = \sum_{j=1}^n \phi_k(X_j, Y_j) \phi_i(X_j, Y_j)$$

Para $k = 1, 2, \dots, m$. renglones

$i = 1, 2, \dots, n$. columnas

Considerando lo anterior, la ecuación P_e quedará como:

$$P_e = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m \alpha_{kj} \phi_k(X_e, Y_e) \right] P_j$$

y el factor de peso quedará expresado como:

$$W_j = \sum_{k=1}^m \alpha_{kj} \phi_k(X_e, Y_e)$$

En la interpolación sobre un área, la matriz con coeficientes α_{kj} se evalúa sólo una vez, puesto que éste es solamente función de las coordenadas de los puntos de las estaciones. Los factores de peso son determinados a partir de los monomios $\phi_k(X_e, Y_e)$ en término de las coordenadas del sitio a ser interpolado (X_e, Y_e) .

Para un conjunto de valores p observados, pertenecientes a la estación de medición j con coordenadas (X_j, Y_j) puede expresarse en un polinomio de 2o grado, con 6 coeficientes y 6 monomios algebraicos representándose como

$$p = a_1 + a_2X + a_3Y + a_4X^2 + a_5XY + a_6Y^2$$

Polinomio con el cual los coeficientes a_k se obtienen con un mínimo error a partir de la ecuación

$$a_k = \sum_{j=1}^n \alpha_{kj} p_j$$

Una vez calculados dichos coeficientes, la ecuación resultante se emplea para calcular la precipitación en cualquier punto X_e, Y_e

$$p_e = a_1 + a_2X_e + a_3Y_e + a_4X_e^2 + a_5X_eY_e + a_6Y_e^2$$

Los términos θ_{ki} obtenidos al evaluar la función polinomial se calculan de la manera siguiente:

$$\theta_{11} = [\phi_1(X_1, Y_1)\phi_1(X_1, Y_1) + \phi_1(X_2, Y_2)\phi_1(X_2, Y_2) + \phi_1(X_3, Y_3)\phi_1(X_3, Y_3) + \phi_1(X_4, Y_4)\phi_1(X_4, Y_4)]$$

$$\theta_{12} = [\phi_1(X_1, Y_1)\phi_2(X_1, Y_1) + \phi_1(X_2, Y_2)\phi_2(X_2, Y_2) + \phi_1(X_3, Y_3)\phi_2(X_3, Y_3) + \phi_1(X_4, Y_4)\phi_2(X_4, Y_4)]$$

De igual forma se calculan el resto de los términos $\theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}, \dots, \theta_{66}$ para obtener la matriz de coeficientes.

$$[\theta_{ki}] = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} & \theta_{14} & \theta_{15} & \theta_{16} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & & & & \\ \theta_{31} & & \theta_{33} & & & \\ \theta_{41} & & & \theta_{44} & & \\ \theta_{51} & & & & \theta_{55} & \\ \theta_{61} & & & & & \theta_{66} \end{bmatrix} \quad [\varphi_{ki}] = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} & \varphi_{14} & \varphi_{15} & \varphi_{16} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & & & & \\ \varphi_{31} & & \varphi_{33} & & & \\ \varphi_{41} & & & \varphi_{44} & & \\ \varphi_{51} & & & & \varphi_{55} & \\ \varphi_{61} & & & & & \varphi_{66} \end{bmatrix}$$

donde los términos φ_{ki} representan los elementos de una matriz inversa de $[\theta_{ki}]$; matricialmente se tiene $[\theta_{ki}]^{-1} = [\varphi_{ki}]$. Luego, los elementos α_{kj} resultan de multiplicar las matrices cuyos elementos son ψ_{ki} y $\phi_i(X_j, Y_j)$

$$\alpha_{11} = [\psi_{11}\phi_1(X_1, Y_1) + \psi_{12}\phi_2(X_1, Y_1) + \dots + \psi_{16}\phi_6(X_1, Y_1)]$$

$$\alpha_{21} = [\psi_{21}\phi_1(X_1, Y_1) + \psi_{22}\phi_2(X_1, Y_1) + \dots + \psi_{26}\phi_6(X_1, Y_1)]$$

⋮

$$\alpha_{61} = [\psi_{61}\phi_1(X_1, Y_1) + \psi_{62}\phi_2(X_1, Y_1) + \dots + \psi_{66}\phi_6(X_1, Y_1)]$$

Los elementos calculados forman la matriz:

$$[\alpha_{kj}] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} & \dots & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} & \dots & \alpha_{2n} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & \alpha_{34} & \dots & \alpha_{3n} \\ \alpha_{41} & \alpha_{42} & \alpha_{43} & \alpha_{44} & \dots & \alpha_{4n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \alpha_{n3} & \alpha_{n4} & \dots & \alpha_{nn} \end{bmatrix} \quad [m \times n]$$

Finalmente, el valor interpolado en el punto e se obtiene aplicando la ecuación:

$$P_e = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^m \alpha_{kj} \phi_k(X_e, Y_e) \right] P_j$$

α_{kj} se obtiene de

$$a_k = \sum_{j=1}^n \alpha p_j$$

y por último se emplea

$$p = a_1 + a_2X + a_3Y + a_4X^2 + a_5XY + a_6y^2$$

c. Método de aproximación de Lagrange

Esta aproximación es referida algunas veces como Interpolación de Lagrange, y es una técnica de interpolación confiable. Para la aplicación de esta técnica, los coeficientes α_k son evaluados de modo que el proceso P pueda pasar a través de los valores observados en las estaciones. Por lo tanto, esta aproximación requiere que el número de monomios sea igual al número de estaciones, es decir que $m = n$. Por lo que la ecuación P_j puede reescribirse como:

$$P_j = \sum_{k=1}^m \alpha_{kj} \phi_k(X_j, Y_j)$$

Para $j = 1, 2, \dots, n$.

y los coeficientes a_k se estiman con

$$a_k = \sum_{j=1}^n \beta_{kj} P_j$$

Para $j = 1, 2, \dots, n$.

donde β_{kj} es el elemento de la matriz inversa de $[n \times n]$ con elementos $\phi_k(X_j, Y_j)$ para $k = 1, 2, \dots, n$. monomios (filas) y $j = 1, 2, \dots, n$. estaciones (columnas).

Sustituyendo los valores obtenidos de a_k , la expresión para estimar P_e es

$$P_e = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^n \beta_{kj} \phi_k(X_e, Y_e) \right] P_j$$

Siendo la expresión contenida entre los corchetes el factor de peso

$$W_j = \sum_{k=1}^n \beta_{kj} \phi_k(X_e, Y_e)$$

d. Método Interpolación Inversa

La influencia de la lluvia en una estación para el cálculo de la misma en cualquier punto es inversamente proporcional a la distancia entre los dos puntos. El método da mayor peso a la

estación más cercana y se reduce conforme la distancia es mayor, dependiendo del exponente β . Los pesos de la función de interpolación son solamente una función de la distancia entre el punto de interés (X_e, Y_e) y los puntos de medición (X_j, Y_j) para $j = 1, 2, \dots, n$.

Considerando la distancia d_{ej} el peso correspondiente al punto (X_j, Y_j) , en general, está dado por:

$$W_j = \frac{F(d_{ej})}{\sum_{j=1}^n F(d_{ej})}$$

donde $F(d_{ej})$ representa una función dada la distancia d_{ej} .

Una forma comúnmente usada de la función $F(*)$ es $F(d_{ej}) = \left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta$, donde β es una constante apropiada.

De acuerdo con lo anterior el factor de peso se escribe como

$$W_j = \frac{\left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta}$$

El factor de peso tiende a cero cuando hay incremento en la distancia d_{ej} y/o parámetro β . Cuando la potencia β toma valores de 1 o 2, la técnica es llamada como *Interpolación de la Distancia Inversa* o *Interpolación del Cuadrado de la Distancia Inversa*.

e. Método Interpolación Multicuadrática

En este método la influencia de cada estación de medición es representada por superficies cuadradas como función de sus coordenadas. La estimación para un punto dado (X_e, Y_e) , se obtiene por la suma de contribuciones de todas las superficies.

Esto se expresa como

$$P_e = \sum_{i=1}^n C_i d_{ei}$$

donde

C_i coeficiente multicuadrático del punto (X_j, Y_j)

d_{ei} distancia entre los puntos (X_e, Y_e) y (X_j, Y_j)

Para estimar los coeficientes C_i en términos de los factores de pesos, se usará una ecuación para cada punto (X_j, Y_j) como:

$$P_j = \sum_{i=1}^n C_i d_{ij}$$

Para $j = 1, 2, \dots, n$.

y los coeficientes C_j se determinan como:

$$C_i = \sum_{j=1}^n \delta_{ij} P_j$$

Para $j = 1, 2, \dots, n$.

donde δ_{ij} es un elemento de la matriz inversa de $[n \times n]$, cuyos elementos son las distancias d_{ij} entre las n estaciones. Por lo tanto, la ecuación de P_e se puede escribir como:

$$P_e = \sum_{i=1}^n d_{ei} \sum_{j=1}^n \delta_{ij} P_j$$

O

$$P_e = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{i=1}^n \delta_{ij} d_{ei} \right] P_j$$

Y nuevamente los factores de peso para cada estación son:

$$W_j = \sum_{i=1}^n \delta_{ij} d_{ei}$$

Para $j = 1, 2, \dots, n$.

f. Método de Interpolación Óptima

Este método consiste en minimizar la varianza del error medio de interpolación, para determinar los factores de peso de cada estación. La varianza del error medio está expresada en términos de los pesos W_j y de la correlación espacial.

Sea \hat{P}_e el valor estimado de P_e por medio de:

$$P_e = \sum_{j=1}^n W_j P_j$$

Entonces la minimización de la varianza del error de interpolación σ_e^2 será:

$$\sigma_e^2 = VAR[P_e - \hat{P}_e] = VAR \left[P_e - \sum_{j=1}^n W_j P_j \right]$$

donde VAR[*] se entiende por varianza del error.

Desarrollando, se tiene la ecuación siguiente:

$$\sum_{i=1}^n W_i \rho(d_{ij}) = \rho(d_{ej})$$

Para $j = 1, 2, \dots, n$.

y los factores de peso se obtienen al resolver el sistema de ecuaciones lineales.

En la ecuación anterior, los valores de la función de correlación espacial para los puntos ij y el punto e , así como los factores de peso expresados en forma matricial, son:

$$[\rho(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \rho(d_{11}) & \rho(d_{12}) & \cdots & \rho(d_{1n}) \\ \rho(d_{21}) & \rho(d_{22}) & \cdots & \rho(d_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho(d_{n1}) & \rho(d_{n2}) & \cdots & \rho(d_{nn}) \end{bmatrix} \quad [\rho(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \rho(d_{e1}) \\ \rho(d_{e2}) \\ \vdots \\ \rho(d_{en}) \end{bmatrix}$$

$[n \times n]$ $[n \times 1]$

$$[W_j] = [\rho(d_{ij})]^{-1} [\rho(d_{ej})]$$

Para que el estimador \hat{P}_e sea insesgado debe satisfacerse que la suma de los factores de peso sea igual a la unidad, esto es:

$$\sum_{j=1}^n W_j = 1$$

Aplicando el multiplicador de Lagrange (λ), el sistema lineal de ecuaciones puede resolverse simultáneamente para obtener los factores de peso W_j , donde los términos matriciales son:

$$[W_j] = \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix}; \quad [\rho(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \rho(d_{e1}) \\ \vdots \\ \rho(d_{en}) \\ 1 \end{bmatrix}; \quad [\rho(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \rho(d_{11}) & \cdots & \rho(d_{1n}) & 1 \\ \vdots & & \vdots & 1 \\ \rho(d_{n1}) & \cdots & \rho(d_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

g. Estimación de la función de correlación espacial

La función de correlación espacial, $\rho(d_{ij})$, se obtiene de observaciones entre $[n(n - 1)]/2$ pares de estaciones y la distancia entre ellas. Asumiendo que en el área de estudio el comportamiento de la variable aleatoria P es homogénea e isotrópica, la función de correlación puede ser representada por alguno de los siguientes modelos:

$$\text{Modelo Inverso:} \quad \rho(d_{ij}) = \frac{1}{1 + \frac{d_{ij}}{c}}$$

$$\text{Modelo de Potencia Inversa:} \quad \rho(d_{ij}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{ij}}{c}\right)^a}$$

$$\text{Modelo Exponencial:} \quad \rho(d_{ij}) = e^{-\left(\frac{d_{ij}}{c}\right)}$$

Para hacer el ajuste de las funciones de correlación, en primer lugar, se estiman las correlaciones ente estaciones, así para las estaciones i y j , el coeficiente de correlación muestral está dado por:

$$\hat{\rho}(d_{ij}) = \left(\frac{1}{N - 1}\right) \frac{\sum_{t=1}^N [P_i^t - \hat{m}_i][P_j^t - \hat{m}_j]}{\hat{S}_i \hat{S}_j}$$

donde

P_i^t observaciones de las series de tiempo del proceso P en la estación i

P_j^t observaciones de las series de tiempo del proceso P en la estación j

\hat{m}_i media de las observaciones en la estación i

\hat{m}_j media de las observaciones en la estación j

\hat{S}_i desviación estándar insesgada de las observaciones en la estación i

\hat{S}_j desviación estándar insesgada de las observaciones en la estación j

N número total de datos históricos en común entre el par de estaciones

La distancia d_{ij} entre las estaciones se calcula con la ecuación:

$$d_{ej} = \sqrt{(X_e - X_j)^2 + (Y_e - Y_j)^2}$$

Para $j = 1, 2, \dots, n$.

Entonces, para n estaciones, hay $[n(n - 1)]/2$ pares de estaciones, las cuales son usadas en el ajuste de las funciones de correlación espacial.

h. Método de Kriging

Este método es similar a de la interpolación óptima, excepto que la función de correlación espacial se reemplaza por el semivariograma. Como en interpolación óptima, la *Interpolación Kriging* requiere que el proceso observado sea estacionario y de 2º orden. Esencialmente, este método supone homogeneidad en las medias, varianzas y covarianzas. Como consecuencia de lo anterior se asume una estructura de covarianza espacial isotrópica. Por consiguiente, la varianza en un punto se representa por $\text{VAR}[P_i] = \sigma^2; i = 1, 2, \dots, n$ estaciones y la covarianza entre las estaciones i y j está representada por $\text{COV}(P_i P_j) = \text{COV}(d_{ij})$.

h.1) Kriging ordinario y restringido

Minimizando la varianza respecto a los factores de peso se obtiene una solución matricial que deberá resolverse como un sistema de ecuaciones:

$$[W_j] = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} \quad [\gamma(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \gamma(d_{e1}) \\ \gamma(d_{e2}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{en}) \end{bmatrix} \quad [\gamma(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \gamma(d_{11}) & \gamma(d_{12}) & \cdots & \gamma(d_{1n}) \\ \gamma(d_{21}) & \gamma(d_{22}) & \cdots & \gamma(d_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma(d_{n1}) & \gamma(d_{n2}) & \cdots & \gamma(d_{nn}) \end{bmatrix}$$

cuya solución se puede representar de la manera siguiente:

$$[W_j] = [\gamma(d_{ij})]^{-1} [\gamma(d_{ej})]$$

Para la ecuación:

$$\sum_{i=1}^n W_i \gamma(d_{ij}) + \lambda = \gamma(d_{ej})$$

$$[W_j] = \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix}; \quad [\gamma(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \gamma(d_{e1}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{en}) \\ 1 \end{bmatrix}; \quad [\gamma(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \gamma(d_{11}) & \cdots & \gamma(d_{1n}) & 1 \\ \vdots & & \vdots & 1 \\ \gamma(d_{n1}) & \cdots & \gamma(d_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W_1 + W_2 + \cdots + W_n + 0 = 1$$

h.2) Kriging Universal

Éste intenta incluir la no homogeneidad en la media del proceso. En este método la media m_e , en el punto (X_e, Y_e) se representa por una combinación lineal de la media de las estaciones m_j :

$$P_e = \sum_{j=1}^n W_j P_j$$

tal como:

$$m_e = \sum_{j=1}^n W_j m_j$$

la notación matricial que deberá resolver el esquema Kriging Universal es:

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \cdots & \gamma_{1n} & \phi_{11} & \phi_{21} & \cdots & \phi_{m1} \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \cdots & \gamma_{2n} & \phi_{12} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{m2} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & 0 & \cdots & \gamma_{3n} & \phi_{13} & \phi_{23} & \cdots & \phi_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & 0 & \cdots & 0 & \phi_{1n} & \phi_{2n} & \cdots & \phi_{mn} \\ \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} & \cdots & \phi_{1n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} & \cdots & \phi_{2n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi_{m1} & \phi_{m2} & \phi_{m3} & \cdots & \phi_{mn} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{e1} \\ \gamma_{e2} \\ \gamma_{e2} \\ \vdots \\ \gamma_{en} \\ \phi_{1e} \\ \phi_{2e} \\ \vdots \\ \phi_{me} \end{bmatrix}$$

Estimación del semivariograma

- Modelo Lineal: Este método es más simple y se escribe como:

$$\gamma(d_{ij}) = ad_{ij}$$

- Modelo Monómico: Estos modelos se usan para representar fenómenos estacionarios, siendo de la forma:

$$\gamma(d_{ij}) = ad_{ij}^b$$

donde b pertenece al intervalo (0,2) sin tomar los valores extremos.

- Modelo Exponencial: Está dado por:

$$\gamma(d_{ij}) = a[1 - \exp(-cd_{ij})]$$

donde $c > 0$

- Modelo Gaussiano: la expresión representativa es:

$$\gamma(d_{ij}) = a[1 - \exp(-cd_{ij}^2)]$$

donde $c > 0$

- Modelo Esférico: la ecuación está dada por:

$$\gamma(d_{ij}) = \frac{1}{2}a \left[3\frac{d_{ij}}{c} - \left(\frac{d_{ij}}{c}\right)^3 \right]$$

En general, a y c son constantes apropiadas del modelo esférico y d_{ij} es la distancia entre dos puntos.

El semivariograma entre las estaciones i y j se calcula como:

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = \frac{1}{2N} \sum_{t=i}^n [(P_i^t - \hat{m}_i) - (P_j^t - \hat{m}_j)]^2$$

donde

P_k^t representa las observaciones de la serie de tiempo en la estación k .

\hat{m}_k media de la estación k .

N número total de observaciones en común entre el par de estaciones.

2.2.1.3 Detección de puntos extraños

Primero se seleccionan la o las estaciones pluviométricas a utilizar y se recaban sus registros de $hp_{m\acute{o}x}$ en 24 horas, en seguida, a toda información obtenida se le somete a un análisis crítico que consistirá en detectar valores erróneos o dudosos, ya sea por ser demasiado grandes o bien, pequeños. Para el caso de valores dudosos se podrá confirmar su existencia por medio de los valores que para tal fecha fueron registrados en estaciones cercanas, con lo cual se confirmarán o se descartarán tales valores.

2.2.1.4 Pruebas de homogeneidad

Para determinar si las características estadísticas de los registros hidrológicos han sido afectadas, se emplean pruebas estadísticas que hacen uso de hipótesis nulas y reglas para determinar la homogeneidad.

a. Prueba de Helmer

Esta prueba consiste en analizar el signo de desviaciones de cada evento con respecto a la media de la muestra de datos y observar si existen secuencias (S) de estos signos, o cambios (C). La regla que sigue este método para determinar la homogeneidad indica que debe cumplirse lo siguiente:

$$-\sqrt{n-1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n-1}$$

donde

n número de datos de la muestra

S número de datos mayores a la media de la muestra

n número de datos menores a la media de la muestra

b. Prueba t de Student

Esta prueba considera la posibilidad de la pérdida de la homogeneidad cuando se tiene un cambio brusco en la media. Se divide en dos partes una serie, tal que pueda aplicarse el estadístico t_d ,

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

El valor absoluto de t_d , se compara con el valor de la distribución *t de Student* de dos colas, y con $\vartheta = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$, éste puede cambiar.

Tabla 2.5 Distribución t de Student

DISTRIBUCION t DE STUDENT

GRADOS DE LIBERTAD	NIVEL DE SIGNIFICANCIA		GRADOS DE LIBERTAD	NIVEL DE SIGNIFICANCIA	
	5 % *	5 % **		5 % *	5 % **
1	6.314	12.706	18	1.734	2.101
2	2.920	4.303	19	1.729	2.093
3	2.353	3.182	20	1.725	2.086
4	2.132	2.776	21	1.721	2.080
5	2.015	2.571	22	1.717	2.074
6	1.943	2.447	23	1.714	2.069
7	1.895	2.365	24	1.711	2.064
8	1.860	2.306	25	1.708	2.060
9	1.833	2.262	26	1.706	2.056
10	1.812	2.228	27	1.703	2.052
11	1.796	2.201	28	1.701	2.048
12	1.782	2.179	29	1.699	2.045
13	1.771	2.160	30	1.697	2.042
14	1.761	2.145	40	1.684	2.021
15	1.753	2.131	60	1.671	2.000
16	1.746	2.120	120	1.658	1.980
17	1.740	2.110	∞	1.645	1.960

* Prueba de una cola.

** Prueba de dos colas.

c. Prueba de Cramer

Esta prueba permite verificar para determinar la homogeneidad de los registros de una serie de n datos, y también para determinar que el valor de la media no varía de manera importante para un cierto periodo de tiempo. Se consideran tres bloques, el primero, debe ser del tamaño de la muestra, el segundo será el 60% de los datos iniciando con el último valor, y el tercero será el 30% de los datos iniciando con el último valor. Debe compararse los valores del registro total con los valores al 60 y 30%.

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}$$

$$S_Q^j = \left[\frac{1}{(n_j - 1)} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2 \right]^{1/2}$$

Si y solo si la diferencia de τ_w es mayor que el de la distribución *t de Student*, se concluye que la diferencia entre las medias de evidencia de inconsistencias y, por lo tanto, la serie se considera como no homogénea.

$$t_w = \left[\frac{n_w(n_j - 2)}{n - n_w[1 - (\tau_w)^2]} \right]^2 |\tau_w|$$

2.2.1.5 Pruebas de independencia

Se requiere de muestras aleatorias para realizar el análisis de frecuencias, una de las pruebas para determinar la independencia es la *Prueba de Anderson*, con la que se construye un correlograma con límites de confianza se puede conocer la independencia de los datos, es decir, que si sólo el 10% de los valores r_k^j sobrepasan los límites de confianza, se dice que la serie es independiente y puede emplearse para el análisis de frecuencias.

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

2.2.1.6 Pruebas de bondad de ajuste

Esta prueba se emplea para determinar qué distribución se ajusta mejor la serie de datos:

$$EEA = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_T - x_r)^2}{n - n_p} \right]^{1/2}$$

donde EEA es el *Error Estándar de Ajuste*, \hat{x}_T son los valores estimados por el modelo probabilístico de ajuste, x_r son los valores reales asociados al mismo periodo de retorno, n es el tamaño de la muestra, y n_p es el número de parámetros del modelo.

La distribución de mejor ajuste será aquella que proporcione el mínimo valor del estadístico *EEA*. Si una o más distribuciones tienen valores similares al de *EEA*, entonces, se deberá optar por aquella distribución que tenga el menor número de parámetros.

2.2.1.7 Corrección por intervalo fijo

Para tomar en cuenta el efecto de la medición en intervalos fijos, y de acuerdo con la experiencia, se ha observado que los valores de precipitación medidos en intervalos de 24 horas, pueden afectarse por un factor de 1.13 para ser consideradas como $hp_{máx}$.

Con base en un estudio de miles de estaciones – año de datos de lluvia, se encontró que los resultados de un análisis de frecuencia realizado con lluvias máximas anuales, tomadas en un único y fijo intervalo de observación, para cualquier duración comprendida entre 1 y 24 horas, al ser multiplicadas por 1.13 daban valores más aproximados a los obtenidos en el análisis basado en lluvias máximas verdaderas, pues los registros de lluvia máxima mensual en 24 horas se toman de 8:00 am de un día a 8:00 am del día siguiente.

2.2.1.8 Corrección por magnitud de cuenca

Es importante considerar que cuando se analizan cuencas mayores a 25 km², ya que este valor es lo que domina una estación, la precipitación media debe afectarse por un factor que toma en consideración la distribución de la lluvia en el espacio, es decir, por el Factor de Reducción por Área (FRA).

El FRA es un coeficiente que sirve para transformar precipitaciones puntuales que se presentan en una zona determinada en precipitaciones medias sobre un área.

La necesidad de utilizar factores de reducción por área se deriva por el ajuste de funciones de distribución de probabilidad a los datos de precipitación máxima anual por separado de cada estación que influye en el área de estudio y los periodos de retorno seleccionados. (Ver cap. 4).

El cálculo del FRA se realiza dividiendo la precipitación media máxima anual asociada a un periodo de retorno entre la media de los máximos puntuales asociados al mismo periodo de retorno:

$$FRA(A, T) = \frac{\bar{P}(A, T)}{\hat{P}(A, T)}$$

donde

$\bar{P}(A, T)$	lluvia media anual asociada a una área y periodo de retorno, en mm
$\hat{P}(A, T)$	media real de la lluvia máxima calculada para cada estación asociada a un área y periodo de retorno, en mm

a. Factor de ajuste por área con áreas fijas

Este método recibe este nombre porque se consideran áreas fijas, es decir, el área corresponde a la cuenca en estudio y no cambia en la secuencia de cálculo.

Este factor se calcula por medio de la expresión siguiente:

$$FRA = \frac{R_3}{R_4}$$

donde:

R_3 precipitación media máxima anual para una duración y área dada

R_4 precipitación puntual media máxima anual sobre toda el área para la cual se obtiene R_3

Para calcular el FRA puede seguirse el procedimiento que se describe a continuación:

1. Se calcula la precipitación media para la cuenca, ya sea con ayuda de los polígonos de Thiessen o con isoyetas, r_a
2. Se obtiene el valor máximo de las lluvias medias obtenidas en el punto 1
3. Se calcula el promedio aritmético de los valores máximos

$$R_3 = \frac{\sum_{i=1}^N r_a(i)}{N}$$

4. Para cada estación se selecciona el valor máximo para todos los años del registro, r_p
5. Se calcula la precipitación media máxima anual para cada estación como un promedio aritmético

$$\overline{R_{pj}} = \frac{\sum_{i=1}^N r_{pj}(i)}{N}$$

6. Se calcula la precipitación media puntual que represente a la zona por medio de un promedio ponderado de acuerdo con el área de influencia de cada estación dentro de la cuenca

$$R_4 = \sum_{i=1}^N \omega_i \overline{R_{pj}}$$

7. Se calcula el cociente de la precipitación media máxima anual entre la media máxima puntual, y ese será el valor del FRA

$$FRA = \frac{R_3}{R_4}$$

3 METODOLOGÍA

3.1 Teoría Distribucional

3.1.1 Análisis probabilístico

Cuando de un espacio se extrae una muestra de datos al azar, es razonable pensar que su comportamiento, en cuanto a probabilidad se refiere, sea similar a la del espacio completo, especialmente cuando la muestra es grande. También es razonable suponer que la frecuencia de cada dato de la muestra sea igual a la observada en el espacio.

Las variables aleatorias pueden ser *discretas* o *continuas*, dependiendo de la forma como se obtengan los resultados; por ejemplo, el número de días de lluvia es una variable aleatoria discreta, mientras que las alturas de lluvia son variables aleatorias continuas. Sin embargo, para propósitos prácticos una variable discreta puede tratarse arbitrariamente como continua, ajustando a una función continua a la variación, o bien una continua como discreta, dividiendo las variables continuas en intervalos y agrupándolos en números discretos

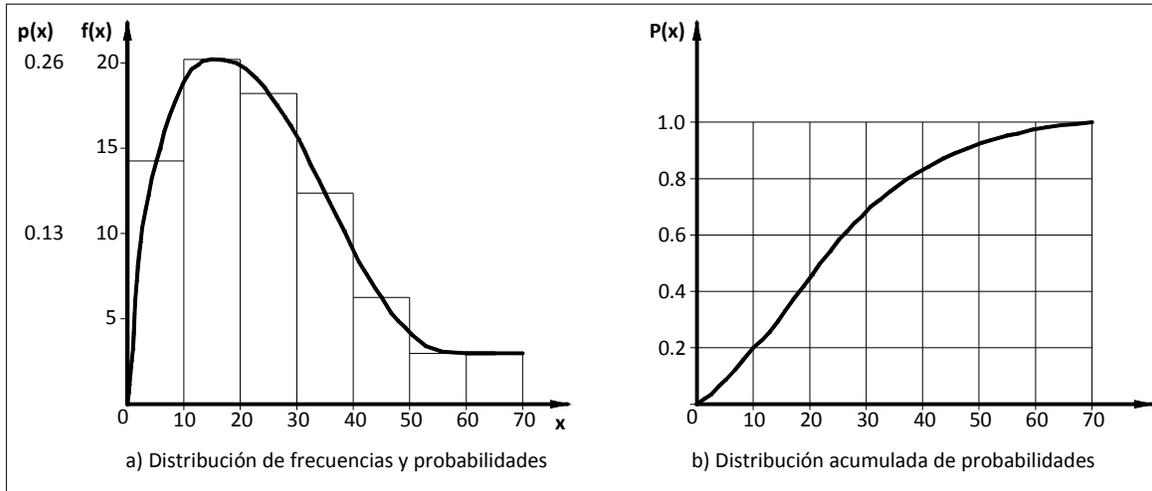


Figura 3.1 Distribuciones estadísticas

3.1.1.1 Análisis de frecuencias

En un análisis de frecuencias de datos hidrológicos, el primer objetivo es determinar el intervalo de recurrencia o periodo de retorno T , de un evento hidrológico de una magnitud dada y . El periodo de retorno se define como el intervalo de tiempo dentro del cual un evento de magnitud dada y puede ser igualada o excedida por lo menos una vez en promedio. Si un evento igual o mayor a y ocurre una vez en T años, su probabilidad de ocurrencia $P(Y \geq y)$ es igual a 1 en T casos, o sea que:

$$P(Y \geq y) = 1/T$$

Para estimar eventos futuros para diseño se recurre a técnicas de probabilidad y estadística, con las cuales se determina la probabilidad de excedencia de un determinado evento, cuyo objetivo es proporcionar seguridad del funcionamiento de una cierta obra. Esta probabilidad de excedencia se obtiene a partir de otro concepto de probabilidad de ocurrencia del evento, *Periodo de Retorno*.

$$T = \frac{n + 1}{m}$$

donde T es el periodo de retorno, n es el número de datos de la muestra, y m es el orden del dato, y la expresión anterior se conoce como la ecuación de Weibull.

3.1.1.2 Estadísticos básicos de las series de tiempo

Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones $\{x_t\}$ realizadas de forma secuencial, normalmente a intervalos iguales.

Las series anuales pueden ser anuales o periódicas. Estas últimas pueden ser estacionales, mensuales, semanales, diarias u horarias.

Las series de tiempo hidrológicas pueden ser univariadas, como la precipitación o el escurrimiento anual o mensual en una estación de aforos, o multivariadas como la precipitación o escurrimiento anual o mensual en varias estaciones de aforos.

Las series univariadas se describen generalmente a través de sus características estadísticas como la media, desviación estándar, coeficiente de asimetría, coeficiente de curtosis, distribución de probabilidad y de la estructura de dependencia en el tiempo.

a. Media

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

b. Varianza

Sesgada $S^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$

No sesgada $S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$

c. Coeficiente de asimetría

Sesgado $g = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{S^3}$

No sesgado $g = \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{(N-1)(N-2)S^3}$

d. Coeficiente de curtosis

Sesgado $k = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(S^3)^2}$

No sesgado $k = \frac{N^3}{(N-1)(N-2)(N-3)} k_{sesg.}$

e. Autocovarianza

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i-k} - \bar{x})$$

f. Coeficiente de autocorrelación

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i-k} - \bar{x})}{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

3.1.2 Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidad

Conocidos los periodos de retorno correspondientes a cada uno de los datos de una muestra, es posible proceder a la obtención de su distribución de probabilidades y ajustarla a una función.

A continuación se presenta un resumen de algunas de las funciones de distribución de probabilidad que pueden aplicarse a datos de series anuales.

3.1.2.1 Distribución Gumbel

Sea la función de distribución de probabilidad

$$F(x) = \int f(x) dx = e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}}$$

Cuya función de densidad es,

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}}$$

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud
- Momentos – L
- Máxima Entropía

3.1.2.2 Distribución Normal

Sea la función de distribución de probabilidad

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

Cuya función de densidad es,

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

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud
- Momentos – L

Donde para una probabilidad $0 < F(x) \leq 0.5$

$$b_0 = 2.51552$$

$$b_1 = 0.80285$$

$$b_2 = 0.01033$$

$$b_3 = 1.43279$$

$$b_4 = 0.18927$$

$$b_5 = 0.00131$$

$$U_T = V - \frac{b_0 + b_1V + b_2V^2}{1 + b_3V + b_4V^2 + b_5V^3}$$
$$V = \ln \left[\frac{1}{[F(x)]^2} \right]$$

3.1.2.3 Distribución Log – Normal 2p

Cuya función de densidad es,

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

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud

3.1.2.4 Distribución Log – Normal 3p

Su función de densidad es:

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

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud

3.1.2.5 Distribución Gamma 2p

Sea la función de distribución de probabilidad

$$F(x) = \int_0^x \frac{(x^{\beta-1})(e^{-x/\alpha})}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} dx$$

Cuya función de densidad es,

$$f(x) = \frac{(x^{\beta-1})(e^{-x/\alpha})}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)}$$

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud
- Momentos – L

3.1.2.6 Distribución Gamma 3p

Su función de densidad es,

$$f(x) = \frac{1}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} \left(\frac{(x - x_0)^{\beta-1}}{\alpha} \right) \left(e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} \right)$$

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud

3.1.2.7 Distribución General de Valores Extremos (GVE)

Sea la función de probabilidad

$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}}$$

Cuya función de densidad es,

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[1 - \left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \left[1 - \left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)^\beta\right]^{(1/\beta)-1}$$

Y dependiendo del valor de β , se clasifica la distribución en:

- Tipo I, (Gumbel)
- Tipo II, (Fréchet)
- Tipo III, (Weibull)

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud
- Momentos – L

3.1.2.8 Distribución Generalizada Pareto

Sea la función de distribución de probabilidad

$$F(x) = 1 - \left(1 - \frac{\xi(x - \mu)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}$$

Cuya función de densidad es,

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \left(1 - \frac{\xi(x - \mu)}{\sigma}\right)^{\left(-\frac{1}{\xi}-1\right)}$$

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud
- Momentos – L

3.1.2.9 Distribución Uniforme

La función de densidad de esta distribución es,

$$f(x) = \frac{1}{|\beta - \alpha|}$$

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud

3.1.2.10 Distribución Exponencial con parámetro β

Sea la función de probabilidad

$$F(x) = 1 - e^{-\beta x}$$

Cuya función de densidad es,

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

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud

3.1.2.11 Distribución Exponencial con parámetro β y X_0

Sea la función de probabilidad

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{\beta}\right)}$$

Cuya función de densidad es,

$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\beta}\right)}$$

Esta distribución puede estimar sus parámetros por medio de los métodos:

- Momentos
- Máxima Verosimilitud

3.1.3 Extrapolación de Eventos

Para extrapolar eventos para periodos de retorno es importante identificar qué función de distribución de probabilidad es la que se ajusta mejor a los datos por medio del EEA (como se vio en el subcapítulo 2.2.1.6), esta identificación debe realizarse para cada fuente de información, es decir, para cada uno de los registros de las estaciones climatológicas y/o hidrométricas. Posteriormente, será necesario realizar una homogenización de la zona, dicho de otra forma, la extrapolación de eventos dependerá de la función que ajuste mejor los datos de la mayoría de los registros de las estaciones, esto con el fin de mantener uniforme el comportamiento de los datos.

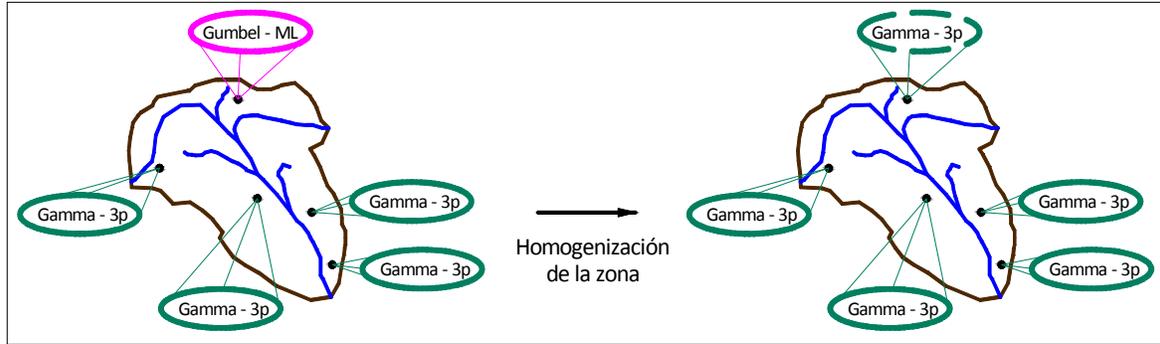


Figura 3.2 Homogenización con la función de distribución de probabilidad

3.2 Construcción de curvas altura de precipitación - duración - periodo de retorno (hp - d - T)

La probabilidad de que se presente una precipitación en un intervalo de tiempo pequeño (corta duración) indica una gran incertidumbre, y ésta aumenta cuando la calidad de los registros no cumple con lo deseado.

Dentro del campo de la Hidrología son conocidos los trabajos realizados por Bell, y antecediendo a él, el *US Weather Bureau* (USWB) obtuvo los coeficientes 0.29, 0.45, 0.57 y 0.79 para las duraciones de 5, 10, 15 y 30 minutos a partir de datos de corta duración de 157 estaciones en EU. Así mismo, *Reich* (1963) obtuvo resultados semejantes con datos de 7 estaciones de Australia.

Por su parte, *Bell*, tomando las extrapolaciones realizadas por el USWB, considerando los periodos de retorno de 50 y 100 años, desarrolló la expresión siguiente:

$$\frac{P_t^T}{P_t^{10}} = 0.21 \ln(T) + 0.52 \quad 2 \leq T \leq 100$$

donde

T periodo de retorno, en años

t duración, en min

P_t^{10} altura de lluvia para una duración t y 10 años de periodo de retorno, en mm

P_t^T altura de lluvia para una duración t y periodo de retorno T años, en mm

Por otro lado, las relaciones precipitación - periodo de retorno pueden ser combinadas con los coeficientes de precipitación - duración; de tal forma que la relación precipitación con la duración es la siguiente:

$$\frac{P_t^T}{P_{60}^T} = 0.54 t^{0.25} - 0.50 \quad 5 \leq t \leq 120 \text{ min}$$

donde

P_{60}^T altura de lluvia para una duración de 60 minutos y periodo de retorno T , en mm

Al realizar la combinación de las expresiones, Bell llegó a la expresión siguiente:

$$P_t^T = [0.21 \ln(T) + 0.52](0.54t^{0.25} - 0.50)P_{60}^T$$

para $2 \leq T \leq 100$ en años y $5 \leq t \leq 120$ en minutos

Con esta expresión es posible estimar la precipitación para duraciones entre 5 minutos y 2 horas; es importante tener en cuenta que esta es una expresión empírica y que requiere del valor de la precipitación con duración de 1 hora y 10 años de periodo de retorno.

Chen propone la ecuación siguiente, con la cual se puede calcular la precipitación para cualquier duración y periodo de retorno.

$$P_t^T = \frac{aP_1^{10} \log[(10^{2-F})(T^{F-1})]}{(t+b)^c} \left(\frac{t}{60}\right)$$

Válida para $T \geq 1$ año y $5 \text{ min} \leq t \leq 24h$

donde

P_t^T precipitación para una duración t y un periodo de retorno T , en mm

T periodo de retorno, en años

t duración, en min

$$F = \frac{P_t^{100}}{P_1^{10}}$$

a, b y c parámetros de la tormenta que varían de acuerdo con el factor de convectividad

$$R = P_1^T / P_{24}^T.$$

Campos (2007), con base en las seis parejas de valores que presenta *Chen (1998)*, propone ecuaciones en función de la relación R para determinar los parámetros a , b , c de la ecuación de *Chen*:

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 + 1,256.228R^3 - 1,028.902R^4$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 + 757.9172R^3 - 598.7461R^4$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 + 29.09596R^3 - 20.06288R^4$$

3.3 Construcción de curvas intensidad - duración - periodo de retorno (I - d - T)

Franco y Domínguez (1982), con información de 23 estaciones ubicadas en el Valle de México, propusieron un método de regionalización para determinar la lluvia de diseño por medio de factores de ajuste por área, duración y periodo de retorno.

Barrios y Domínguez (1986) presentaron una regionalización de precipitaciones máximas en cuencas donde predominan las tormentas tipo convectivo; para este fin utilizaron información de 17 estaciones ubicadas en el río Lerma con duraciones que van desde 15 hasta 240 minutos y periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Concluyeron que los factores de ajuste no dependen del periodo de retorno.

Campos (1990) desarrolló un procedimiento para la obtención de curvas I - d - T a partir de registros pluviométricos partiendo de las formulas de Bell y Chen, y haciendo uso de la relación siguiente:

$$R = \frac{P_1^2}{P_{24}^2}$$

y de la cual recomienda para R:

- valor de 0.479 como valor promedio, tomando como valores extremos 0.204 y 0.646
- varía de 0.40 a 0.60 para regiones áridas y semiáridas, y 0.30 a 0.40 para zonas húmedas
- incrementa a mayor altitud, y viceversa

Lo anterior con el fin de determinar los factores de ajuste particulares a la región y definir las curvas i - d - T.

Otras observaciones indican que la fórmula de Bell funciona para periodos de retorno de 2 y 10 años y duraciones pequeñas; la formula de Chen funciona adecuadamente para periodo de retorno mayores o iguales a 10 años.

Franco y Domínguez (1998) determinaron factores de regionalización en el Valle de México utilizando la función Gamma de 3 parámetros, y tomando los ajustes para la duración de 1 hora, de tal forma que para las duraciones de 30, 60, 120 y 1440 minutos se obtiene un factor de 0.78, 1, 1.17 y 1.52 para los ajustes con periodo de retorno de 10 años; entonces para los periodos de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 1000 los factores obtenidos son 0.69, 0.833, 1, 1.138, 1.234, 1.326, 1.524 y 1.604.

Mendoza (2001) presentó factores de regionalización de lluvias máximas en la República Mexicana a partir de las precipitaciones de 1 y 24 horas usando la relación R con un periodo de retorno de 5 años. Presentó un mapa de las zonas de influencia del factor R, y que se muestran en la figura 3.3.

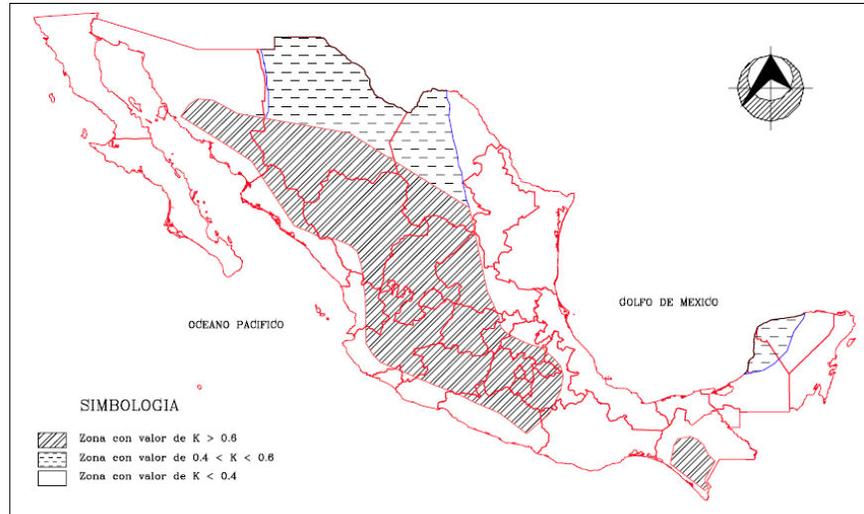


Figura 3.3 Regionalización del factor K, Mendoza (2001)

Baeza (2007) construyó un mapa del factor R para cubrir la parte de la lluvia de 1 hora, utilizando 286 estaciones tomando como criterio utilizar aquellas que cuentan con un mínimo de 15 años de registro; agregó 48 estaciones con sólo 7 años de registro. Partió de un mapa de regionalización de Domínguez (2005) para realizar envoltentes y así proponer su regionalización.

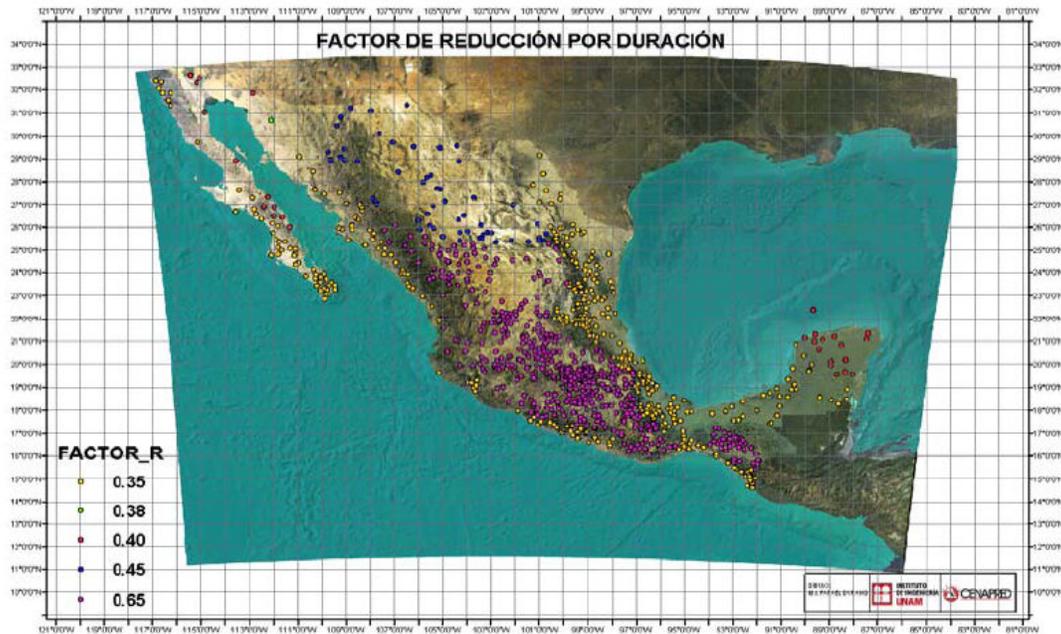


Figura 3.4 Factor de reducción por duración, Domínguez (2005)

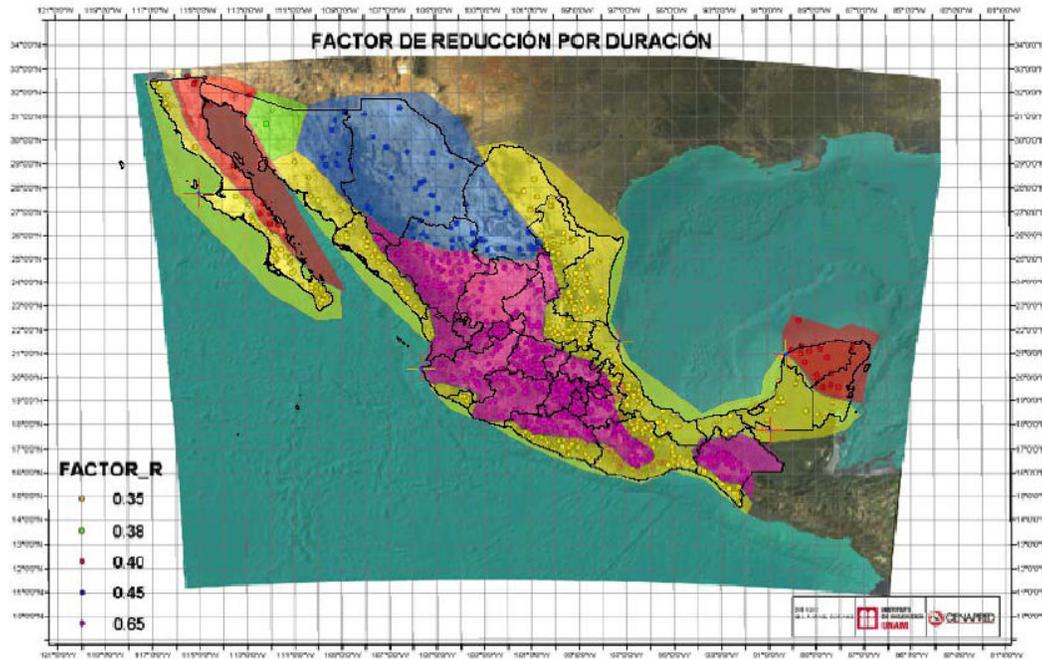


Figura 3.5 Regionalización apoyada en la figura 4.3, Baeza (2007)

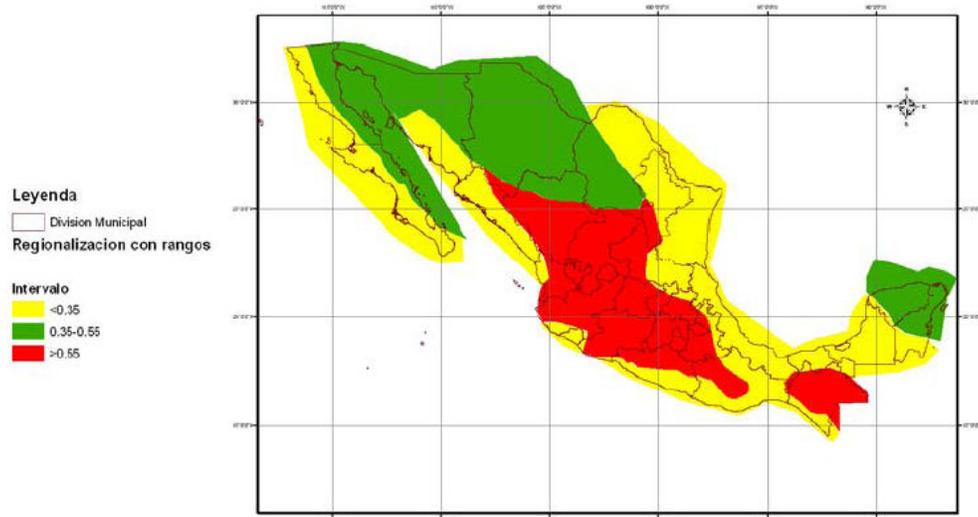


Figura 3.6 Regionalización reducida a tres categorías, Baeza (2007)

3.4 Precipitación media

Para conocer la distribución espacial de la precipitación se requiere del análisis de varias estaciones que hayan registrado la lluvia en una tormenta, de tal manera que pueda obtenerse un valor de precipitación que represente a todas las estaciones involucradas. A continuación se describen los criterios más comunes para determinar la precipitación media.

3.4.1 Criterios para el cálculo de la precipitación media

El cálculo de la precipitación media requiere de datos de varias estaciones ubicadas tanto dentro, como fuera de la zona de estudio. Y para cualquiera de los métodos empleados, el volumen total de la lluvia se obtiene al multiplicar la precipitación media por el área de la cuenca.

i. Promedio Aritmético

Este criterio consiste en realizar la suma de las precipitaciones registradas en las estaciones comprendidas para el estudio y dividirla entre el número de estaciones; si bien este es el criterio más sencillo, es un indicador rápido de la precipitación asociada a una tormenta.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i)}{n}$$

donde

\bar{P} precipitación media, en mm

P_i precipitación registrada en la estación i , en mm

n número total de estaciones

j. Método de Thiessen

Es necesario conocer la ubicación de las estaciones para emplear este criterio, así como delimitar el área de influencia de cada una de ellas. En primer lugar, se trazan triángulos que ligan a las estaciones las cercanas entre sí, en seguida se trazan las mediatrices de los lados de los triángulos; entonces, las áreas delimitadas por los polígonos que rodean cada estación serán las áreas de influencia y para calcular la precipitación media se realiza el promedio pesado de la lluvia con el área de cada estación.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i A_i)}{A}$$

donde

\bar{P} precipitación media, en mm

P_i precipitación registrada en la estación i , en mm

n número total de estaciones

A área total de la zona delimitada, en km^2

A_i área de influencia de la estación i , en km^2

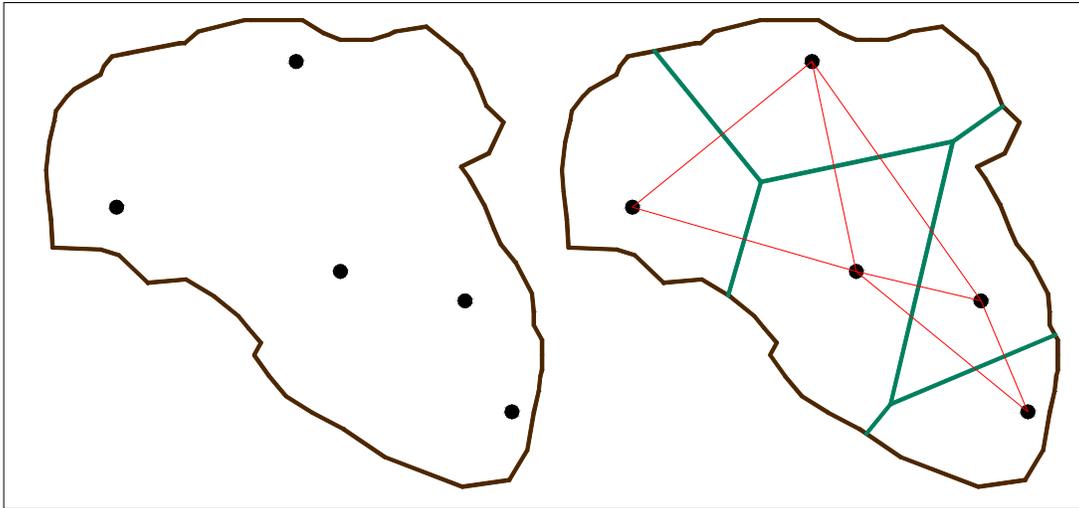


Figura 3.7 Precipitación media. Polígonos de Thiessen

k. Método de las Isoyetas

Para la aplicación de este método se requiere de un mapa de la zona con la ubicación de las estaciones y sus precipitaciones registradas en cada una de ellas, en seguida se trazan las curvas de igual precipitación, *isoyetas*, siguiendo la topografía del terreno.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i A_i)}{A}$$

donde

\bar{P} precipitación media, en mm

P_i precipitación promedio entre dos isoyetas, en mm

n número total de estaciones

A área total de la zona delimitada, en km^2

A_i área limitada entre dos isoyetas consecutivas y el parteaguas de la cuenca, en km^2

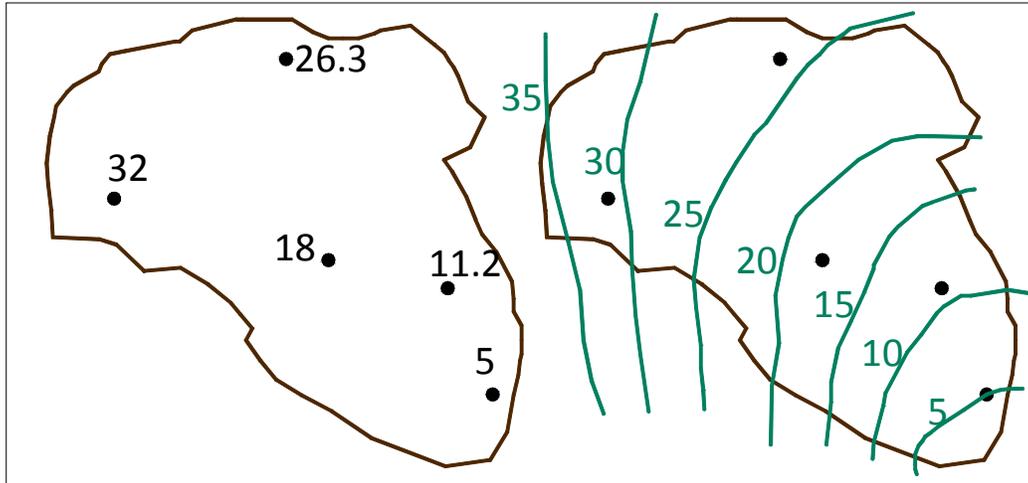


Figura 3.8 Precipitación media. Isoyetas

3.5 Precipitación Efectiva

La precipitación efectiva o lluvia en exceso se define como la porción de la lluvia que contribuye al escurrimiento directo, tanto superficial como subsuperficial rápido. Esa porción de lluvia depende del uso de la tierra, de las condiciones de la superficie, tipo de suelo y de la cantidad y duración de la lluvia.

3.5.1 Número de escurrimiento, N

Es uno de los métodos más empleados para determinar la precipitación en exceso. El número de escurrimiento N depende del uso, tipo y composición del suelo y del tratamiento, pendiente y estado de humedad del terreno. En función de ellos y de la lluvia total se calcula la lluvia efectiva.

De acuerdo con las características propias de la zona de análisis, del uso de suelo y condiciones climáticas se selecciona el valor del número de escurrimiento.

Tabla 3.1 Selección del número N

Uso del suelo o cobertura		Número de curva, para el grupo hidrológico de suelo			
		A	B	C	D
Áreas urbanas completamente desarrolladas (vegetación establecida)					
Césped, espacios abiertos, parques, campos de golf, panteones, etc.					
	Buena condición: cubierta de pasto el 75% o más del área	39	61	74	80
	Condición regular: cubierta de pasto del 50 al 75% del área	49	69	79	84
	Mala condición: cubierta de pasto menos del 50% del área	68	79	86	89
Lotes de estacionamiento pavimentados, techados, entrada de autos, etc.		98	98	98	98
Calles y caminos					
	Pavimentados con banquetas y drenaje de aguas pluviales	98	98	98	98
	De grava	76	85	89	91
	De terracería	72	82	87	89
	Pavimentados con cunetas (porcentaje promedio de impermeabilidad)	83	89	92	93
Áreas comerciales y de negocios (85%)		89	92	94	95
Zonas industriales (72%)		81	88	91	93
Rancherías, pueblos y zonas urbanas con lotes de 500 m ² o menos (65%)		77	85	90	92
Residencial : tamaño promedio del lote y área impermeable (%)					
1000 m ²	38	61	75	83	87
1300 m ²	30	57	72	81	86
2000 m ²	25	54	70	80	85
4000 m ²	20	51	68	79	84
8000 m ²	12	46	65	77	82
Áreas urbanas en desarrollo (vegetación no establecida)		77	86	91	94

Selección del número N, (cont.)

Cobertura			Número de curva para el grupo hidrológico de suelo			
Uso del suelo	práctica de tratamiento	Condición hidrológica	A	B	C	D
Suelo agrícola cultivado						
Barbechado	-Hileras rectas		77	86	91	94
	-Cultivo de conservación	Mala	76	85	90	93
		Buena	74	83	88	90
Cultivos en hileras	-Hileras en línea recta	Mala	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	-Cultivo de conservación	Mala	71	80	87	90
		Buena	64	75	82	85
	-En contorno	Mala	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	-En contorno y cultivo de conserv.	Mala	69	78	83	87
		Buena	64	74	81	85
	-En contorno y terrazas	Mala	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
	-En contorno y terrazas, cult. de conservación	Mala	65	73	79	81
		Buena	61	70	77	80
Granos pequeños	-Hileras en línea recta	Mala	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	-Cultivo de conservación	Mala	64	75	83	86
		Buena	60	72	80	84
	-En contorno	Mala	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	-En contorno y cultivo de conserv.	Mala	62	73	81	84
		Buena	60	72	80	83
	-En contorno y terrazas	Mala	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
	-En contorno y terrazas, cultivos de conservación	Mala	60	71	78	81
		Buena	58	69	77	80
Siembra densa leguminosas o praderas con rotación	-Hileras en línea recta	Mala	66	77	85	89
		Buena	58	72	81	85
	-Cultivo de conservación	Mala	64	75	83	85
		Buena	55	69	78	83
	-En contorno	Mala	63	73	80	83
		Buena	51	67	76	80

Selección del número N, (cont.)

Cobertura			Número de curva para el grupo hidrológico de suelo			
Uso del suelo	práctica de tratamiento	Condición hidrológica	A	B	C	D
Suelo agrícola no cultivado						
-Hierba o pasto	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	En contorno	Mala	47	67	81	88
		Regular	25	59	75	83
		Buena	6	35	70	79
-Praderas			30	58	71	78
-Áreas forestales pastos o huertos, perennes o caducifolios		Mala	55	73	82	86
		Regular	44	65	76	82
		Buena	32	58	72	79
-Matorral, maleza		Mala	48	67	77	83
		Buena	20	48	65	73
-Bosques		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
-Granjas			59	74	82	86
-Forestal- pasto, Herbáceas		Mala		79	86	92
		Regular		71	80	89
		Buena		61	74	84
-Robles- álamos		Mala		65	74	
		Regular		47	57	
		Buena		30	41	
-Enebro-pasto		Mala		72	83	
		Regular		58	73	
		Buena		41	61	

Tabla 3.2. Clasificación del tipo de suelo

Tipo	Descripción
A	Arenas con poco limo y arcilla (escurrimiento mínimo)
B	Arenas finas y limos
C	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo)

Es necesario corregir el valor de N dependiendo del contenido de humedad antecedente, multiplicándolo por el factor correspondiente a la precipitación antecedente que se muestra en la Tabla 3.3, de la manera siguiente:

Si 5 días antes hubo lluvia	[menos de 2.5 cm	Corrección A
		entre 2.5 y 5 cm	Sin corrección
		más de 5 cm	Corrección B

Tabla 3.3 Factores de corrección del número de escurrimiento N, según la precipitación antecedente

N	Corrección A	Corrección B
10	0.40	2.22
20	0.45	1.85
30	0.50	1.67
40	0.55	1.50
50	0.62	1.40
60	0.67	1.30
70	0.73	1.21
80	0.79	1.14
90	0.87	1.07
100	1.00	1.00

3.5.2 Coeficiente de escurrimiento, C_e

La aplicación del coeficiente de escurrimiento, C_e , supone que las pérdidas son proporcionales a la intensidad de lluvia. Este coeficiente puede obtenerse con la expresión siguiente:

$$V_{ed} = C_e V_u$$

o bien

$$C_e = \frac{V_{ed}}{V_u}$$

donde

V_{ed} volumen de escurrimiento directo, en m^3

V_{ll} volumen total llovido, en m^3

C_e coeficiente de escurrimiento

Este coeficiente representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa y es posible estimarlo con el cociente del volumen de escurrimiento directo entre el volumen de escurrimiento total y se definirá el periodo de retorno al que corresponde la tormenta.

Tabla 3.4 Coeficiente de escurrimiento según el tipo de suelo

Características que producen el escurrimiento				
Designación de las características de la cuenca	100 Extremo	75 Alto	50 Normal	25 Bajo
Relieve	(40) Escarpado, terreno abrupto con pendiente en promedio	(30) Montañoso con pendiente promedio de 10 a 30%	(20) Lomerío con pendiente promedio de 5 a 10%	(10) Superficie relativamente plana con pendiente promedio de 0 a 5 %
Infiltración en el suelo	(20) Cubierta no efectiva, roca a suelo fino con capacidad de infiltración despreciable	(15) Lento para infiltrar el agua, arcilla u otro suelo con capacidad de infiltración baja	(10) Normal, capacidad de infiltración semejante a la pampa, suelos limosos profundos	(5) Alta, arenas profundas en otro tipo de suelo que toma el agua rápidamente
Cubierta vegetal	(20) Cubierta con efecto de intercepción, cubierta llena o escarpada	(15) De pobre a regular, cultivos nuevos, en tiempo de cosecha a cubiertas pobres menores al 10% de áreas de drenaje con buena cubierta	(10) De regular a buena, aproximadamente el 50% del área de drenaje en pastizales, bosques a cubierta equivalente no mayores al 50% en áreas de cosecha a cultivos nuevos	(5) De buena a excelente, aproximadamente del 90% de áreas de drenaje en pastizales, bosques a cubierta equivalente
Almacenaje	(20) Despreciable: pocas depresiones superficiales y poco profundas, corrientes escarpadas y pequeñas, sin estanques y pantanos	(15) Baja: un sistema bien definido de pequeñas corrientes sin estanques y pantanos	(10) Normal: considerables depresiones superficiales de almacenaje, sistemas de drenaje parecidos a las arenas típicas de la pampa, lagos, estanques y pantanos menores al 2% del área de drenaje	(5) Alto: grandes depresiones superficiales de almacenaje, sistemas de drenaje muy bien definidos, plano amplio de la avenida de almacenamiento a un gran número de lagos, pantanos o estanques

3.5.3 Índice de infiltración, Φ

Aplicar este procedimiento requiere de la determinación del escurrimiento base, una vez que se cuenta con ello se puede obtener la precipitación efectiva, entonces se ajusta una recta de pendiente cero en el hietograma de la tormenta, cuya ordenada sea tal que la parte superior de la división de las barras que se forman en el hietograma, sumen la precipitación efectiva de la tormenta y así se determina el índice de infiltración media, así

$$P_e = \frac{V_{ed}}{A_c}$$

donde

P_e precipitación efectiva, en mm

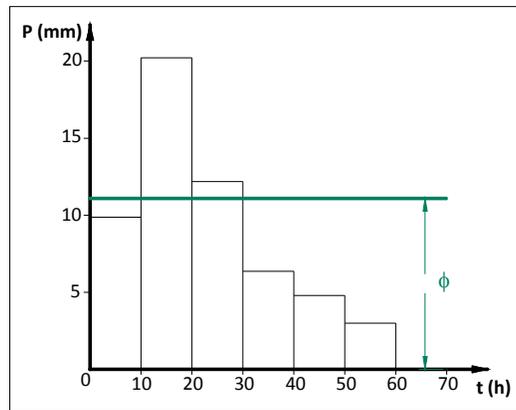


Figura 3.9 Índice de infiltración media

3.6 Hietogramas de precipitación de diseño utilizando las relaciones I - d - T

Muchos métodos no hacen consideraciones sobre el tiempo de distribución del hidrograma o sobre la distribución en el tiempo de la precipitación. Sin embargo, métodos recientes utilizan el análisis de flujo no permanente y para ello requieren de predicciones confiables del hietograma de diseño.

3.6.1 Método del bloque alterno

Este método es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando la curva I - d - T. El hietograma de diseño que produce este método especifica la altura de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de $T_d = n\Delta t$. Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída en la curva I - d - T para cada una de las duraciones $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$, y la altura de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencias entre los valores sucesivos de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de

modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida T_d y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño

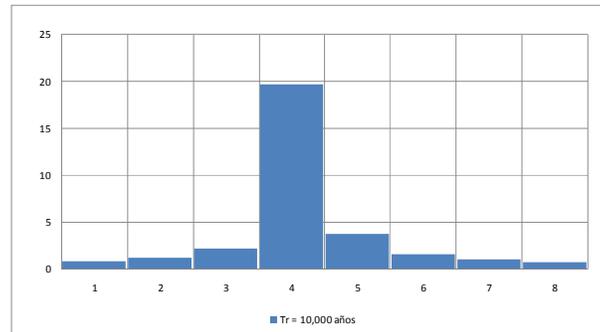


Figura 3.10 Hietograma de diseño con el método de bloque alterno

3.7 Relación Lluvia – Esguerrimiento

Para conocer el gasto de diseño de operación de las obras hidráulicas se requiere de datos de esguerrimiento en el lugar donde ellas están localizadas.

En ocasiones, no se cuenta con información, o bien, hay cambios en las condiciones de drenaje de la cuenca, lo que provoca que los datos de gasto recabados antes de los cambios no sean útiles.

Por estas razones, se han propuesto procedimientos para determinar esguerrimientos a partir de la precipitación que los origina. A estos procedimientos se les conoce como modelos de precipitación – esguerrimiento. Para su estudio se les puede clasificar, de acuerdo con la información que requieren para su aplicación, de la manera siguiente:

Modelos empíricos

Son de dos tipos, en uno se necesita para su aplicación únicamente de las características fisiográficas de la cuenca donde está la corriente de interés (Método de envolventes); y el otro, además de las características fisiográficas, se usan datos de precipitación (Formula Racional).

3.7.1 Hidrograma Unitario, HU

El hidrograma unitario, HU, se define como el hidrograma de esguerrimiento directo, producido por 1mm de precipitación efectiva, que cae con intensidad uniforme sobre la cuenca durante un tiempo conocido como duración en exceso.

3.7.1.1 Tradicional

El HU tradicional supone que las precipitaciones con una misma duración y distribución espacial producen hidrogramas unitarios semejantes. De esta manera resulta que las ordenadas del hidrograma son proporcionales al volumen de esguerrimiento directo.

El área bajo la curva del HU es el volumen de escurrimiento directo de este hidrograma, el cual debe ser igual al área de la cuenca por 1mm de lluvia efectiva. No toma en cuenta la variación de la intensidad de la lluvia con respecto al tiempo.

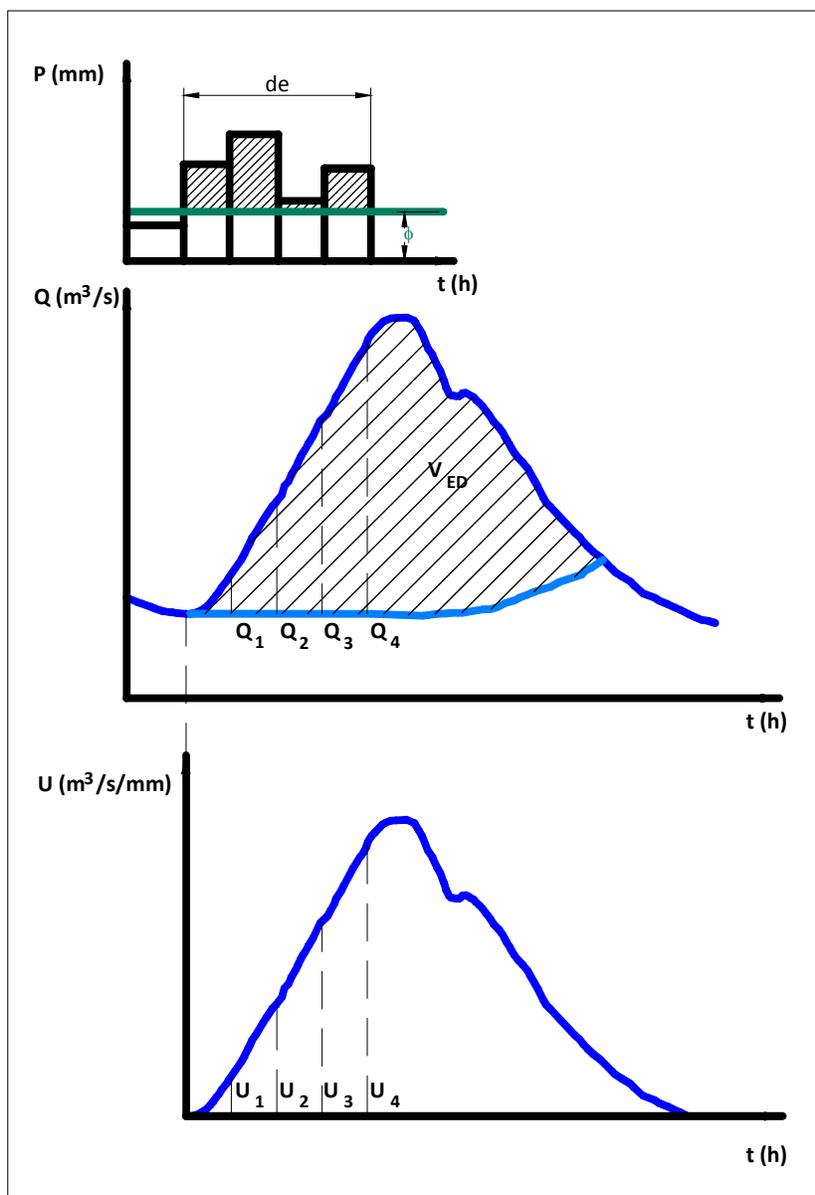


Figura 3.11 Hidrograma Unitario Tradicional

3.7.1.2 Instantáneo

El hidrograma unitario instáneo, HUI, permite tomar en cuenta la distribución de la lluvia en el tiempo.

Sea el hidrograma unitario para una duración en exceso d_e mostrado en la Figura 3.12a. Si se presenta una tormenta como la mostrada en la Figura 3.12b, con varios periodos lluviosos, cada uno de ellos de duración en exceso d_e , entonces, de acuerdo con el principio de superposición de causas y efectos, los hidrogramas producidos por cada barra serán los mostrados en la Figura 3.12c, d e e, y el hidrograma de la tormenta completa será el mostrado en la Figura 3.12f.

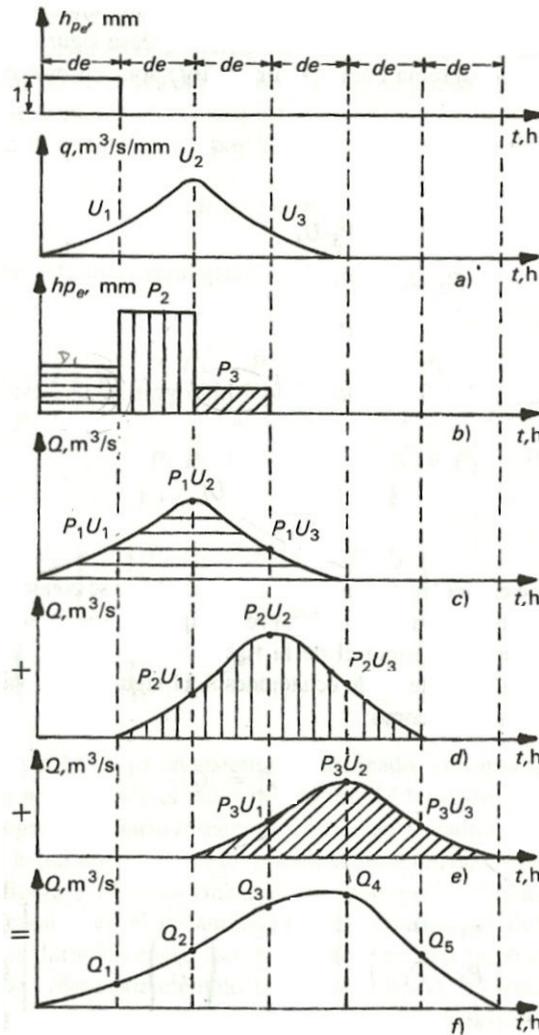


Figura 3.12 Superposición de causas y efectos

Así, si U_i es la i -ésima ordenada del hidrograma unitario y P_j es la j -ésima lluvia del hietograma, de manera general, la k -ésima ordenada del hidrograma, Q_k , es:

$$Q_k = \sum_{j=1}^n P_j U_{k-j+1}$$

Considérese el problema inverso, es decir, en el que se conoce el hidrograma y la precipitación y se desea conocer el hidrograma unitario. El sistema de ecuaciones que se genera con la expresión anterior sigue siendo válido y puede escribirse como:

$$P\{U\} = \{Q\}$$

La incógnita es entonces el vector $\{U\}$. Sin embargo, el sistema de ecuaciones tendría un número diferente de incógnitas con respecto al número de ecuaciones, por lo que el sistema es indeterminado y no existen valores de $\{U\}$ que satisfagan simultáneamente las ecuaciones. Así, para tener una solución del sistema es necesario aceptar un error en cada uno de los componentes de $\{U\}$; tratando de que éste sea el mínimo posible. Se puede demostrar que se comete el mínimo error posible en los valores de $\{U\}$ al multiplicar por la matriz transpuesta de P:

$$P^T P\{U\} = P^T\{Q\}$$

Con esta expresión se obtiene un sistema determinado con solución única. El número de ordenadas del hidrograma final N_Q está ligado con el número de barras del hidrograma N_p , y al número de ordenadas del hidrograma unitario N_u por medio de la ecuación:

$$N_Q = N_p + N_u - 1$$

Conviene destacar que para ciertas circunstancias, la solución del sistema produce algunas ordenadas negativas del hidrograma unitario. Aunque existen procedimientos de optimización que evitan este tipo de problemas, desde el punto de vista práctico puede ser suficiente obligar a que dichas ordenadas sean nulas, corrigiendo en consecuencia el volumen del hidrograma unitario, pero respetando el valor del pico.

3.7.1.3 Sintético

Resulta muy común que no se cuente con al menos una estación hidrométrica o con datos pluviográficos necesarios. Sin embargo, para obtener un hidrograma unitario se han desarrollado métodos que permiten obtenerlos con, únicamente, características generales, que son denominados *sintéticos*.

1. Método de Chow

Chow desarrolló este método para calcular el gasto pico de hidrogramas de diseño para estructuras pequeñas de drenaje en cuencas pequeñas; de tal manera que obtuvo la expresión siguiente:

$$Q_p = q_p P_e$$

donde

Q_p gasto pico del hidrograma de escurrimiento directo

P_e la altura de la precipitación efectiva

q_p gasto pico del hidrograma unitario

2. Hidrograma Unitario Triangular

En 1957, Mockus desarrolló un hidrograma unitario sintético de forma triangular, Figura 3.13:

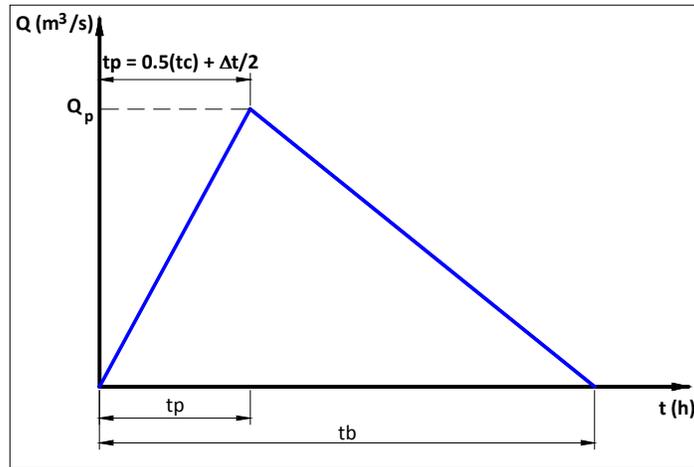


Figura 3.13 Hidrograma Unitario Sintético Triangular

De la geometría de este hidrograma se obtienen las expresiones siguientes.

Para cuencas grandes

$$q_p = \frac{0.555A_c}{2.67(\sqrt{t_c} + 0.6t_c)}$$

$$t_p = \sqrt{t_c} + 0.6t_c$$

$$d_e = 2\sqrt{t_c}$$

Para cuencas pequeñas

$$q_p = 0.189 \frac{A_c}{t_c}$$

$$t_p = \frac{t_c}{2} + 0.6t_c$$

$$d_e = t_c$$

Para cualquier área

$$t_r = 0.6t_c \quad \text{o} \quad t_r = 0.005 \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.64}$$

Formula de Kirpich

$$t_c = 0.000325 \left[\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right]$$

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r$$

$$t_b = 2.67t_p$$

3. Hidrograma Unitario Adimensional (Método del SCS)

A partir de varios hidrogramas registrados en varias cuencas se obtuvo un hidrograma unitario adimensional, con el cual sólo se requiere el producto de las ordenadas por el gasto pico y las abscisas por el tiempo de pico. Este hidrograma se propone utilizar cuando la extensión de la curva de recesión del hidrograma afecta al diseño. Ver Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Hidrograma Unitario Sintético Adimensional

HU ADIM SCS	
t/tp	q/qp
0.00	0.00
0.10	0.03
0.30	0.19
0.40	0.31
0.60	0.66
0.70	0.82
0.80	0.93
0.90	0.99
1.00	1.00
1.10	0.99
1.20	0.93
1.30	0.86
1.50	0.68
1.70	0.46
1.90	0.33
2.20	0.21
2.60	0.11
3.20	0.04
5.00	0.00

HIDROGRAMA UNITARIO ADIMENSIONAL

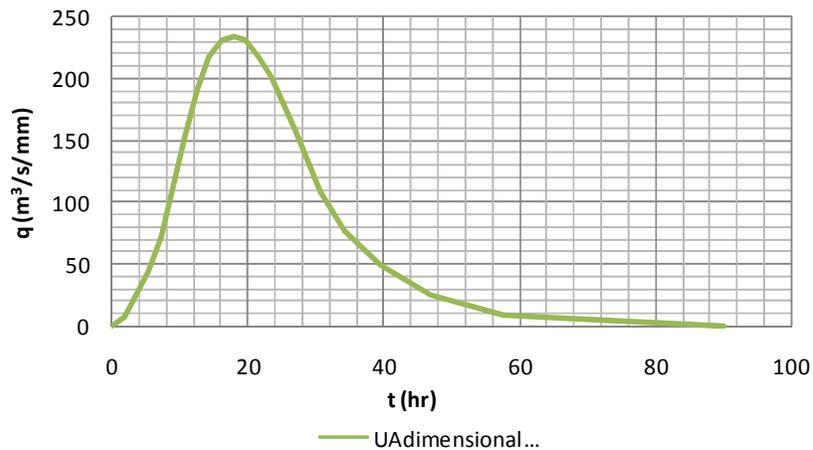


Figura 3.14 Hidrograma Unitario Sintético Adimensional

3.8 Comportamiento del flujo en la cuenca

Generalmente, los objetivos de los análisis hidrológicos se enfocan en el diseño o revisión del comportamiento de obras que permitan controlar el agua para aprovecharla o evitar daños a las comunidades; por ello es muy importante establecer el tipo de análisis que debe llevarse a cabo, es decir que, para el caso de diseño es importante definir el sitio y estudiar varias alternativas para obtener la solución. Por ejemplo, para el diseño de una presa, cuando se tiene totalmente definido el sitio es indispensable estimar el volumen útil y el NAMO y para ello debe contarse con la topografía y los registros hidrológicos. Para una revisión de una presa deberán actualizarse los registros hidrológicos y hacer funcionamientos de vaso a largo plazo.

3.8.1 Análisis del comportamiento de obras existentes en la cuenca

3.8.1.1 Transito de avenidas en la obra de excedencias

Para realizar el tránsito de avenidas en la obra de excedencias de un vaso de almacenamiento se emplea la ecuación de continuidad:

$$I - O = \frac{dV}{dt}$$

donde

- I gasto de entrada, en m³/s
- O gasto de salida por la obra de excedencias, en m³/s
- V volumen de almacenamiento, en m³
- t tiempo, en s.

Esta ecuación puede expresarse en diferencias finitas de la manera siguiente:

$$\frac{I_i + I_{i+1}}{2} - \frac{O_i + O_{i+1}}{2} = \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t}$$

donde

Δt intervalo de tiempo, en seg

$i, i+1$ subíndices que representan los valores de las variables en el tiempo $t = i\Delta t$ y $t = (i + 1)\Delta t$, respectivamente

Se recomienda utilizar $\Delta t \leq 0.1(t_p)$, (Aparicio, 2001).

Las variables O y V son conocidas en $t = i\Delta t$, e I en todo el tiempo puesto que es el hidrograma de entrada, conviene reescribir la expresión anterior de la manera siguiente:

$$I_i + I_{i+1} + \left(\frac{2V_i}{\Delta t} - O_i \right) = \frac{2V_{i+1}}{\Delta t} + O_{i+1}$$

Para relacionar la elevación del agua con el volumen se requiere de las curvas de elevaciones-capacidades y elevaciones-descargas, ver Figura 3.15.

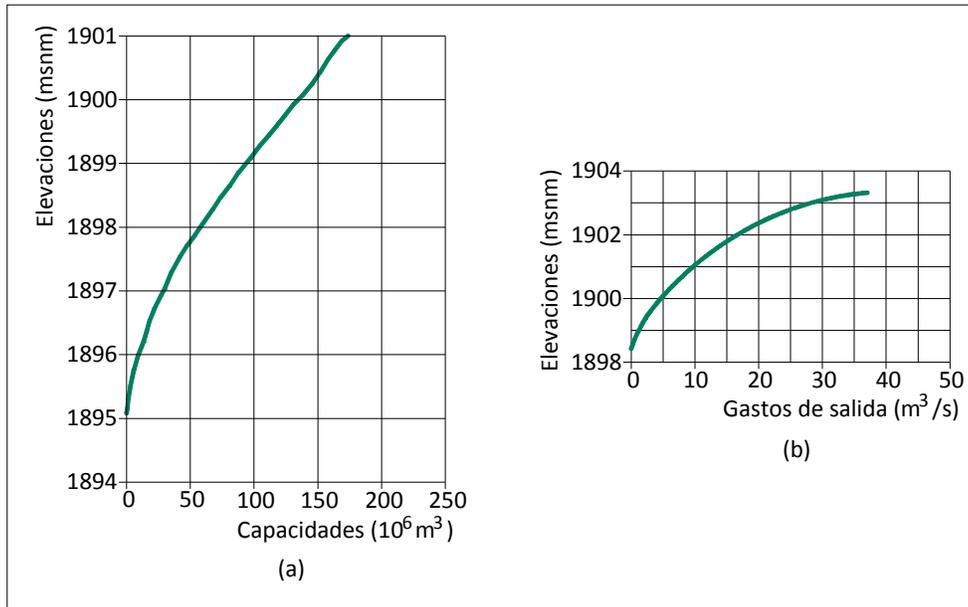


Figura 3.15 Curvas Elevaciones – Capacidades – Descargas

Debido a que la mayoría de las veces, las salidas por la obra de toma son muy pequeñas comparadas con las descargas por la obra de excedencias, no se consideran en el tránsito de avenidas. Dependiendo de la geometría del vertedor, los gastos de salida se calcularán con la ecuación adecuada, generalmente son de sección rectangular, cuya ecuación se expresa de la manera siguiente:

$$Q = CLH^{3/2}$$

donde

- C coeficiente de descarga en función de la carga sobre el vertedor, en $m^{1/2}/s$
L longitud de la cresta del vertedor, en m
H carga sobre la cresta del vertedor, en m

Cuando la descarga del vertedor es controlada, la relación elevaciones – gastos será definida por las políticas de operación fijadas por las compuertas.

A continuación se describe un método numérico del tipo predictor – corrector (Fuentes y Martínez, 1988) para resolver el tránsito de avenidas a través de la obra de excedencias:

1. Se evalúa $I_i + I_{i+1} + \left(\frac{2V_i}{\Delta t} - O_i\right)$, dado que son variables conocidas
2. Se propone que $O_{i+1} = O_i$
3. Se calcula V_{i+1}
4. Para el valor de V_{i+1} se obtiene la elevación E_{i+1} correspondiente de acuerdo con la curva elevaciones – capacidades
5. A partir de E_{i+1} es posible determinar la descarga O_{i+1} con la curva elevaciones – gastos
6. Se compara el valor de O_{i+1} propuesto con el obtenido en el punto anterior, si son aproximadamente iguales, es posible continuar con el proceso, de lo contrario, con el valor obtenido en el punto 5 se repetirá el procedimiento desde el punto 3
7. Para el tiempo siguiente, se toma $I_{i+1} = I_i$, $O_{i+1} = O_i$, $V_{i+1} = V_i$ y se inicia del procedimiento desde el paso 1

Es recomendable que el error o variación entre los valores de O_{i+1} sean menores al 10%, incluso se ha observado que al repetir el proceso en 3 ocasiones de los pasos 3 al 6, resulta posible obtener una aproximación menor al 1%.

3.8.1.2 Funcionamiento de vaso

En muchas ocasiones, el volumen útil de un vaso de almacenamiento puede variar debido a los cambios en las condiciones climáticas y a la variación del aporte de sedimentos aumentando el volumen de azolve, etc.

Sin embargo, en una cuenca con escasa información hidrométrica resulta complicado obtener la información actualizada para determinar los cambios en los patrones de escurrimientos; mas la necesidad de estimar la variación de estos volúmenes nos lleva a utilizar herramientas que nos proporcionen resultados semejantes a los que podríamos obtener si existiera la información.

En este trabajo se propone generar volúmenes de entrada al vaso de almacenamiento por medio de *generación sintética* utilizando, únicamente, registros de lluvia acumulada mensualmente en las estaciones de influencia en la cuenca en la que se encuentra la presa. A continuación se describe la metodología referente a este problema.

3.8.1.3 Generación Sintética de Ecurrimientos Mensuales para un Funcionamiento de Vaso en una cuenca con información escasa

Análisis de las series de tiempo

Las series a modelar deben tener una distribución Normal ($g = 0, k = 3$). Si esto no se cumple, se debe emplear el proceso *Box – Cox*.

$$y_t = \frac{x_t^\lambda - 1}{\lambda}$$

$$y_t = \text{Ln}(x_t)$$

donde

λ parámetro de transformación de potencia

x_t^λ dato t del registro

y_t registro normalizado

Las series además deben estandarizarse como se muestra a continuación:

$$Z_t = y_t - \bar{y}$$

$$Z_t = \frac{y_t - \bar{y}}{S_y}$$

Generalmente, la primera expresión se utiliza para series anuales, mientras que la segunda expresión se utiliza para series de datos periódicos o multivariados.

I. Modelos Autorregresivos

Los modelos de este tipo son utilizados para describir y predecir el comportamiento de series de tiempo, tal y como el caso de las lluvias acumuladas mensualmente.

1. Modelos Autorregresivos Periódicos, PAR(p)

- a. Con coeficientes constantes

La serie de los datos mensuales se ordenan por año, es decir que los meses del segundo año del registro se ubicarán enseguida de los 12 meses del primer año.

Para la obtención de los parámetros, se utilizan los criterios empleados para la serie anual, los coeficientes autorregresivos se obtienen con las expresiones siguientes:

$$\hat{\phi}_1 = \frac{\hat{r}_1(1 - \hat{r}_2)}{1 - \hat{r}_1^2}$$

$$\hat{\phi}_2 = \frac{(\hat{r}_2 - \hat{r}_1^2)}{1 - \hat{r}_1^2}$$

donde

$\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2$ parámetros autorregresivos

\hat{r}_1, \hat{r}_2 estimadores del valor proporcional

Las varianzas se relacionan de la manera siguiente:

$$\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = \frac{\hat{\sigma}_y^2(1 + \hat{\phi}_2)^2}{(1 - \hat{\phi}_2)} \left[(1 - \hat{\phi}_2)^2 - \hat{\phi}_1^2 \right]$$

donde

$\hat{\sigma}_\varepsilon^2$ varianza de los residuales

$\hat{\sigma}_y^2$ varianza de la serie normalizada y_t

b. Con coeficientes periódicos

Serie periódica con coeficientes periódicos

$$Z_{v,\tau} = \phi_{1,\tau} Z_{v,\tau-1} + \sigma_{\varepsilon,\tau} \xi_{v,\tau}$$

$$Z_{v,\tau} = \phi_{1,\tau} Z_{v,\tau-1} + \phi_{2,\tau} Z_{v,\tau-2} + \sigma_{\varepsilon,\tau} \xi_{v,\tau}$$

donde

$\phi_{j,\tau}$ coeficiente autoregresivo periódico

$\sigma_{\varepsilon,\tau}$ desviación estándar de la serie de residuales $\xi_{v,\tau}$

$\xi_{v,\tau}$ serie con distribución Normal estándar $E[\xi_{v,\tau}] = 0$ y $Var(\xi_{v,\tau}) = 1$

$Z_{v,\tau}$ serie estandarizada $E[Z_{v,\tau}] = 0$ y $Var(Z_{v,\tau}) = 1$

Para un PAR(1)

$$\hat{\phi}_{1,\tau} = \hat{r}_{1,\tau}; \quad \tau = 1, 2, \dots, \omega$$

Las varianzas

$$\sigma_{\varepsilon,\tau}^2 = (1 - \phi_{1,\tau}^2)$$

Para un PAR(2)

$$\hat{\phi}_{1,\tau} = \frac{\hat{\rho}_{1,\tau} - \hat{\rho}_{1,\tau-1}\hat{\rho}_{2,\tau}}{1 - \rho_{1,\tau-1}^2}; \quad \tau = 1, 2, \dots, \omega$$

$$\hat{\phi}_{2,\tau} = \frac{\hat{\rho}_{2,\tau} - \hat{\rho}_{1,\tau}\hat{\rho}_{1,\tau-1}}{1 - \rho_{1,\tau-1}^2}; \quad \tau = 1, 2, \dots, \omega$$

donde

ρ_{τ} coeficiente de autocorrelación serial de la variable y_t

$\rho_{j,\tau}$ coeficiente de autocorrelación serial de la variable $y_{v,t}$

τ periodos

si $\tau - k < 1$

$$r_{k,\tau} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{v=2}^N (x_{v,\tau} - \bar{x})(x_{v-1,\omega+\tau-k} - \bar{x}_{\omega+\tau-k})}{S_{\tau} S_{\omega+\tau-k}}$$

donde

N número de años que componen la serie

$r_{k,\tau}$ estimador del coeficiente de autocorrelación serial poblacional $\rho_{j,\tau}$

ω número de periodos totales

v años

k tiempo de retraso

si $\tau - k \geq 1$

$$r_{k,\tau} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{v=2}^N (x_{v,\tau} - \bar{x})(x_{v-1,\omega-k} - \bar{x}_{\tau-k})}{S_{\tau} S_{\tau-k}}$$

Las varianzas se obtienen de:

$$\sigma_{\varepsilon,\tau}^2 = 1 - \phi_{1,\tau}^2 - \phi_{2,\tau}^2$$

Selección del modelo PAR(p)

Para seleccionar al modelo adecuado, es decir aquel que describe el comportamiento de la serie de tiempo se utiliza el *Criterio de Información de Akaike, CIA (1974)*.

Dentro de las opciones que se manejen en el modelado, la mejor opción será aquella que proporcione el mínimo valor de CIA.

$$CIA = N \ln(\hat{\sigma}_{\varepsilon,\tau}^2) + 2(p + q)$$

donde

- N número de datos que componen la serie
- p orden del modelo autoregresivo
- q número de parámetros

Generación de Números Aleatorios por Box – Muller (1985)

Este método consiste en proponer números μ_1 y μ_2 con distribución en el intervalo (0,1) y sustituirlos en las siguientes expresiones. Este procedimiento calcula números aleatorios con distribución Normal estándar por parejas y se deberá realizar tantas veces como el tamaño de muestra deseado.

$$\xi_1 = \left[2 \ln \left(\frac{1}{\mu_1} \right) \right]^{1/2} \cos(2\pi\mu_2)$$

$$\xi_2 = \left[2 \ln \left(\frac{1}{\mu_1} \right) \right]^{1/2} \sen(2\pi\mu_2)$$

donde

- ξ_1, ξ_2 números aleatorios con distribución normal estándar

μ_1, μ_2 números aleatorios con distribución uniforme $\{0,1\}$

2. Modelos ARMA(p,q)

ARMA (1,1)

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1}$$

$$\varepsilon_t = Z_t - \phi_1 Z_{t-1} + \theta_1 \varepsilon_{t-1}$$

ARMA (1,2)

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2}$$

ARMA (2,1)

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} - \phi_2 Z_{t-2} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1}$$

ARMA (2,2)

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} - \phi_2 Z_{t-2} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2}$$

Parámetros para los procesos MA(q)

a. Para un MA(1)

$$\widehat{\sigma_\varepsilon^2} = \frac{C_0}{1 + \widehat{\theta}_1}$$

$$\widehat{\theta}_1 = -\frac{C_1}{\widehat{\sigma_\varepsilon^2}}$$

a. Para un MA(2)

$$\widehat{\sigma_\varepsilon^2} = \frac{C_0}{1 + \widehat{\theta}_1^2 + \widehat{\theta}_2^2}$$

$$\widehat{\theta}_2 = -\frac{C_2}{\widehat{\sigma_\varepsilon^2}}$$

$$\widehat{\theta}_1 = -\left(\frac{C_1}{\widehat{\sigma_\varepsilon^2}} - \widehat{\theta}_1 \widehat{\theta}_2\right)$$

De tal forma que,

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})$$

Para $0 \leq k \leq n$.

donde

C_k covarianza de los residuales

Posteriormente a la generación sintética mensual de registros de lluvia, estos datos deberán ser multiplicados por el área de la cuenca en la que se encuentra el vaso de almacenamiento. Adicionalmente, este resultado también será afectado por el efecto de la evapotranspiración, así como de infiltración, en porcentaje. Con el procedimiento descrito se tienen las entradas por cuenca propia a la cuenca.

Funcionamiento de Vaso

En un intervalo de tiempo Δt , la ecuación de continuidad, que es la ecuación fundamental para simular el funcionamiento de vasos, se expresa de la manera siguiente:

$$X - D = \Delta V$$

donde

X volumen de entradas al vaso durante el intervalo Δt

D volumen de salidas del vaso para el mismo intervalo de tiempo Δt

ΔV variación de volumen almacenado en el vaso para el Δt

Generalmente, el valor del intervalo Δt se usa de un mes, sin embargo, cuando se tiene un vaso muy grande y sus efectos de regulación afectan periodos de varios años, el valor de Δt puede ser de meses; por el contrario, el Δt se puede reducir hasta intervalos de semanas e incluso días cuando la capacidad de regulación de un vaso es poca.

1. Entradas al vaso

Las entradas a un vaso son:

$$X = E_{cp} + E_t + E_{ll}$$

donde

E_{cp}	entradas por cuenca propia
E_t	entradas por transferencia de otras cuencas
E_{ll}	entradas por lluvia directa sobre el vaso

Entradas por cuenca propia, E_{cp}

Se llaman entradas por cuenca propia a los volúmenes de escurrimiento superficial generados en la cuenca que descarga directamente a la presa. Éstas se obtienen a partir de los datos proporcionados por las estaciones hidrométricas de la zona. Se considera ideal, tener información hidrométrica justo en la zona exacta en la que se va a construir la presa; sin embargo, muchas veces no hay tal información; ante este problema se ve la necesidad de extrapolar información de las estaciones vecinas. Para este trabajo, se propone generar sintéticamente registros a partir de la información pluviométrica de las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca.

Entradas por lluvia transferencia de otras cuencas, E_t

Este tipo de entradas se presentan cuando existen descargas, ya sean libres o controladas de presas situadas aguas arriba de la presa de análisis o en otras cuencas. Estas entradas siempre serán conocidas.

Entradas por lluvia directa sobre el vaso, E_{ll}

Para determinar las entradas por lluvia directa, las alturas de lluvia deberán ser representadas en volumen de lluvia, este volumen se calcula multiplicando la altura de precipitación por el área que tenga la superficie libre del vaso, es decir:

$$E_{ll} = hp\bar{A}$$

donde \bar{A} es el área promedio del vaso en el Δt .

2. Salidas del vaso

$$D = S_D + S_e + S_i + S_{de}$$

donde

S_D	volumen extraído para satisfacer la demanda
S_e	volumen evaporado

S_i volumen que se infiltra en el vaso

S_{de} volumen que se derrama

Volumen extraído para satisfacer la demanda, S_D

Este volumen dependerá del tipo de aprovechamiento; las demandas pueden ser de agua potable, de riego, para generación de energía eléctrica, etc. Generalmente, este volumen será un dato conocido.

Volumen evaporado, S_e

Este volumen es medido en altura de evaporación, y al igual que la precipitación deberá ser transformado a volumen mediante la expresión siguiente:

$$S_e = h_{ev} \bar{A}$$

Volumen infiltrado, S_i

Este volumen resulta muy complicado de medir. Cuando éste es muy pequeño se desprecia para el funcionamiento. Sin embargo, cuando sucede lo contrario, es posible estimarlo como una proporción de la lámina de lluvia.

Volumen derramado, S_{de}

El volumen derramado es el volumen descargado por la obra de excedencias y que resultará de la simulación del funcionamiento del vaso y que depende del NAMO.

3. Simulación del funcionamiento de vaso

Para simular el funcionamiento, la ecuación de continuidad puede escribirse de la forma siguiente:

$$V_{i+1} = V_i + X_i - D_i$$

De tal forma que V_{i+1} y V_i son los volúmenes almacenados en los instantes $i + 1$ e i , respectivamente. Así mismo, las entradas netas para el intervalo Δt pueden determinarse de la forma siguiente:

$$X_i - D_i = I_i - O_i + P_i - S_{de}$$

donde

I_i volumen de entradas al vaso, sin depender del nivel del agua en el vaso

O_i volumen de salidas al vaso, sin depender del nivel del agua en el vaso

P_i volumen de entradas – volumen de salidas que depende del nivel del agua en el vaso

Otra forma de expresarlo es:

$$I_i = E_{cp\ i} + E_{t\ i}$$

$$O_i = S_{D\ i}$$

$$P_i = E_{U\ i} - S_{e\ i} - S_{i\ i}$$

Debe considerarse la restricción: $V_{min} \leq V_{i+1} \leq V_m$, donde V_{min} es el volumen de almacenamiento que corresponde al NAMINO o NAMin, y V_m es el volumen de almacenamiento al NAMO.

3.8.1.4 Cálculo de la Evapotranspiración

Es necesario definir el concepto de Evapotranspiración para describir, posteriormente, los métodos empleados para su cálculo. La evapotranspiración se define como la consideración conjunta de la evaporación y de la transpiración; de esta manera se contempla la evaporación propia del vaso, y de la transpiración de las plantas de la zona del vaso.

También es importante definir los términos Evapotranspiración Potencial y Evapotranspiración Real; la primera consiste en la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal se encontraran en óptimas condiciones; mientras que la segunda se refiere a la evapotranspiración que se produce en las condiciones existentes en cada caso.

A continuación se exponen tres métodos para el cálculo de la evapotranspiración, y posteriormente se muestran los resultados obtenidos para cada uno de ellos, así como las recomendaciones y comentarios respecto a las ventajas y desventajas de su uso.

- **Thorntwaite**

1. Se calcula un *índice de calor mensual*, i , a partir de la temperatura media mensual, t ,

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

2. Se calcula el *índice de calor anual*, I , sumando los 12 valores de i ,

$$I = \sum i$$

3. Se calcula la ETP mensual sin corregir mediante la fórmula:

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a$$

donde

$ETP_{\text{sin corregir}}$ ETP mensual en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol (teóricas)

t temperatura media mensual, en °C

I índice de calor anual

$$a = (675 \times 10^{-9})I^3 - (771 \times 10^{-7})I^2 + (1,792 \times 10^{-5})I + 0.49239$$

4. Corrección para el número de días del mes y el número de horas del sol:

$$ETP = ETP_{\text{sin corregir}} \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{d}{30} \right)$$

donde

ETP ETP evapotranspiración potencial corregida

N número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud, Tabla 4.61.

d número de días del mes

Tabla 3.6 Número de horas máximo de sol (Doorenbos y Pruitt, 1977)

Lat. Norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Lat. Sur	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
50	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.9	11.1	9.8	9.1
40	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.0	9.3
35	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.6
5	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.0	11.9	11.8
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

- **Turc**

Se aplica la fórmula de Turc:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

donde

ETR evapotranspiración real en mm/mes

P precipitación en mm/mes

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3$$

t temperatura media mensual

- **Coutange**

La expresión propuesta por el autor es:

$$ETR = P - xP^2$$

donde

ETR evapotranspiración real en mm/mes

P precipitación en metros/mes

$$x = \frac{1}{0.8 + 0.14t}$$

t temperatura media mensual, en °C

4 CASO DE APLICACIÓN. CUENCA DEL RÍO SONORA

La cuenca del Río Sonora se encuentra en el centro del estado de Sonora, pertenece a la Región Hidrológica No. 9; su superficie de aportación es de 26,689 km², de tal forma que ocupa el 14.78% de la superficie del estado (180,605 km²).

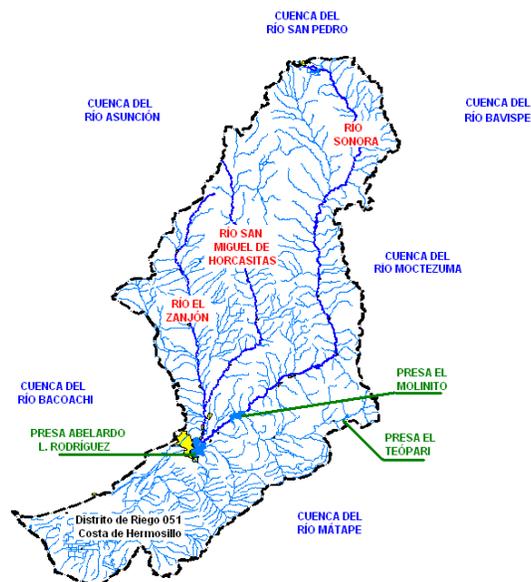


Figura 4.1 Vista general de la cuenca del río Sonora

La ubicación geográfica es entre los paralelos 28° 57' y 31° 00' Latitud Norte y los meridianos 109° 55' y 111° 25' Longitud Oeste. El Distrito de Riego No. 51 de la costa de Hermosillo se encuentra en la zona baja de la cuenca, considerada como una importante región agrícola.

Dentro de la cuenca se localizan 27 de los 70 municipios con los que cuenta el estado de Sonora (Figura 4.2).

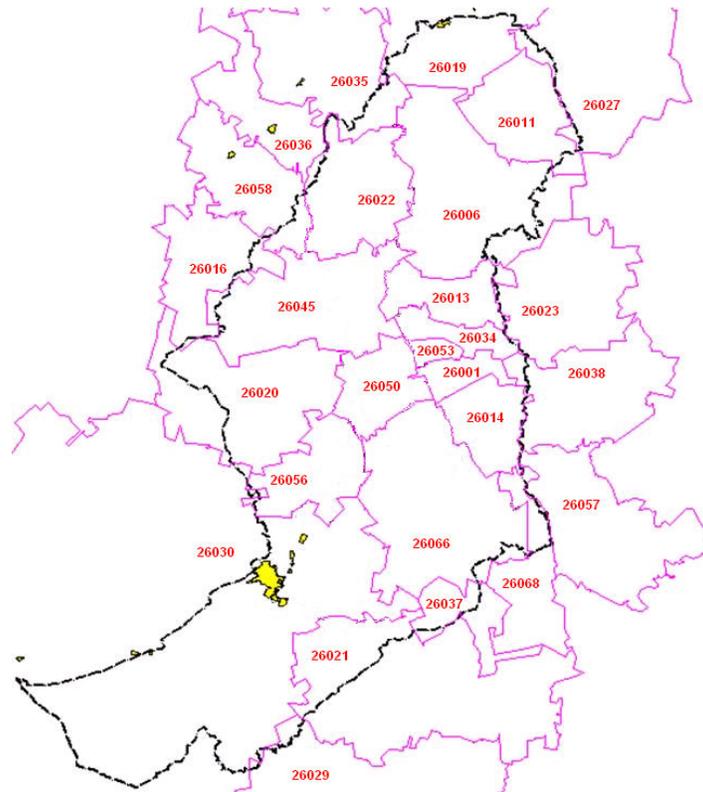


Figura 4.2 Municipios que forman parte de la cuenca del río Sonora

En esta cuenca se ubican algunas presas, siendo las más importantes, las llamadas Abelardo L. Rodríguez y Rodolfo Félix Valdés (El Molinito).

Presas Abelardo L. Rodríguez

Fue construida de 1945 a 1948 sobre el río Sonora, aguas abajo de la confluencia con el río San Miguel, siendo este último su principal aportación, y en las inmediaciones de la ciudad de Hermosillo. El objetivo principal de esta obra fue la irrigación de aproximadamente 10,000 Ha del Distrito No. 51 (Costa de Hermosillo), así como recargar acuíferos para satisfacer la demanda de agua potable, la regulación de avenidas, entre otros. La Secretaría de Recursos Hidráulicos, con apoyo del gobierno estatal, fue la instancia encargada de construir dicha presa. La capacidad de su almacenamiento al NAMO (225.80 msnm) fue de 254 Hm³; y la descarga libre de su vertedor se determinó de 2,735 m³/s. Posteriormente, el vertedor fue modificado con unas compuertas con una capacidad de descarga de 500m³/s con el fin de obtener un almacenamiento de 390Hm³ hasta el NAME (228.50 msnm), de tal forma que el NAMO se encontraría en la cota 220.80 msnm.

Presa Rodolfo Félix Valdés, El Molinito

Esta obra fue construida sobre el río Sonora, a 23 km aguas arriba de la ciudad de Hermosillo, el objetivo de su construcción fue el de protección contra inundaciones por desbordamientos del río. Se trata de una cortina de materiales graduados, con una capacidad de almacenamiento de 272 Hm³. Actualmente, su vertedor, después de haberse recortado, se encuentra en la cota 287.54 msnm.

Para el año de 1993 se indicó que debido a que no se realizó un encausamiento del río entre El Molinito y Abelardo L. Rodríguez, cualquier descarga provocaría inundaciones, de tal forma que se protegió al agua de la contaminación con bordos y así fuera utilizada para abastecimiento de agua potable.

Hidrografía

El río Bacanuchi es el afluente de mayor importancia en la parte alta el río Sonora, éste se origina al oeste de la cuenca, y se une al río Sonora a la altura de Arizpe, sobre la margen derecha. Aguas abajo, se van uniendo pequeños arroyos. Otro afluente importante es La Junta, éste desemboca en la presa El Molinito.

Aguas abajo de El Molinito, se une al río Sonora el río San Miguel, el cual recibe antes al río Zanjón. Finalmente, todos llegan al vaso de la presa Abelardo L. Rodríguez.

En el año de 1994 se registró un gasto máximo de 1,507 m³/s, aún cuando este dato no coincide con el periodo de mayor escurrimiento, siendo el mes de diciembre el que presentó mayores precipitaciones, generando grandes avenidas que pudieron ser corroboradas en la estación hidrométrica El Orégano II, se alcanzaron picos de casi 1,600 m³/s. Así mismo, para el Río San Miguel se presentó en gasto máximo histórico de 441 m³/s.

En la zona baja, el escurrimiento es escaso y en su mayoría se infiltra en las zonas arenosas antes de llegar a la desembocadura que cruza el Distrito de Riego de Hermosillo donde se utilizan las aguas antes de ser descargadas al colector general.

Existen varios aprovechamientos para riego sobre el río Sonora, cerca de Ures, específicamente entre las poblaciones de Banamichi y Mazocahui. También, en las márgenes del río San Miguel, la zona más importante está en Llano Grande, San Miguel de Horcasitas y desde Zamora hasta la presa Abelardo L. Rodríguez. Sobre el río Zanjón, las zonas más importantes de riego se localizan en Querobabi.

Desde la confluencia del río San Miguel con el Sonora, hasta aproximadamente 50 Km. aguas abajo existe una zona de aguas subterráneas que son explotadas mediante pozos profundos en el Distrito de Riego de la Costa de Hermosillo en otras áreas de la región. Antes de 1990, la presa Abelardo L. Rodríguez regaba terrenos agrícolas dentro del mencionado Distrito. Se benefician con aguas subterráneas 143 915 Ha localizadas principalmente en el municipio de Hermosillo.

Antes de la construcción de la presa Abelardo L. Rodríguez, los escurrimientos del río Sonora se determinaban con la suma de los escurrimientos registrados en la estación hidrométrica de Hermosillo ubicada sobre el cauce principal. El escurrimiento medio anual era de $127 \times 10^6 \text{ m}^3$ con un máximo de $222 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Orografía

Esta región tiene un relieve muy accidentado y pronunciado, en grandes contrastes, que ocasionan en muchos casos, cambios de clima, fauna, flora, medios de vida, costumbres, etc. Estas condiciones y las variaciones de las características locales dan lugar a gran diversidad de recursos naturales como son, mineros, forestales, agrícolas e hidrológicos. Cuenta con grandes extensiones montañosas pertenecientes a la provincia denominada Faja Costera de Sinaloa.

El relieve accidentado es un reflejo de las constituciones geológicas regional y está caracterizada por una serie de sierras y lomas paralelas, como orientación noreste-sur y separadas entre si por valles angostos; se considera que las formas del relieve topográfico, son el producto de bloques levantados, que constituyen una serie de graven orientados de norte a noroeste, que fueran orientados por fallas regionales.

Las sierras altas están constituidas principalmente por rocas de origen volcánico. Entre los ríos Sonora y Mátape, existen otras elevaciones formadas por rocas sedimentarias, que en alguna zona presenta extractos intercalados de carbón grafito.

La topografía de su cuenca es accidentada salvo en su cuenca baja y en la de su afluente el río Zanjón. Su cuenca alta es rica en yacimientos minerales y la principal explotación se localiza cerca de los orígenes de la corriente, en la zona de Cananea, Son., donde se extrae cobre principalmente; los yacimientos se originan hacia el sur a lo largo de la Sierra del Manzanal, que divide al río Sonora de su afluente Bacanuchi y en ella Existen yacimientos de oro, plata, cobre y zinc tanto en la margen derecha del río Bacanuchi, como en la izquierda del río Sonora, hasta las cercanías de Sinoquipe, Son.

El río Sonora nace en Cananea, en la provincia Sierra Madre Occidental, donde fluye hacia el sur. A la altura de Hermosillo se une con el San Miguel de Horcasitas, también proveniente de esta provincia, y con el Zanjón, que se origina en la Provincia del Desierto Sonorense en la subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses.

La cuenca del río Sonora se extiende en lo que se identifica como estribaciones de la sierra Madre Occidental, provincia fisiográfica que ocupa gran parte del territorio estatal, en la porción Este del mismo, hacia los límites con el estado de Chihuahua.

4.1 Selección de estaciones pluviométricas

En la cuenca del río Sonora convergen 54 estaciones climatológicas, pero principalmente por la falta de datos, la mayoría quedan fuera, se propone como limitante de que cada estación cuente con un mínimo de 15 años de registro.

Por lo anterior, sólo se cuenta con información de dos estaciones hidrométricas; El Cajón tiene registro de gastos medios diarios, mensuales y anuales desde 1975 hasta 1990 y de 1999 al 2002, en tanto que para la estación El Orégano existe información para las mismas variables en los periodos de 1941 a 1990 y de 1999 al 2002.

Tabla 4.1 Ubicación de las Estaciones Hidrométricas disponibles en la zona de estudio

Clave	Nombre	Latitud N	Longitud W
09090	El Cajón	29° 14' 00"	110° 42' 15"
09017	El Orégano	29° 04' 15"	110° 55' 10"

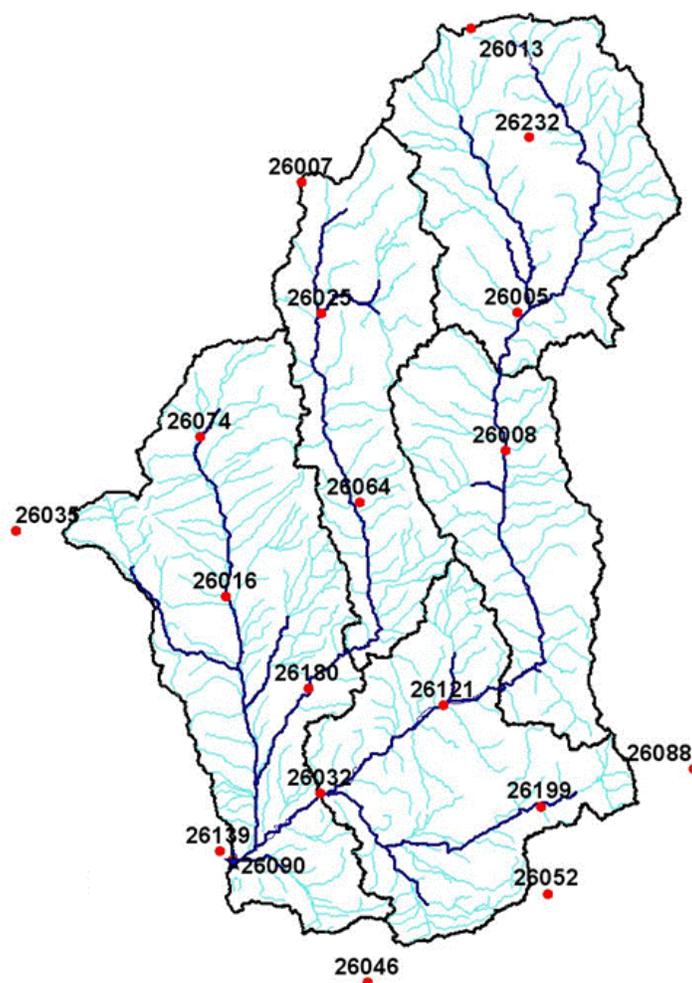


Figura 4.3 Distribución de estaciones climatológicas

En la Tabla 4.2 se puede observar la calidad de la información de las estaciones climatológicas con periodos de más de 15 años de registro.

Tabla 4.2 Calidad de la información pluviométrica de las estaciones climatológicas

	Clave	Nombre	Municipio	Periodo	Completos	Incompletos
1	26005	ARIZPE	ARIZPE	1961-2003	26	18
2	26007	BACANUCHI	ARIZPE	1964-2003	29	11
3	26008	BANAMICHI	BANAMICHI	1961-2004	36	6
4	26013	CANANEA	CANANEA (DGE)	1961-1986	17	9
5	26016	CARBÓ	CARBÓ	1960-2003	29	15
6	26025	CUCURPE	CUCURPE	1967-2004	26	12
7	26026	CHUPASCLILLA	HERMOSILLO	1954-1986	15	18
8	26035	FÉLIX GÓMEZ	PITIQUITO	1960-2004	26	19
9	26045	IMURIS, (SMN) *	IMURIS	1946-2004	49	10
10	26046	LA COLORADA	LA COLORADA	1960-1988	26	3
11	26052	MAZATÁN	MAZATÁN (SMN)	1961-2004	24	20
12	26064	OPEDEPE	OPEDEPE	1945-1983	33	6
13	26066	PALO VERDE	HERMOSILLO	1963-2002	21	19
14	26074	QUEROBABI	OPEDEPE (DGE)	1959-2002	23	21
15	26088	SN PEDRO DE LA CUEVA		1959-1995	25	12
16	26121	URES	URES (DGE)	1946-2004	49	10
17	26139	HERMOSILLO	HERMOSILLO	1965-2002	32	5
18	26232	LA CEBOLLA	MAGDALENA	1981-2004	13	10
19	26180	EL CAJÓN		1974-2004	23	8
20	26032	EL ORÉGANO		1941-2004	49	15
21	26090	PRESA ABELARDO				
22	26199	PUEBLO DE ALAMOS				

De acuerdo con la revisión de la información pluviométrica de cada una de las estaciones climatológicas, se observa que la calidad de la información es mala, pues aún cuando tienen periodos de registro largos, existen carencias de importancia, adicionalmente, sólo 4 estaciones tienen información actualizada al 2007.

Por lo tanto, se seleccionaron sólo 19 estaciones climatológicas para ser usadas en este trabajo, cabe señalar que dichas estaciones también tienen problemas en la calidad de la información, sin embargo, se observó que éstas tienen influencia directa en la zona de estudio y tienen un periodo de registro común entre los años de 1980 y 2003. Ver Tabla 4.3.

En cuanto a la información proveniente de las dos estaciones hidrométricas, es relativamente más inconsistente que la proporcionada por los pluviómetros.

Tabla 4.3 Estaciones Climatológicas Seleccionadas

Estaciones (Clave)	
Félix Gómez	26035
Querobabi	26074
Hermosillo	26139
Carbó	26016
Presa Abelardo	26090
Bacanuchi	26007
El Cajón	26180
El Orégano	26032
Cucurpe	26025
Opedepe	26064
La Colorada	26046
Ures (DGE)	26121
Cananea	26013
Banamichi	26008
Arizpe	26005
La Cebolla	26232
Pueblo de Álamos	26199
Mazatán	26052
San Pedro de la Cueva	26088

4.2 Características fisiográficas y subdivisión en subcuencas

La cuenca del río Sonora es una cuenca que tiene una topografía accidentada en la parte alta, con pendientes hasta del 40%, y en la parte baja predominan las pendientes suaves que no exceden del 10%. Esta variación de las pendientes se ve reflejada en las elevaciones de la cuenca; ya que su elevación mínima está a nivel del mar, mientras que para las elevaciones máximas los datos son hasta de 2,618 msnm En el mapa siguiente se observa la variación de estas *pendientes en la cuenca*.

Cuenca del río Sonora Pendientes clasificadas

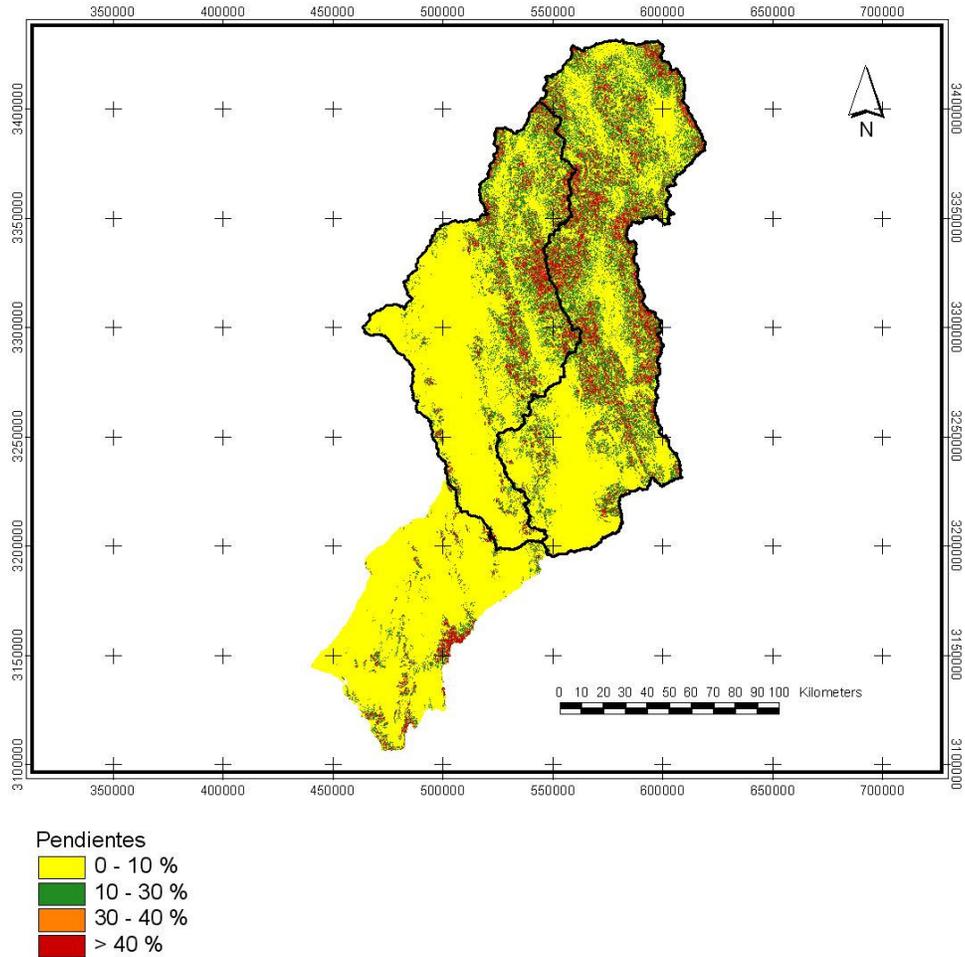


Figura 4.1 Distribución de pendientes en la Cuenca del Río Sonora

El cálculo de la *pendiente del cauce*, tanto de la cuenca como de las subcuencas, se realizó con el criterio de Taylor Shwartz:

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

4.3 Registros de lluvia media diaria por subcuenca

Debido a lo escaso de la información y de continuidad de los registros pluviométricos, se tomaron 19 estaciones ubicadas dentro de la cuenca del río Sonora. Estas estaciones tenían una porosidad importante en todo su registro, por este motivo se probaron los métodos de interpolación mencionados en el capítulo 2.

Tabla 4.4 Relación de registros para cada estación de la cuenca del Río Sonora

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Núm. años con registro completo		
	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003			
1 Felix Gomez	1	1	1	1	1	1	1	1														1			1	10	
2 Querobabi		1	1	1	1	1	1	1										1	1	1	1	1	1				13
3 Hermosillo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				22
4 Carbo	1	1		1	1	1	1	1																			8
5 Psa Abelardo	1	1	1	1	1	1	1	1																			8
6 Bacanuchi	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1			19
7 El Cajón	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22
8 El Oregano	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1								15
9 Cucurpe	1	1	1	1	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1		18
10 Opedepe	1	1																									2
11 La Colorada	1	1	1	1	1	1	1	1																			8
12 Ures (DGE)			1	1	1	1	1				1	1				1	1	1					1				11
13 Cananea			1																								1
14 Banamichi	1	1	1	1	1	1	1	1		1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20
15 Arizpe	1	1	1	1	1		1																1	1	1		9
16 La Cebolla			1	1	1			1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19
17 Pueblo de Alamos		1	1	1	1	1																	1				6
18 Mazatan											1	1	1		1	1	1	1	1			1		1	1		11
19 San Pedro de la Cueva	1	1	1	1					1	1	1	1	1														9
Número de estaciones con registro completo	13	15	16	16	15	13	11	9	5	7	9	9	8	6	7	9	10	11	6	5	7	11	7	6			

Se tomó como referencia a las estaciones Carbó y Bacanuchi debido a que para este año estas estaciones tienen un registro menos poroso en comparación con las demás estaciones; se analizaron los años 1981, 1982 y 1983 de manera mensual, años para los cuales se tiene un mayor número de estaciones con registros completos. A continuación se presenta la metodología para la selección del método de interpolación de lluvias para el año 1981 de la estación Carbó.

- Se acomodan las estaciones de mayor a menor distancia considerando la coordenada en x, y se identifica la estación que se desea interpolar; ver Tabla 4.5.
- Se acumula la precipitación mensual de cada estación; esto permitirá determinar las configuraciones para la aplicación de los métodos de interpolación.; ver Tabla 4.6.
Se observa que para el año de análisis se tiene una variación de la falta de registros pequeña; ya que sólo se tienen 6 configuraciones para las cuales se deben aplicar los métodos de interpolación. Ver Tabla 7.
- Se aplican los métodos de interpolación a las diferentes configuraciones con el fin de calcular los pesos de influencia de cada una de las estaciones, ésta dependerá de la cercanía al punto para el que se desea interpolar, que para fines de la selección este punto es la estación Carbó, Tabla 4.8.
- Con el registro original de la precipitación mensual se comparan los resultados obtenidos de las interpolaciones, y se calcula el error en por ciento para seleccionar aquel que, en un número considerable de los meses, presente un error menor, ver Tabla 4.9.
Se observa que el método de Interpolación Inversa $\beta = 1$ muestra el menor error para 6 meses.
- Finalmente, este procedimiento se aplica para la estación Bacanuchi; en la Tabla 4. 10 se presentan los resultados con el fin de seleccionar el método que presente el menor error para los años seleccionados.

Tabla 4.5 Coordenadas de las estaciones

Estación		Clave	X	Y
1	Felix Gomez	26035	-111.50	29.83
2	Querobabi	26074	-111.02	30.05
3	Hermosillo	26139	-110.97	29.10
4	Carbo	26016	-110.95	29.68
5	Psa Abelardo	26090	-110.92	29.07
6	Bacanuchi	26007	-110.75	30.63
7	El Cajón	26180	-110.74	26.47
8	El Oregano	26032	-110.70	29.23
9	Cucurpe	26025	-110.70	30.33
10	Opedepe	26064	-110.60	29.90
11	La Colorada	26046	-110.58	28.80
12	Ures (DGE)	26121	-110.38	29.43
13	Cananea	26013	-110.30	30.98
14	Banamichi	26008	-110.22	30.02
15	Arizpe	26005	-110.18	30.33
16	La Cebolla	26232	-110.15	30.73
17	Pueblo de Alamos	26199	-110.13	29.20
18	Mazatan	26052	-110.12	29.00
19	San Pedro de la Cueva	26088	-109.73	29.28

Tabla 4.6 Registro de precipitación mensual de 1981

Estación		En	Fb	Mr	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc
1	Felix Gomez	43.2	12	75.2	17	0	0	191	47	130	24	13	0
2	Querobabi	53	11	60.5	24	0	7	115	46.5	85	12	17	0
3	Hermosillo	53.5	5.8	14.5	5.2	8.4	1.8	121	7.2	53.6	13.9	8.8	0
4	Carbo	46.5	16	24	19	3	31	138	32	39	6	14	0
5	Psa Abelardo	29.3	4.7	14.8	6.9	7.5	2.7	104	5.4	36.3	14.5	9.3	0
6	Bacanuchi	54.4	31.7	29.4	1.2	0	7.5	161	101	37.9	40.9	38.3	0
7	El Cajón	64	16.1	24.5	23.9	1.2	21	122	47.9	112	12.5	19.1	0
8	El Oregano	52.4	6.4	18.9	24.1	0.4	17.1	126	35.3	61.6	8.6	11.5	0
9	Cucurpe	86.6	36.3	41.1	0	3	13	209	50.5	77	25	35	0
10	Opedepe		17.2	23	47	0	8	282	62.2	58.9	0	0	0
11	La Colorada	69	6.7	34.6	3.5	11	5.5	182	33.2	78.4	8.3		0
12	Ures (DGE)	81.8				0	37	62.3	6.7	63.1	0	16.3	0
13	Cananea						27	64.6	36.5	4.5	24		
14	Banamichi	62.8	33	40.6	21.5	3.5	51.5	196	67	98	0	49	0
15	Arizpe	80	41	44	18	4.5	36	175	101	164	36.5	70.5	0
16	La Cebolla	60.5	26.7	40	15.2	0	60		41.2		31.1	19.5	0

	Estación	En	Fb	Mr	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc
17	Pueblo de Alamos	40.2	3.8	60.5	22.7	5.4	44.5	196	76.2	84.3	2	17.3	0
18	Mazatan												
19	San Pedro de la Cueva	77.5	7	22.5	35.5	5	83.7	145	79.3	81.4	1	27.8	0

Tabla 4.7 Configuraciones para la aplicación de los métodos de interpolación

	Estación	En	Fb	Mr	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc
1	Felix Gomez	43.2	12	75.2	17	0	0	191	47	130	24	13	0
2	Querobabi	53	11	60.5	24	0	7	115	46.5	85	12	17	0
3	Hermosillo	53.5	5.8	14.5	5.2	8.4	1.8	121	7.2	53.6	13.9	8.8	0
4	Carbo	46.5	16	24	19	3	31	138	32	39	6	14	0
5	Psa Abelardo	29.3	4.7	14.8	6.9	7.5	2.7	104	5.4	36.3	14.5	9.3	0
6	Bacanuchi	54.4	31.7	29.4	1.2	0	7.5	161	101	37.9	40.9	38.3	0
7	El Cajón	64	16.1	24.5	23.9	1.2	21	122	47.9	112	12.5	19.1	0
8	El Oregano	52.4	6.4	18.9	24.1	0.4	17.1	126	35.3	61.6	8.6	11.5	0
9	Cucurpe	86.6	36.3	41.1	0	3	13	209	50.5	77	25	35	0
10	Opedepe		17.2	23	47	0	8	282	62.2	58.9	0	0	0
11	La Colorada	69	6.7	34.6	3.5	11	5.5	182	33.2	78.4	8.3		0
12	Ures (DGE)	81.8				0	37	62.3	6.7	63.1	0	16.3	0
13	Cananea						27	64.6	36.5	4.5	24		
14	Banamichi	62.8	33	40.6	21.5	3.5	51.5	196	67	98	0	49	0
15	Arizpe	80	41	44	18	4.5	36	175	101	164	36.5	70.5	0
16	La Cebolla	60.5	26.7	40	15.2	0	60		41.2		31.1	19.5	0
17	Pueblo de Alamos	40.2	3.8	60.5	22.7	5.4	44.5	196	76.2	84.3	2	17.3	0
18	Mazatan												
19	San Pedro de la Cueva	77.5	7	22.5	35.5	5	83.7	145	79.3	81.4	1	27.8	0

Tabla 4.8 Relleno de la estación Carbó para 1981 (Hp acumulada mensual)

Estación	En	Fb	Mr	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc
Inversa b = 1	56.6	15.9	37.2	19.0	2.8	19.6	157.8	46.2	75.1	13.3	20.1	0.0
Inversa b = 2	55.9	14.5	38.1	21.4	2.2	15.3	160.6	44.0	74.3	11.8	16.7	0.0
Lagrange	149.8	47.1	71.9	-66.8	5.4	-13.5	258.7	-23.1	125.9	233.4	-4.2	0.0
Mín. Cuadr.	51.3	16.5	40.4	13.8	2.4	5.4	154.6	40.8	74.8	18.8	18.3	0.0
Multicuadrática	57.6	9.1	39.5	29.2	0.5	6.0	161.7	36.6	75.7	8.3	0.0	0.0
Carbó	46.5	16	24	19	3	31	138	32	39	6	14	0

Tabla 4.9 Error en % en el relleno de la estación Carbó para 1981

Método de Interpolación		En	Fb	Mr	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc
1	Inversa $\beta = 1$	21.7	0.2	28.5	0.0	0.5	24.5	42.5	30.5	77.6	15.8	13.0	0.0
2	Inversa $\beta = 2$	20.2	3.2	30.3	5.1	1.6	33.8	48.7	25.8	75.9	12.5	5.9	0.0
3	Lagrange	222.1	66.9	103.1	184.6	5.1	95.7	259.6	118.4	186.9	489.0	39.1	0.0
4	Mín. Cuadrados	10.3	1.1	35.2	11.3	1.2	55.0	35.7	18.8	76.9	27.5	9.2	0.0
5	Multicuadrática	23.8	14.8	33.3	21.9	5.4	53.9	50.9	10.0	79.0	4.9	30.1	0.0
Mínimo error		10.3	0.2	28.5	0.0	0.5	24.5	35.7	10.0	75.9	4.9	5.9	0.0
		4	1	1	1	1	1	4	5	2	5	2	1

Tabla 4.10 Métodos con el menor error en los resultados de interpolación

Estación	1981		1982		1983	
	Método	# meses	Método	# meses	Método	# meses
Carbó	Distancia inv $\beta = 1$	6	Distancia inv $\beta = 1$	5	Multicuadrática	5
Bacanuchi	Multicuadrática	5	Distancia inv $\beta = 1$	5	Mín. Cuadrados	6

De acuerdo con la Tabla 4.10 se determina que para rellenar el registro de las 19 estaciones para el periodo de 1980 a 2003 se usa el método de la distancia inversa con el exponente $\beta = 1$.

Se rellenó el registro de las 19 estaciones siguiendo el procedimiento descrito en este subcapítulo; por lo tanto, a partir de él se realizan los cálculos subsecuentes.

4.3.1 Análisis de los registros

A partir de los registros completos, se extraerán los valores máximos para cada año de cada una de las estaciones con el propósito de formar las series anuales de máximos. Así mismo, se requiere un análisis de los registros para detectar aquellos puntos que pudieran estar fuera de la tendencia del registro (puntos extraños) y de ser necesario compararlos con los de otras estaciones para verificar su autenticidad, ver Tabla 4.11. Posteriormente, deben corregirse las series por intervalo fijo; esta corrección se refiere a que, debido a que el registro representa la lluvia acumulada en 24 horas, no se toma en cuenta la posibilidad de no se tome la tormenta completa. Esta corrección, únicamente requiere de incrementar los datos de registro en un 13%. Tabla 4.12.

4.3.1.1 Pruebas de homogeneidad

Se realizan las pruebas de homogeneidad a cada una de las series anuales corregidas para definir las estaciones que serán consideradas en el trabajo. Para que una serie sea considerada homogénea deberá superar 2 de las 3 pruebas que se realicen. A continuación se presenta la descripción del proceso para la estación Félix Gómez, clave 26035 y una tabla resumen con los resultados obtenidos para todas las estaciones; el procedimiento para todas las estaciones se presenta en el Anexo 1.

Tabla 4.11 Series de precipitación máxima acumulada en 24 h

AÑO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Felix Gomez	Querobabi	Hermosillo	Carbo	Psa Abelardo	Bacanuchi	El Cajón	El Oregano	Cucurpe	Opedepe	La Colorada	Ures (DGE)	Cananea	Banamichi	Arizpe	La Cebolla	Pueblo de Alamos	Mazatan	San Pedro de la Cueva
1 1980	42.0	34.0	67.6	35.0	68.7	48.8	85.8	97.2	60.0	140.8	45.0	32.7	40.1	83.5	77.0	42.6	44.5	27.5	45.5
2 1981	65.0	46.0	48.8	60.0	36.2	29.3	62.0	40.0	40.0	42.0	74.0	41.0	19.1	31.0	67.0	35.0	45.5	23.1	62.7
3 1982	42.0	70.0	64.6	40.0	56.5	42.4	70.0	53.0	48.0	42.0	35.6	40.0	53.0	44.0	37.0	51.0	48.0	39.0	31.5
4 1983	80.0	76.0	48.5	42.0	37.7	49.0	53.2	63.9	47.0	85.0	38.5	81.5	35.0	47.5	67.5	60.6	80.2	34.8	35.0
5 1984	70.0	65.0	62.9	49.0	51.0	39.3	73.8	57.0	80.0	39.8	36.0	71.2	40.4	44.5	87.5	45.2	42.2	40.4	48.0
6 1985	40.0	50.0	72.0	37.6	80.0	32.5	83.7	32.5	45.0	27.9	90.0	32.0	22.4	71.0	30.0	32.4	50.0	22.4	39.0
7 1986	41.0	50.0	62.5	82.0	65.0	50.4	108.5	62.9	43.0	29.7	63.9	55.0	32.4	64.0	47.5	48.0	40.0	24.2	50.0
8 1987	33.0	48.0	40.8	53.0	42.0	52.0	39.0	29.0	51.0	17.9	18.5	51.0	25.7	47.0	26.5	54.5	68.2	43.0	38.0
9 1988	37.0	31.5	119.5	65.0	82.0	44.0	44.2	64.7	42.0	32.3	39.0	80.0	31.8	45.5	31.4	48.0	40.1	144.0	58.0
10 1989	37.0	68.5	75.5	90.0	57.1	52.0	62.4	46.0	60.0	32.0	37.8	60.0	22.1	75.0	24.8	54.5	41.4	78.0	57.0
11 1990	48.6	38.5	112.5	51.5	98.6	49.0	64.0	200.0	80.0	40.6	70.4	68.0	28.9	67.0	27.6	87.3	52.0	120.0	75.0
12 1991	32.7	28.9	39.5	83.0	39.2	49.0	50.4	48.5	43.0	28.5	41.6	48.0	33.9	41.0	26.0	64.0	46.6	74.0	72.0
13 1992	53.5	46.8	142.0	74.0	104.7	82.5	106.2	95.7	66.0	41.7	57.3	51.0	50.5	65.0	39.6	64.5	37.0	54.0	60.0
14 1993	58.0	119.0	58.3	64.0	39.6	29.5	42.8	27.8	95.0	29.3	28.0	35.5	30.8	27.0	31.3	46.0	29.3	29.6	64.0
15 1994	87.3	58.9	152.6	150.0	122.0	127.1	146.2	112.0	139.0	86.6	80.1	60.1	92.4	112.0	91.3	92.3	59.9	75.0	40.0
16 1995	10.0	3.3	61.1	38.5	44.8	30.8	42.9	34.5	49.0	24.8	30.3	47.5	24.1	38.0	23.5	38.0	28.7	68.0	35.0
17 1996	91.0	5.9	40.0	108.0	36.0	35.0	46.7	48.0	75.0	33.0	44.2	31.0	30.8	87.0	37.5	39.0	45.3	85.0	33.7
18 1997	29.0	2.0	58.0	41.0	39.1	40.0	47.1	41.2	58.0	20.1	22.5	56.0	22.4	68.0	21.9	36.0	23.5	35.0	22.1
19 1998	35.2	65.5	44.0	48.0	43.7	41.0	65.6	66.0	35.0	31.9	40.6	37.5	22.2	33.0	23.8	31.0	36.5	45.0	34.0
20 1999	21.0	41.0	79.2	62.0	53.3	35.0	44.7	46.0	90.0	18.2	30.5	26.5	23.0	52.0	20.6	64.5	34.7	60.0	28.1
21 2000	38.8	6.5	125.5	50.0	88.4	91.0	83.9	90.8	111.0	39.8	43.4	38.8	46.8	69.0	22.4	60.0	63.0	68.0	38.3
22 2001	35.0	4.6	78.0	53.0	58.1	35.0	61.5	53.5	48.0	38.4	43.6	98.0	28.2	59.5	10.2	94.5	117.0	8.0	46.6
23 2002	32.5	15.0	104.0	34.5	65.5	33.4	34.8	42.0	39.0	14.5	22.8	18.5	17.4	25.0	29.0	35.0	20.0	52.0	17.3
24 2003	60.0	21.1	20.9	25.0	20.4	44.5	62.3	50.0	33.5	19.1	18.0	18.2	28.3	64.0	29.0	57.0	23.1	41.0	16.6

Tabla 4.12 Series de precipitación máxima diaria

AÑO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Felix Gomez	Querobabi	Hermosillo	Carbo	Psa Abelardo	Bacanuchi	El Cajón	El Oregano	Cucurpe	Opedepe	La Colorada	Ures (DGE)	Cananea	Banamichi	Arizpe	La Cebolla	Pueblo de Alamos	Mazatan	San Pedro de la Cueva
1 1980	47.5	38.4	76.4	39.6	77.6	55.1	97.0	109.8	67.8	159.1	50.9	36.9	45.3	94.4	87.0	48.1	50.3	31.1	51.4
2 1981	73.5	52.0	55.1	67.8	40.9	33.1	70.1	45.2	45.2	47.5	83.6	46.3	21.6	35.0	75.7	39.6	51.4	26.1	70.9
3 1982	47.5	79.1	73.0	45.2	63.8	47.9	79.1	59.9	54.2	47.5	40.2	45.2	59.9	49.7	41.8	57.6	54.2	44.0	35.6
4 1983	90.4	85.9	54.8	47.5	42.6	55.4	60.1	72.2	53.1	96.1	43.5	92.1	39.6	53.7	76.3	68.5	90.6	39.3	39.6
5 1984	79.1	73.5	71.1	55.4	57.6	44.4	83.4	64.4	90.4	44.9	40.7	80.5	45.7	50.3	98.9	51.1	47.7	45.7	54.2
6 1985	45.2	56.5	81.4	42.5	90.4	36.7	94.6	36.7	50.9	31.5	101.7	36.2	25.3	80.2	33.9	36.6	56.5	25.3	44.1
7 1986	46.3	56.5	70.6	92.7	73.5	57.0	122.6	71.1	48.6	33.5	72.2	62.2	36.6	72.3	53.7	54.2	45.2	27.4	56.5
8 1987	37.3	54.2	46.1	59.9	47.5	58.8	44.1	32.8	57.6	20.2	20.9	57.6	29.0	53.1	29.9	61.6	77.1	48.6	42.9
9 1988	41.8	35.6	135.0	73.5	92.6	49.7	49.9	73.1	47.5	36.5	44.1	90.4	35.9	51.4	35.5	54.2	45.3	162.7	65.5
10 1989	41.8	77.4	85.3	101.7	64.5	58.8	70.5	52.0	67.8	36.2	42.7	67.8	24.9	84.8	28.1	61.6	46.7	88.1	64.4
11 1990	55.0	43.5	127.1	58.2	111.4	55.4	72.3	226.0	90.4	45.9	79.6	76.8	32.7	75.7	31.1	98.6	58.7	135.6	84.8
12 1991	37.0	32.7	44.6	93.8	44.3	55.4	57.0	54.8	48.6	32.2	47.0	54.2	38.3	46.3	29.4	72.3	52.6	83.6	81.4
13 1992	60.4	52.9	160.5	83.6	118.3	93.2	120.0	108.1	74.6	47.1	64.8	57.6	57.1	73.5	44.7	72.9	41.8	61.0	67.8
14 1993	65.5	134.5	65.9	72.3	44.8	33.3	48.4	31.4	107.4	33.1	31.6	40.1	34.8	30.5	35.4	52.0	33.1	33.5	72.3
15 1994	98.6	66.6	172.4	169.5	137.8	143.6	165.2	126.6	157.1	97.8	90.5	67.9	104.5	126.6	103.1	104.3	67.7	84.8	45.2
16 1995	11.3	3.7	69.0	43.5	50.7	34.8	48.5	39.0	55.4	28.1	34.2	53.7	27.2	42.9	26.5	42.9	32.4	76.8	39.6
17 1996	102.8	6.7	45.2	122.0	40.7	39.6	52.8	54.2	84.8	37.3	49.9	35.0	34.8	98.3	42.4	44.1	51.2	96.1	38.1
18 1997	32.8	2.3	65.5	46.3	44.2	45.2	53.2	46.6	65.5	22.7	25.4	63.3	25.3	76.8	24.7	40.7	26.5	39.6	25.0
19 1998	39.7	74.0	49.7	54.2	49.4	46.3	74.1	74.6	39.6	36.0	45.9	42.4	25.0	37.3	26.9	35.0	41.3	50.9	38.5
20 1999	23.8	46.3	89.5	70.1	60.2	39.6	50.5	52.0	101.7	20.5	34.5	30.0	26.0	58.8	23.3	72.9	39.2	67.8	31.7
21 2000	43.8	7.3	141.8	70.1	99.9	102.8	94.8	102.6	125.4	45.0	49.1	43.8	52.9	78.0	25.4	67.8	71.2	76.8	43.3
22 2001	39.6	5.2	88.1	59.9	65.7	39.6	69.5	60.5	54.2	43.4	49.3	110.7	31.9	67.2	11.5	106.8	132.2	9.0	52.6
23 2002	36.7	17.0	117.5	39.0	74.0	37.7	39.3	47.5	44.1	16.4	25.7	20.9	19.6	28.3	32.8	39.6	22.6	58.8	19.5
24 2003	67.8	23.9	23.7	28.3	23.0	50.3	70.4	56.5	37.9	21.6	20.4	20.6	32.0	72.3	32.8	64.4	26.1	46.3	18.8

- Prueba de Helmert

Esta prueba consiste en identificar la variación de los datos con respecto a la media aritmética de la serie.

Tabla 4.13 Prueba de Helmert

Año	Hp _{máx} (mm)	Prueba de Helmert				
		Signo	S/C	Combinaciones	Secuencias	
1980	47.46	9.0				
1981	73.45	35.0	C	1	0	
1982	47.46	9.0	C	1	0	
1983	90.40	51.9	C	1	0	
1984	79.10	40.6	S	0	1	
1985	45.20	6.7	C	1	0	
1986	46.33	7.9	S	0	1	
1987	37.29	-1.2	S	0	1	
1988	41.76	3.3	S	0	1	
1989	41.77	3.3	S	0	1	
1990	54.96	16.5	C	1	0	
1991	36.96	-1.5	C	1	0	
1992	60.44	22.0	C	1	0	
1993	65.54	27.1	S	0	1	
1994	98.61	60.1	S	0	1	
1995	11.30	-27.2	C	1	0	
1996	102.83	64.4	C	1	0	
1997	32.77	-5.7	C	1	0	
1998	39.74	1.3	S	0	1	
1999	23.78	-14.7	S	0	1	
2000	43.84	5.4	S	0	1	
2001	39.55	1.1	S	0	1	
2002	36.73	-1.8	S	0	1	
2003	67.80	29.3	C	1	0	
Medidas de Tendencia	Tamaño de la muestra (n):					24
	Media de la muestra (X_{media}):					52.711
	Desviación estándar (S):					22.961
	Varianza no sesgada (S^2):					527.205
	Asimetría no sesgada (g):					0.728
	Curtosis no sesgada (K):					1.582
	Coef. de Variación (CV):					0.436
	Núm. de secuencias (S):					12
	Núm. de combinaciones (C):					11

La serie es homogénea si $-\sqrt{n-1} \leq (S-C) \leq \sqrt{n-1}$, donde, $\sqrt{n-1} = 4.80$

$$-4.80 \leq 1 \leq 4.80$$

por lo tanto, la serie es homogénea de acuerdo con la prueba de Helmert.

- **Prueba t de Student**

De acuerdo con el inciso b) del subcapítulo 2.2.1.4, la prueba realizada a la serie de máximos anuales para la estación Félix Gómez tiene como resultados los presentados en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Prueba t de Student

División de la serie en 2 muestras	
Tamaño de la muestra (n):	24
1a muestra (n ₁):	12
Media de la 1a muestra (1980-1991) X _{med 1} :	53.512
Desviación estándar 1a mues. (S ₁):	17.638
1a muestra (n ₂):	12
Media de la 2a muestra (1992-2003) X _{med 2} :	51.910
Desviación estándar 2a mues. (S ₂):	28.104
t _d =	0.1600928
Grados de libertad (n ₁ + n ₂ - 2) :	22
t _c (5% significancia, dos colas)=	2.074

para que sea considerada como homogénea, la serie debe cumplir que: $t_d < t_c$, es decir,

$$0.1600928 < 2.074$$

por lo tanto, de acuerdo con la prueba t de Student, la serie es homogénea.

- **Prueba de Cramer**

Para que la muestra sea considerada homogénea, se analizan 2 sub muestras considerando que la primera de ellas se compone del 60% de los datos, y ésta debe contemplar los últimos años; y la segunda de ellas, considera el 30%.

Tabla 4.15 Prueba de Cramer

Análisis por bloques, CRAMER	
Tamaño de la muestra (n):	24
Media de la muestra :	52.71
1er bloque para los últimos:	14 años
Media de la 1a muestra (1990-2003):	51.06
Desviación estándar 1a mues. (S _{1a}):	26.18
t ₆₀ :	-0.06305
t _{w 60} :	0.35087
Grados de libertad (n - 2) :	22
t _c (5% significancia, dos colas)=	2.074
2do bloque para los últimos:	10 años
Media de la 2a muestra (1994-2003):	49.69
Desviación estándar 2a mues. (S _{2a}):	30.52
t ₆₀ :	-0.09886
t _{w 60} :	0.39326
Grados de libertad (n - 2) :	22
t _c (5% significancia, dos colas)=	2.074

Para el 1er bloque $t_{w60} < t_c$ por lo tanto es homogéneo; para el 2do bloque, también $t_{w60} < t_c$ por lo tanto es homogéneo; dado que los 2 bloques son homogéneos, se considera que la muestra es homogénea.

4.3.1.2 Prueba de Independencia

La prueba de Anderson se efectúa con la finalidad de verificar que la serie de datos esta formada de variables aleatorias. Se calculará el coeficiente de autocorrelación serial desde $K = 1$ hasta

$$K = \frac{n}{3} = \frac{24}{3} = 8.$$

Tabla 4.16 Prueba de independencia

K	Límite Inferior	γ_k	Límite Superior	
1	-0.4432	-0.2208	0.3562	independiente al 95%
2	-0.4537	0.3177	0.3628	independiente al 95%
3	-0.4650	-0.1300	0.3698	independiente al 95%
4	-0.4772	0.0027	0.3772	independiente al 95%
5	-0.4903	-0.3374	0.3850	independiente al 95%
6	-0.5045	-0.1459	0.3934	independiente al 95%
7	-0.5200	-0.0599	0.4024	independiente al 95%
8	-0.5369	-0.1502	0.4119	independiente al 95%

CORRELOGRAMA

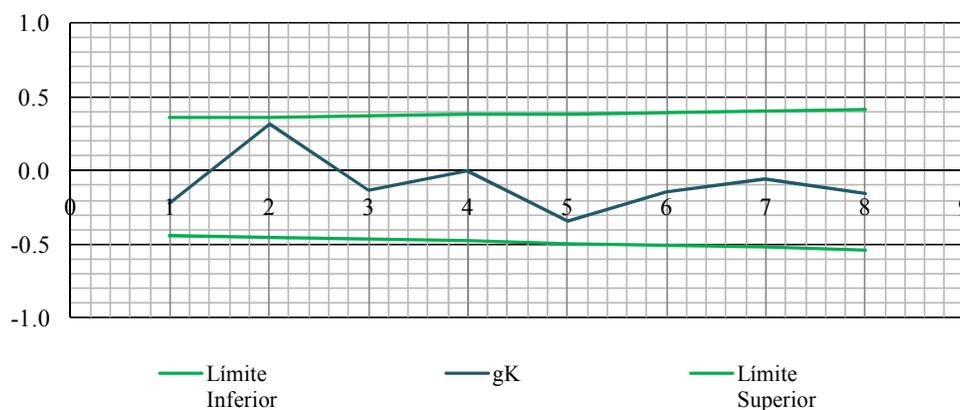


Figura 4.4 Correlograma, prueba de independencia de los datos

Para el caso de la estación Félix Gómez puede observarse en el correlograma que la serie de datos es totalmente independiente.

En la Tabla 4.18 se presentan los resultados obtenidos, tanto de las medidas de tendencia central, de dispersión, de forma, así como de las pruebas de bondad de ajuste y de independencia de las 19 estaciones climatológicas.

4.4 Aplicación de la teoría distribucional

Para iniciar el ajuste de los registros a las funciones de distribución de probabilidad, se ordenan los datos de mayor a menor para asignar el periodo de retorno correspondiente y su probabilidad de no excedencia.

Tabla 4.17 Periodo de retorno y probabilidad de no excedencia

m	Hp (mm)	T (años)	F(x)=1-1/T
1	102.83	23.00	0.96
2	98.61	11.50	0.91
3	90.40	7.67	0.87
4	79.10	5.75	0.83
5	73.45	4.60	0.78
6	67.80	3.83	0.74
7	65.54	3.29	0.70
8	60.44	2.88	0.65
9	54.96	2.56	0.61
10	47.46	2.30	0.57
11	46.33	2.09	0.52
12	45.20	1.92	0.48
13	43.84	1.77	0.43
14	41.77	1.64	0.39
15	39.74	1.53	0.35
16	39.55	1.44	0.30
17	37.29	1.35	0.26
18	36.96	1.28	0.22
19	36.73	1.21	0.17
20	32.77	1.15	0.13
21	23.78	1.10	0.09
22	11.30	1.05	0.04

Tabla 4.18 Análisis de frecuencias

		ESTACIONES																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Estadísticos	Tamaño de la muestra (n)	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Media de la muestra (\bar{x}_m)	52.71	46.90	83.73	67.62	67.31	54.73	74.47	70.73	69.57	45.00	49.51	55.51	37.75	64.06	43.78	60.31	52.57	60.79	49.32
	Desviación Estándar (s)	22.96	32.24	39.04	31.30	28.48	25.30	29.68	41.61	29.74	31.42	21.98	22.89	17.86	23.73	25.23	20.39	23.48	35.75	18.25
	Varianza No Sesgada (s^2)	527.2	1039.3	1524.4	979.4	810.9	640.1	880.7	1731.0	884.3	987.3	483.1	524.0	318.9	563.2	636.3	415.9	551.3	1278.3	333.2
	Asimetría No Sesgada (g)	0.73	0.61	0.88	1.74	0.90	2.40	1.48	2.51	1.46	2.56	0.90	0.62	2.48	0.64	1.31	1.01	1.83	1.28	0.25
	Curtosis No Sesgada (K)	1.58	1.63	1.53	1.84	1.61	2.03	1.77	2.64	1.71	3.11	1.57	1.62	2.19	1.71	1.54	1.78	1.91	1.73	1.67
	Coefficiente de Variación (CV)	0.44	0.69	0.47	0.46	0.42	0.46	0.40	0.59	0.43	0.70	0.44	0.41	0.47	0.37	0.58	0.34	0.45	0.59	0.37
Pruebas de Homogeneidad	Helmert	homogénea	no homogénea	no homogénea	homogénea	no homogénea	homogénea	homogénea	no homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	no homogénea	no homogénea	no homogénea	homogénea	homogénea	no homogénea	homogénea
	t de Student	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea
	Cramer	homogénea	no homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	no homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	no homogénea
Resultado (Homogeneidad)		homogénea	no homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea
Prueba de Independencia al 95%		Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.	Ind.

Se aplicaron las funciones de distribución de probabilidad que se describen en el capítulo 3. En particular, para la estación Félix Gómez se obtuvieron los parámetros y errores estándar de ajuste que se muestran en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19 Parámetros de las funciones de distribución de probabilidad y error estándar de ajuste

RESUMEN	% Error	Parámetros								
		μ	α	β	X_0	σ	$\mu_y = \lambda =$	$\sigma_y =$	ξ	X_1
Gumbel Momentos	5.66	42.38	17.91							
Gumbel Máxima Verosimilitud	4.69	43.96	19.05							
Gumbel Máxima Entropía	6.38	42.75	16.99							
Gumbel Momentos -L	6.29	42.87	17.06							
Normal Momentos	6.51	52.71				22.96				
Normal Momentos - L	7.45						52.71	20.95		
Log Normal (2p)	4.52						3.87	0.50		
Gamma 2p Momentos	5.61		10.00	5.27						
Gamma 2p Máxima Verosimilitud	5.97		9.44	5.59						
Gamma 2p Momentos - L	6.53		8.68	6.07						
Gamma 3p Momentos	5.75		8.36	7.54	-10.35					
Gamma 3p Momentos Prob Pesada	8.58		34.15	0.60	32.25					
GVE Momentos	35.76	27.09	55.14	0.07						
GVE Momentos - L	19.84	49.64	6.03	0.35						
Pareto Momentos	55.62					43.23	21.87		0.40	
Pareto Máxima Verosimilitud	11.08					17.00	41.00		0.10	
Uniforme Momentos	7.20		12.94	92.48						
Uniforme Máxima Verosimilitud	8.66		11.30	102.83						
Exponencial Parámetro b	21.32	52.71		0.02						
Exp. Parám. Xo y b Momentos	7.60			22.96	29.75					
Exp. Parám. Xo y b Máx. Ver.	80.94			-32.85	44.15					11.30
Mínimo Error :	4.52	LOG NORMAL - 2 PARÁMETROS								

En el Anexo I se presentan los resultados de las 19 estaciones; y en la Tabla 4.20 y Tabla 4.21 se muestra un resumen con las funciones de distribución de probabilidad a la que se ajustan los datos de las 19 estaciones.

Tabla 4.20 Ajuste de las estaciones a las funciones de distribución de probabilidad

Estaciones	Error	Función de Distribución de Probabilidad	
Felix Gomez	26035	4.522	Log Normal (2p)
Querobabi	26074	7.279	Gumbel Máxima Verosimilitud
Hermosillo	26139	7.402	Gamma 3p Momentos Prob Pesada
Carbo	26016	5.045	Pareto Momentos
Psa Abelardo	26090	4.098	Gamma 3p Momentos Prob Pesada
Bacanuchi	26007	11.358	Gumbel Momentos
El Cajón	26180	5.674	Gamma 3p Momentos Prob Pesada
El Oregano	26032	14.608	Gamma 3p Momentos Prob Pesada
Cucurpe	26025	5.785	Pareto Momentos
Opedepe	26064	12.959	Gamma 3p Momentos
La Colorada	26046	4.186	Gamma 3p Momentos Prob Pesada
Ures (DGE)	26121	2.842	Log Normal (2p)
Cananea	26013	6.614	Exp. Parám. Xo y b Momentos
Banamichi	26008	4.119	Log Normal (2p)
Arizpe	26005	7.642	Exp. Parám. Xo y b Momentos
La Cebolla	26232	5.654	Gumbel Momentos
Pueblo de Alamos	26199	5.962	Pareto Momentos
Mazatan	26052	5.614	Log Normal (2p)
San Pedro de la Cueva	26088	2.987	GVE Momentos

Tabla 4.21 Funciones de distribución de probabilidad de mayor ocurrencia en las estaciones climatológicas

Función de Distribución de Probabilidad Mejor Ajuste	Prom. Error	#
Exp. Parám. Xo y b Momentos	7.128	2
Gamma 3p Momentos	12.959	1
Gamma 3p Momentos Prob Pesada	7.194	5
Gumbel Máxima Verosimilitud	7.279	1
Gumbel Momentos	8.506	2
GVE Momentos	2.987	1
Log Normal (2p)	4.274	4
Pareto Momentos	5.597	3

De la Tabla 4.21 se observa que la función que se ajustó a un mayor número de estaciones es la función de distribución de probabilidad “Gamma”, 5 estaciones con la función Gamma de 3 parámetros por Momentos de Probabilidad Pesada, 1 estación con la función Gamma de 3 parámetros por Momentos sumando 6 estaciones; y que la función Log Normal de 2 parámetros es la segunda función que se ajustó a más estaciones. Por lo anterior, se determinó que se tomaran los ajustes a la función Gamma de 3 parámetros para todas las estaciones y así homogenizar la cuenca.

A partir de los parámetros de la función Gamma de 3 parámetros, se extrapolan eventos para periodos de retorno mayores, ver Tabla 4.22.

Tabla 4.22 Extrapolación de lluvias para diferentes periodos de retorno

Estaciones	26035	26074	26139	26016	26090	26007	26180	26032	26025	26064	26046	26121	26013	26008	26005	26232	26199	26052	26088
	Felix Gomez	Querobabi	Hermosillo	Carbo	Pea Abelardo	Banamuchi	El Cajón	El Oregano	Cucurpe	Opedepe	La Colorada	Ures (DGE)	Cananea	Banamichi	Arizpe	La Cebolla	Pueblo de Alamos	Mazatlan	San Pedro de la Cueva
Gamma 3p Momentos Prob Pesada																			
2	43.31	38.86	74.22	55.03	60.21	40.88	65.42	53.65	55.92	31.21	44.61	48.76	29.65	57.21	32.98	50.66	46.35	45.68	46.88
5	65.60	69.23	113.21	84.62	88.87	44.41	94.88	89.74	60.22	52.88	66.24	71.39	43.77	79.96	57.08	53.83	68.50	77.84	63.79
10	84.46	90.54	139.93	109.75	108.60	48.86	116.60	122.25	68.39	76.71	80.77	87.90	58.15	96.62	78.14	59.29	84.33	106.68	74.14
20	104.54	111.29	165.64	136.56	127.62	50.06	138.28	157.84	88.95	104.98	94.61	104.30	74.71	113.19	100.88	73.33	99.90	138.19	83.53
50	132.63	138.35	198.82	174.13	152.23	63.35	167.13	208.70	135.60	147.82	112.33	126.03	99.28	135.17	133.05	105.45	120.36	183.15	95.04
100	154.91	158.71	223.59	203.95	170.63	86.65	189.17	249.64	184.89	183.71	125.46	142.58	119.58	151.94	158.77	139.52	135.84	219.31	103.28
200	177.98	179.06	248.22	234.87	188.94	122.71	211.43	292.47	245.45	222.25	138.46	159.26	141.18	168.84	185.54	181.47	151.39	257.10	111.25
500	209.61	206.02	280.68	277.27	213.10	190.52	241.23	351.71	341.71	276.85	155.52	181.55	171.52	191.44	222.41	248.26	172.06	309.35	121.45
1,000	234.33	226.50	305.22	310.43	231.38	257.04	264.06	398.36	426.05	320.69	168.37	198.59	195.72	208.74	251.35	306.86	187.82	350.48	128.98
2,000	259.68	247.07	329.80	344.46	249.70	336.45	287.14	446.49	519.76	366.54	181.19	215.80	220.91	226.21	281.12	372.03	203.69	392.89	136.37
5,000	294.14	274.44	362.36	390.72	274.00	460.79	318.04	512.24	657.28	430.06	198.14	238.81	255.64	249.58	321.69	467.73	224.85	450.81	145.98
10,000	320.88	295.27	387.09	426.63	292.45	569.11	341.71	563.51	771.15	480.18	210.97	256.42	282.93	267.46	353.25	547.03	241.00	495.96	153.14

Sin embargo, cuando el objetivo de un análisis hidrológico es caracterizar la cuenca y a partir de ello plantear soluciones u optimizar los recursos, no es conveniente manejar la información “por separado”; es decir, en muchas ocasiones se mejora y facilita el estudio si se obtiene un registro característico de la cuenca.

A continuación se presenta una descripción de la metodología para obtener un registro de lluvias que represente a la cuenca.

Es importante conocer la ubicación geográfica de las estaciones climatológicas que tienen influencia en la cuenca; es decir, aquellas que puedan aportar información confiable y que registren lluvia que cae dentro de la cuenca, además es necesario que las estaciones que se tomen en cuenta, tengan un periodo de registro común y de ser posible ya hayan sido revisadas en cuanto a la calidad y cantidad de información, deben estar completos los registros.

Para obtener el registro de lluvias de la cuenca, es posible aplicar el método de los polígonos de Thiessen para obtener el área de influencia, o el peso en por ciento, de cada una de las estaciones para calcular la precipitación media de la cuenca a escala diaria. Para el análisis de la cuenca del río Sonora, se dividió en 3 subcuencas debido a la configuración de los ríos tributarios a la corriente principal; para cada una de ellas se obtuvo la precipitación media a partir de los registros de las 19 estaciones y del área de influencia calculada con polígonos de Thiessen. En la Tabla 4.23 se pueden observar los porcentajes de influencia de cada una de las estaciones, tanto para la cuenca, como para las subcuencas, y a partir de las cuales se obtienen los registros de precipitación media.

Tabla 4.23 Áreas de Influencia y porcentaje de Thiessen de las estaciones climatológicas

Estaciones		Cuenca Río Sonora		Subcuenca Orégano		Subcuenca El Cajón		Subcuenca Zanjón	
		Área (m ²)	% Thiessen	Área (m ²)	% Thiessen	Área (m ²)	% Thiessen	Área (m ²)	% Thiessen
Felix Gomez	26035	182,159,580.7	0.86%					181,584,599.0	3.18%
Querobabi	26074	1,322,887,745.9	6.24%			407,737.8	0.01%	1,322,880,872.1	23.14%
Hermosillo	26139	202,646,804.4	0.96%					206,917,439.4	3.62%
Carbo	26016	1,543,293,240.5	7.28%					1,544,494,124.1	27.01%
Psa Abelardo	26090	400,485,215.7	1.89%					399,452,166.5	6.99%
Bacanuchi	26007	686,120,825.5	3.24%	49,307,546.8	0.42%	636,813,278.7	16.73%		
El Cajón	26180	1,277,268,842.4	6.02%	160,075,565.9	1.37%	342,122,219.2	8.99%	776,713,973.8	13.58%
El Oregano	26032	1,299,814,256.2	6.13%	719,388,374.4	6.16%			575,661,893.2	10.07%
Cucurpe	26025	1,536,086,911.9	7.24%	45,675,654.0	0.39%	1,324,044,350.4	34.79%	167,069,514.0	2.92%
Opedepe	26064	1,863,202,778.1	8.79%	206,182,503.6	1.77%	1,282,098,277.8	33.69%	372,617,028.6	6.52%
La Colorada	26046	417,427,655.9	1.97%	247,433,598.7	2.12%			170,452,305.7	2.98%
Ures (DGE)	26121	2,128,730,390.5	10.04%	2,035,226,784.5	17.42%	93,503,606.0	2.46%		
Cananea	26013	698,562,893.1	3.29%	698,562,893.1	5.98%				
Banamichi	26008	1,897,575,351.7	8.95%	1,897,514,555.5	16.25%	60,796.3	0.00%		
Árizpe	26005	1,805,967,846.3	8.52%	1,683,821,208.8	14.42%	122,146,637.5	3.21%		
La Cebolla	26232	2,289,362,238.0	10.80%	2,285,024,954.2	19.56%	4,337,283.9	0.11%		
Pueblo de Alamos	26199	1,204,485,499.7	5.68%	1,204,485,499.7	10.31%				
Mazatan	26052	377,103,079.8	1.78%	377,103,079.8	3.23%				
San Pedro de la Cueva	26088	70,776,571.1	0.33%	70,776,571.1	0.61%				
Área de la subcuenca (m²):		21,203,957,727.5	100%	11,680,578,790.0	100%	3,805,534,187.6	100%	5,717,843,916.4	100%

Para fines del funcionamiento de vaso, la subcuenca El Orégano se dividió en las subcuencas Puerta del Sol y El Molnito. En el Anexo 1, se presentan los registros obtenidos para las subcuencas.

Los nuevos registros de las subcuencas se extraerán los datos de lluvias máximas anuales, y éstos deberán analizarse mediante las pruebas de homogeneidad (Tablas 4.26 a 4.30) y de independencia (Tabla 2.31 y Figura 4.5) para verificar que estos registros sean confiables y puedan ser utilizados para el estudio hidrológico.

Tabla 4.24 Precipitaciones Máximas Anuales por subcuenca

	Máximos Lluvia media por subcuenca				
	El Orégano	Molinito	Puerta del Sol	El Cajón	El Zanjón
1980	43.81	35.83	57.18	55.86	35.61
1981	20.60	23.77	20.75	28.10	36.68
1982	41.12	41.81	40.75	41.62	44.27
1983	46.42	55.34	45.39	47.88	33.19
1984	40.20	28.90	46.36	38.62	50.12
1985	24.18	20.41	27.33	28.05	26.60
1986	34.58	33.68	41.63	37.52	40.82
1987	18.88	29.53	21.00	23.46	21.64
1988	32.26	34.51	32.61	23.24	39.15
1989	29.71	41.18	29.02	26.26	55.57
1990	36.19	75.59	32.99	34.23	57.65
1991	27.91	42.13	32.32	22.33	34.45
1992	35.74	35.16	35.78	35.09	63.10
1993	24.66	29.12	29.10	47.81	50.55
1994	73.57	62.60	88.33	114.97	100.56
1995	27.43	33.61	30.45	26.28	26.28
1996	36.01	24.75	44.50	44.58	46.37
1997	22.18	31.42	23.05	30.14	17.24
1998	25.60	43.34	16.70	31.36	46.00
1999	21.66	35.33	25.44	37.54	29.87
2000	38.88	40.59	40.97	72.76	38.62
2001	44.61	69.34	32.53	33.09	29.87
2002	15.77	19.75	18.91	21.85	18.12
2003	21.02	18.15	23.09	24.24	22.67

Tabla 4.25 Series de precipitaciones máximas anuales corregidas por intervalo fijo

Factor	Máximos (Factor 1.13) Lluvia media por subcuenca				
	El Orégano	Molinito	Puerta del Sol	El Cajón	El Zanjón
1.13					
1980	49.50	40.49	64.62	63.12	40.24
1981	23.28	26.86	23.44	31.75	41.45
1982	46.46	47.24	46.05	47.03	50.02
1983	52.45	62.53	51.29	54.10	37.50
1984	45.43	32.65	52.39	43.64	56.64
1985	27.33	23.06	30.89	31.70	30.06
1986	39.07	38.06	47.04	42.39	46.13
1987	21.34	33.37	23.73	26.51	24.45
1988	36.45	38.99	36.85	26.26	44.23
1989	33.57	46.54	32.79	29.67	62.80
1990	40.90	85.42	37.28	38.68	65.14
1991	31.54	47.61	36.52	25.23	38.92
1992	40.39	39.73	40.43	39.66	71.31
1993	27.86	32.90	32.88	54.03	57.13
1994	83.13	70.74	99.81	129.92	113.63
1995	30.99	37.98	34.41	29.69	29.69
1996	40.69	27.97	50.29	50.37	52.40
1997	25.07	35.50	26.04	34.06	19.48
1998	28.93	48.98	18.87	35.43	51.98
1999	24.48	39.93	28.75	42.42	33.76
2000	43.94	45.86	46.30	82.22	43.64
2001	50.41	78.36	36.76	37.39	33.75
2002	17.82	22.32	21.36	24.69	20.48
2003	23.76	20.51	26.09	27.39	25.61

Tabla 4.26 Parámetros de Ajuste para la subcuenca El Orégano

RESUMEN	% Error	Parámetros								
		μ	α	β	X_0	σ	$\mu_y = \lambda =$	$\sigma_y =$	ξ	X_1
Gumbel Momentos	4.11	30.54	10.97							
Gumbel Máxima Verosimilitud	4.60	30.85	10.05							
Gumbel Máxima Entropía	4.44	30.94	10.27							
Gumbel Momentos -L	4.15	30.59	10.87							
Normal Momentos	5.28	36.87				14.07				
Normal Momentos - L	5.37						36.87	13.35		
Log Normal (2p)	4.32						3.55	0.35		
Gamma 2p Momentos	4.31		5.37	6.87						
Gamma 2p Máxima Verosimilitud	4.73		4.47	8.25						
Gamma 2p Momentos - L	4.45		5.00	7.37						
Gamma 3p Momentos	4.13		10.53	1.78	18.08					
Gamma 3p Momentos Prob Pesada	4.06		8.70	2.72	13.21					
GVE Momentos	4.23	30.58	11.34	0.02						
GVE Momentos - L	14.35	36.59	0.35	0.04						
Pareto Momentos	5.36					17.10	21.39		0.10	
Pareto Máxima Verosimilitud	23.43					17.00	41.00		0.10	
Uniforme Momentos	6.09		12.50	61.23						
Uniforme Máxima Verosimilitud	16.49		17.82	83.13						
Exponencial Parámetro β	17.58	36.87		0.03						
Exp. Parám. Xo y β Momentos	4.30			14.07	22.80					
Exp. Parám. Xo y β Máx. Ver.	23.56			-2.06	19.88					17.82
Mínimo Error :	4.06	Gamma 3p Momentos de Pprobabilidad Pesada								

Tabla 4.27 Parámetros de Ajuste para la subcuenca El Cajón

RESUMEN	% Error	Parámetros								
		μ	α	β	X_0	σ	$\mu_y = \lambda =$	$\sigma_y =$	ξ	X_1
Gumbel Momentos	10.10	33.34	17.86							
Gumbel Máxima Verosimilitud	12.63	35.36	12.10							
Gumbel Máxima Entropía	11.56	35.79	13.59							
Gumbel Momentos -L	10.71	34.76	15.38							
Normal Momentos	13.22	43.64				22.90				
Normal Momentos - L	13.25						43.64	18.89		
Log Normal (2p)	11.23						3.69	0.40		
Gamma 2p Momentos	10.21		12.01	3.63						
Gamma 2p Máxima Verosimilitud	11.60		7.57	5.76						
Gamma 2p Momentos - L	11.14		8.59	5.08						
Gamma 3p Momentos	8.13		30.37	0.57	26.38					
Gamma 3p Momentos Prob Pesada	7.55		34.03	0.51	26.19					
GVE Momentos	13.38	35.30	22.63	0.26						
GVE Momentos - L	19.67	40.62	6.37	0.39						
Pareto Momentos	12.28					19.09	22.78		-0.08	
Pareto Máxima Verosimilitud	18.10					17.00	41.00		0.10	
Uniforme Momentos	15.03		3.98	83.30						
Uniforme Máxima Verosimilitud	39.81		24.69	129.92						
Exponencial Parámetro β	16.60	43.64		0.02						
Exp. Parám. Xo y β Momentos	8.20			22.90	20.74					
Exp. Parám. Xo y β Máx. Ver.	18.02			4.92	19.77					24.69
Mínimo Error :	7.55	Gamma 3p Momentos de Pprobabilidad Pesada								

Tabla 4.28 Parámetros de Ajuste para la subcuenca El Zanjón

RESUMEN	% Error	Parámetros								
		μ	α	β	X_0	σ	$\mu_y = \lambda =$	$\sigma_y =$	ξ	X_1
Gumbel Momentos	5.94	36.33	15.79							
Gumbel Máxima Verosimilitud	6.76	36.92	14.27							
Gumbel Máxima Entropía	6.54	37.03	14.56							
Gumbel Momentos -L	6.09	36.53	15.43							
Normal Momentos	7.86	45.44				20.24				
Normal Momentos - L	8.02						45.44	18.95		
Log Normal (2p)	6.04						3.73	0.41		
Gamma 2p Momentos	6.18		9.02	5.04						
Gamma 2p Máxima Verosimilitud	6.87		7.40	6.14						
Gamma 2p Momentos - L	6.44		8.27	5.49						
Gamma 3p Momentos	5.91		16.74	1.46	20.96					
Gamma 3p Momentos Prob Pesada	5.81		13.66	2.29	14.22					
GVE Momentos	6.24	36.49	16.29	0.03						
GVE Momentos - L	20.34	44.82	0.81	0.07						
Pareto Momentos	5.44					23.00	23.88		0.07	
Pareto Máxima Verosimilitud	15.07					17.00	41.00		0.10	
Uniforme Momentos	9.33		10.37	80.50						
Uniforme Máxima Verosimilitud	25.42		19.48	113.63						
Exponencial Parámetro β	19.02	45.44		0.02						
Exp. Parám. X_0 y β Momentos	6.00			20.24	25.19					
Exp. Parám. X_0 y β Máx. Ver.	36.87			-7.60	27.08					19.48
Mínimo Error :	5.44	Pareto Momentos								

Tabla 4.29 Parámetros de Ajuste para la subcuenca Puerta del Sol

RESUMEN	% Error	Parámetros								
		μ	α	β	X_0	σ	$\mu_y = \lambda =$	$\sigma_y =$	ξ	X_1
Gumbel Momentos	5.84	31.64	13.40							
Gumbel Máxima Verosimilitud	6.97	32.45	11.17							
Gumbel Máxima Entropía	6.60	32.63	11.67							
Gumbel Momentos -L	6.11	32.07	12.64							
Normal Momentos	7.74	39.37				17.18				
Normal Momentos - L	7.87						39.37	15.53		
Log Normal (2p)	6.35						3.60	0.38		
Gamma 2p Momentos	6.15		7.50	5.25						
Gamma 2p Máxima Verosimilitud	6.87		5.67	6.94						
Gamma 2p Momentos - L	6.52		6.38	6.17						
Gamma 3p Momentos	5.50		17.16	1.00	22.16					
Gamma 3p Momentos Prob Pesada	5.32		15.37	1.34	18.80					
GVE Momentos	6.39	31.91	14.56	0.07						
GVE Momentos - L	16.38	38.22	1.72	0.16						
Pareto Momentos	5.46					17.20	22.18		0.00	
Pareto Máxima Verosimilitud	20.74					17.00	41.00		0.10	
Uniforme Momentos	9.03		9.61	69.13						
Uniforme Máxima Verosimilitud	24.08		18.87	99.81						
Exponencial Parámetro β	16.96	39.37		0.03						
Exp. Parám. X_0 y β Momentos	5.35			17.18	22.19					
Exp. Parám. X_0 y β Máx. Ver.	25.76			-2.53	21.39					18.87
Mínimo Error :	5.32	Gamma 3p Momentos de Probabilidad Pesada								

Tabla 4.30 Parámetros de Ajuste para la subcuenca El Molinito

RESUMEN	% Error	Parámetros								
		μ	α	β	X_0	σ	$\mu_y = \lambda =$	$\sigma_y =$	ξ	X_1
Gumbel Momentos	4.09	35.05	13.17							
Gumbel Máxima Verosimilitud	4.82	35.33	12.13							
Gumbel Máxima Entropía	4.53	35.46	12.46							
Gumbel Momentos -L	4.07	35.02	13.22							
Normal Momentos	5.75	42.65				16.89				
Normal Momentos - L	5.85						42.65	16.24		
Log Normal (2p)	4.24						3.68	0.37		
Gamma 2p Momentos	4.32		6.69	6.38						
Gamma 2p Máxima Verosimilitud	4.89		5.70	7.48						
Gamma 2p Momentos - L	4.44		6.42	6.64						
Gamma 3p Momentos	4.07		9.73	3.01	13.34					
Gamma 3p Momentos Prob Pesada	3.56		13.38	1.82	18.30					
GVE Momentos	4.26	35.16	13.71	0.03						
GVE Momentos - L	16.54	41.85	1.11	0.11						
Pareto Momentos	13.46					24.39	19.92		0.21	
Pareto Máxima Verosimilitud	17.11					17.00	41.00		0.10	
Uniforme Momentos	6.81		13.40	71.90						
Uniforme Máxima Verosimilitud	13.02		20.51	85.42						
Exponencial Parámetro β	19.28	42.65		0.02						
Exp. Parám. X_0 y β Momentos	4.29			16.89	25.76					
Exp. Parám. X_0 y β Máx. Ver.	27.40			-2.60	23.11					20.51
Mínimo Error :	3.56	Gamma 3p Momentos de Probabilidad Pesada								

Tabla 4.31 Resultados de las pruebas de homogeneidad y de independencia de los registros de las subcuencas

		EL ORÉGANO	EL CAJÓN	EL ZANJÓN	PUERTA DEL SOL	EL MOLINITO
Estadísticos Muestrales	Tamaño de la muestra (n)	24	24	24	24	24
	Media de la muestra (X_m)	36.866	43.640	45.435	39.370	42.650
	Desviación Estándar (S)	14.068	22.897	20.242	17.183	16.889
	Varianza No Sesgada (S^2)	197.909	524.284	409.758	295.263	285.238
	Asimetría No Sesgada (g)	1.497	2.652	1.654	1.997	1.153
	Curtosis No Sesgada (K)	1.837	2.432	1.878	1.959	1.693
	Coefficiente de Variación (CV)	0.382	0.525	0.446	0.436	0.396
Pruebas de Homogeneidad	Helmert	no homogénea	no homogénea	no homogénea	homogénea	homogénea
	t de Student	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea
	Cramer	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea	homogénea
	Resultado (Homogeneidad)	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA
Prueba de Independencia al 95%		INDEPENDIENTE	INDEPENDIENTE	INDEPENDIENTE	INDEPENDIENTE	INDEPENDIENTE

Tabla 4.32 Correlogramas de Independencia

K	Límite Inferior	Límite Superior	EL ORÉGANO	EL CAJÓN	EL ZANJÓN	PUERTA DEL SOL	EL MOLINITO
1	-0.443	0.356	-0.175	0.024	0.005	-0.104	0.020
2	-0.454	0.363	0.040	-0.025	0.388	0.126	-0.348
3	-0.465	0.370	-0.245	-0.193	-0.259	-0.157	-0.072
4	-0.477	0.377	0.085	-0.010	0.268	-0.024	0.141
5	-0.490	0.385	-0.184	-0.180	-0.083	-0.155	-0.252
6	-0.505	0.393	0.199	0.193	0.044	0.119	-0.091
7	-0.520	0.402	-0.090	-0.108	-0.333	-0.251	0.278
8	-0.537	0.412	-0.115	-0.159	-0.134	-0.039	-0.025

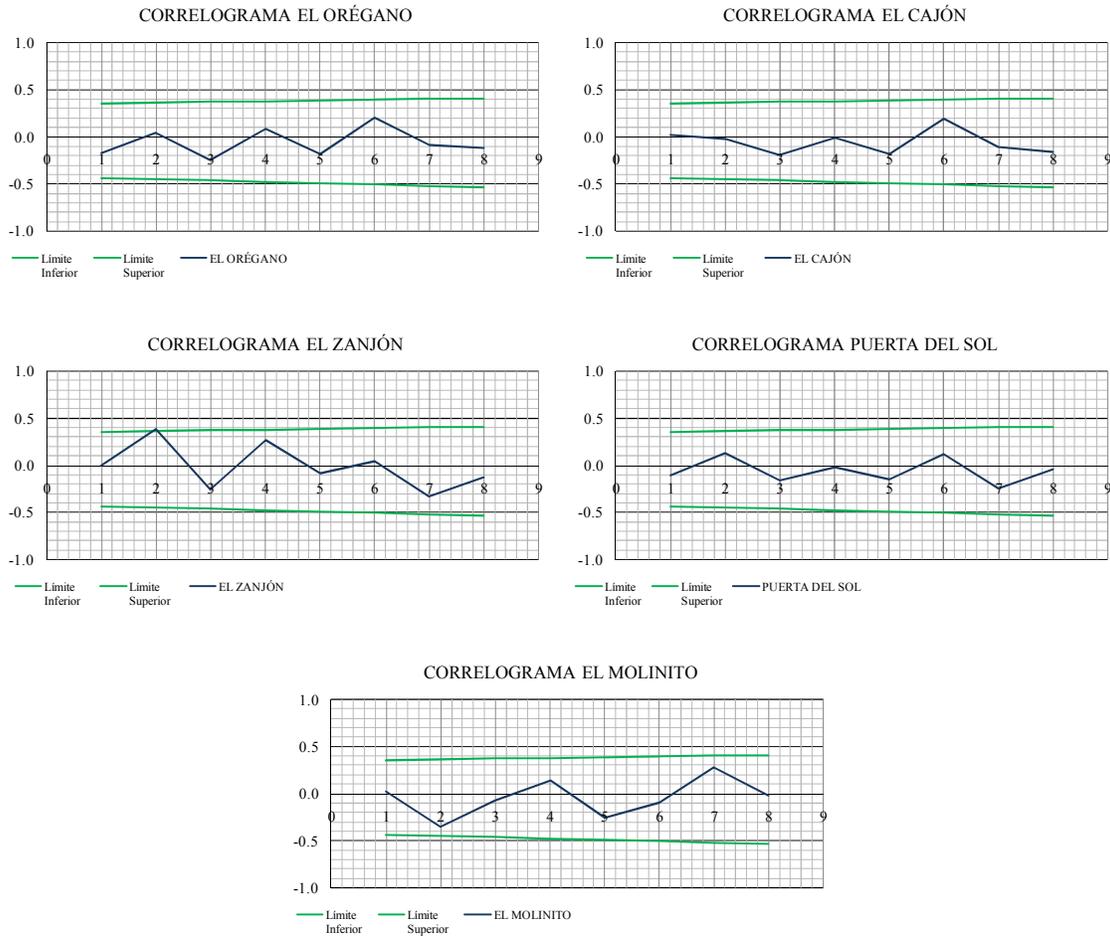


Figura 4.5 Correlogramas para las diferentes subcuencas en el sitio en estudio

De las Tablas 4.24 a 4.28 se observa que, nuevamente, la función de distribución de probabilidad Gamma de 3 parámetros es la que tiene un mejor ajuste a los registros de las subcuencas. En la Figura 4.5 se puede notar que los registros de las subcuencas son homogéneos y en las Tablas 4.20 y 4.30 se demuestra que son independientes; por lo tanto, pueden ser utilizados en los pasos posteriores de la metodología.

Así mismo, es posible obtener la extrapolación de lluvias para diferentes periodos de retorno para cada subcuenca, datos que serán requeridos en el subcapítulo anterior.

Tabla 4.33 Extrapolación de precipitaciones

EXTRAPOLACIÓN DE PRECIPITACIONES CON LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD QUE PREDOMINA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO hp (mm), Duración : 24 horas					
Estaciones	EL ORÉGANO	EL CAJÓN	EL ZANJÓN	PUERTA DEL SOL	EL MOLINITO
Funciones	Gamma 3p Momentos Prob Pesada				
2	34.08	34.58	41.10	34.66	38.46
5	47.27	54.50	60.09	50.86	55.03
10	55.98	72.05	72.87	62.58	66.51
20	64.19	91.07	85.06	74.17	77.61
50	74.62	118.05	100.67	89.47	92.01
100	82.31	139.66	112.25	101.09	102.79
200	89.89	162.18	123.72	112.78	113.54
500	99.78	193.23	138.77	128.37	127.74
1,000	107.21	217.62	150.11	140.28	138.49
2,000	114.60	242.74	161.43	152.29	149.28
5,000	124.34	276.99	176.40	168.32	163.60
10,000	131.70	303.65	187.73	180.58	174.48

4.5 Construcción de las curvas i - d - Tr

4.5.1 Factor de reducción por duración

Para el desarrollo de las curvas i - d - Tr de cada subcuenca, y aplicar la metodología descrita en el subcapítulo 3.3, se requiere del número de días de lluvia en cada año del registro de cada estación, así como la lluvia de 24 horas para un periodo de retorno, Tr, de 2 años, y la media de las precipitaciones máximas anuales; y a partir de estos datos se lee en la Figura 4.6 el valor de la precipitación con duración de 1 hora, y periodo de retorno de 2 años.

Se puede obtener, para cada estación, un factor de reducción por duración a partir de la precipitación con duración de 1 hora y la de 24 horas asociadas a un periodo de retorno de 2 años, este factor se calcula con el cociente:

$$R = \frac{hp_{Tr=2años}^{d=1\ hora}}{hp_{Tr=2años}^{d=24\ hora}}$$

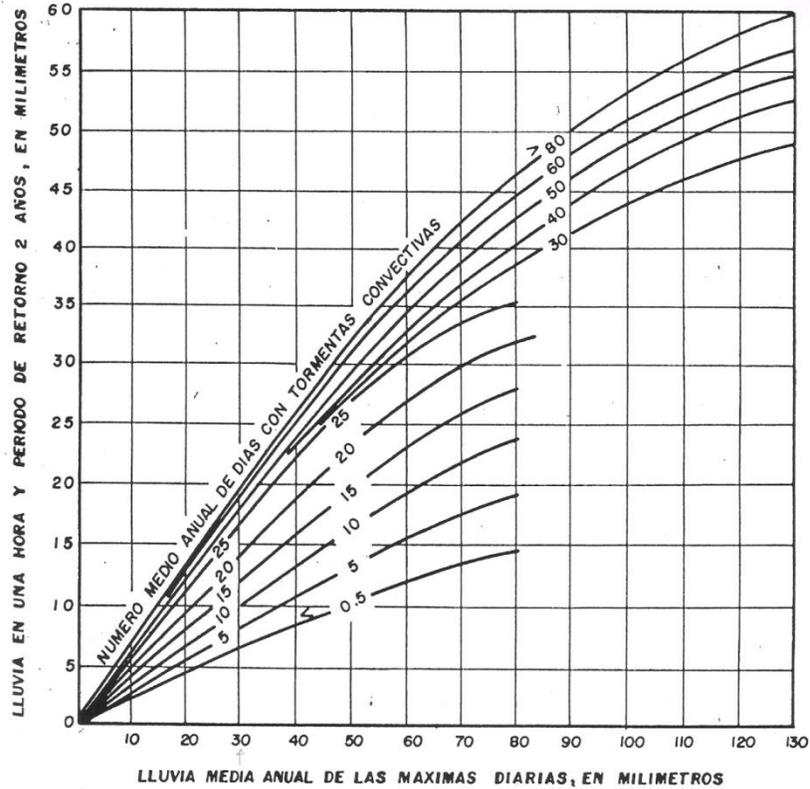


Figura 4.6 Relación empírica para estimar la lluvia de una hora y periodo de retorno de 2 años, en ausencia de registros pluviográficos

Con este factor R, es posible obtener la precipitación con duración de 1 hora para cualquier periodo de retorno; para ello se requiere multiplicar el factor R obtenido para cada estación, por la precipitación con duración de 24 horas de cada periodo de retorno. Las parejas de valores obtenidos, pueden ajustarse a una curva con comportamiento logarítmico, tal como se muestra en la Tabla 4.34 y la Figura 4.7.

Tabla 4.34 Precipitaciones con duraciones de 1 y 24 horas para diferentes periodos de retorno

Tr (años)	Félix Gómez 26035	
	Duración (hr)	
	1	24
2	28.74	43.31
5	43.53	65.60
10	56.05	84.46
20	69.37	104.54
50	88.01	132.63
100	102.80	154.91
200	118.11	177.98
500	139.09	209.61
1,000	155.50	234.33
2,000	172.32	259.68
5,000	195.19	294.14
10,000	212.93	320.88

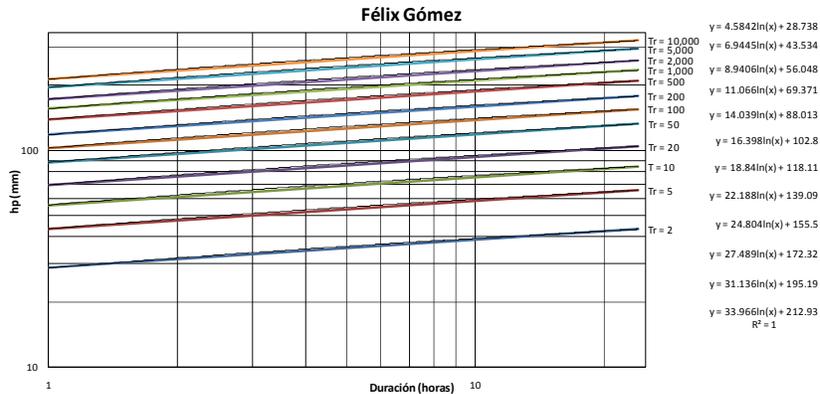


Figura 4.7 Ajuste de la precipitación con duración de 1 y 24 horas para diferentes periodos de retorno

Este ajuste se aplica a todas las estaciones, y debido a que con este procedimiento no es posible construir la curva de $hp - d - Tr$ para duraciones menores a una hora; para ello se recomienda utilizar los coeficientes siguientes:

Tabla 4.35 Coeficientes para determinar la curva $hp - d - Tr$ para duraciones menores a 1 hora

Coef. Durc. Menores a 1 hr	Duración (hr)
0.30	0.083
0.45	0.167
0.57	0.250
0.79	0.500
0.91	0.750
1.00	1.000

Con las ecuaciones de ajuste, se puede obtener la curva para cualquier duración y periodo de retorno y a partir de ellas, se puede dibujar la curva; a manera de ejemplo se muestra la curva para la estación Félix G.

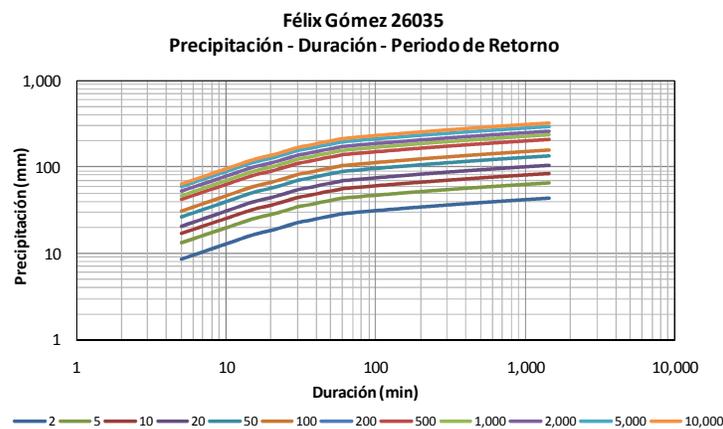


Figura 4.8 Curva $hp - d - Tr$ para cualquier duración de la estación Félix Gómez

Finalmente, para obtener las curvas de interés en este capítulo, $i - d - Tr$, únicamente se divide la precipitación entre la duración:

$$i_{Tr}^d = \frac{hp_{Tr}^d}{d}$$

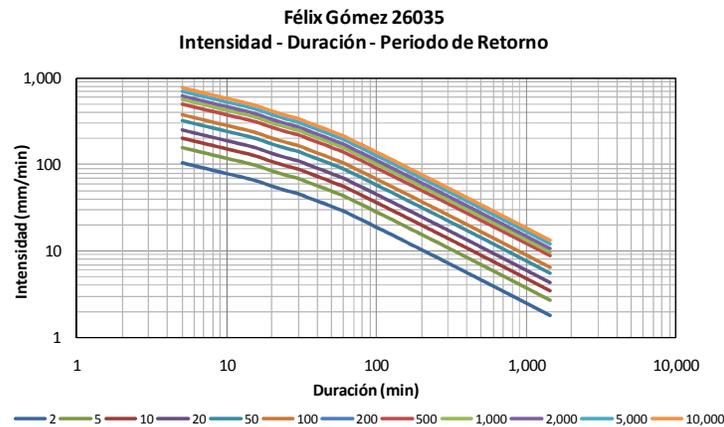


Figura 4.9 Curva $i - d - Tr$ de la estación Félix Gómez

Se obtienen las curvas para todas estaciones; en el Anexo 1 se presentan las curvas obtenidas para cada una de ellas. A partir de estas curvas, y por medio de los porcentajes de Thiessen se pueden obtener las curvas para cada subcuenca.

Para obtener el factor de reducción por subcuenca, se divide la precipitación con duración de 1 hora asociada a un periodo de retorno de 2 años entre la precipitación con duración de 24 horas asociada a un periodo de retorno de 2 años. En la Tabla 4.36 se presentan los resultados obtenidos para cada subcuenca.

Tabla 4.36 Factor de reducción por duración

Subcuenca	Factor de reducción por duración, R
El Orégano	0.6340
Puerta del Sol	0.6317
El Molinito	0.6381
El Cajón	0.6814
El Zanjón	0.6248

4.5.2 Factor de reducción por área (FRA)

Se propone emplear el método del Factor de ajuste por áreas fijas; este criterio considera que la ubicación del área corresponde a la cuenca en estudio, y por tanto no cambia en la secuencia del cálculo, este factor se obtiene por medio de la relación siguiente:

$$FRA = \frac{R_3}{R_4}$$

donde

R_3 precipitación media máxima anual para una duración y área dadas

R_4 precipitación puntual media máxima anual sobre toda el área para la cual se obtiene R_3 .

La metodología sugerida para obtener el FRA por este criterio se describe a continuación:

1. Con los registros de las estaciones de la cuenca se calcula, para cada tormenta, la precipitación media sobre toda el área, ya sea con el método de isoyetas o de Thiessen y se designa como r_a .
2. Se selecciona el máximo valor de r_a para cada año, es decir, se tiene $r_a(1)$ en el primer año, $r_a(2)$ en el segundo año, etc., hasta $r_a(N)$ en el año N .
3. Se calcula la precipitación media máxima anual como:

$$R_3 = \frac{\sum_{i=1}^N r_a(i)}{N}$$

donde $r_a(i)$ es la precipitación máxima anual correspondiente al año i ; N es el número de años.

4. En los registros de cada estación se selecciona la precipitación máxima registrada en el año, es decir, se tiene $r_{p1}(1)$, $r_{p1}(2)$, ..., para la estación 1, y se repite para las estaciones 2, 3, ..., j .
5. Se calcula la precipitación media máxima puntual para cada estación como:

$$\bar{R}_{p_j} = \frac{\sum_{i=1}^N r_{p_j}(i)}{N}$$

donde r_{p_j} es la precipitación máxima registrada en la estación j en el año i .

6. Se calcula la precipitación puntual media máxima anual sobre toda el área con la siguiente relación:

$$R_4 = \omega_1 \bar{R}_{p_1} + \omega_2 \bar{R}_{p_2} + \dots + \omega_j \bar{R}_{p_j}$$

donde ω_j es el porcentaje de influencia de cada estación j dentro de la cuenca calculado con el método de Thiessen.

7. Se calcula el cociente:

$$FRA = \frac{R_3}{R_4}$$

En las Tablas siguientes se presentan los resultados de aplicar el criterio descrito para calcular el factor de reducción por área.

Tabla 4.37 Cálculo de la precipitación media máxima anual. R_3 por subcuenca

Máximos (Factor 1.13)					
Lluvia media por subcuenca					
	El Orégano	Molinito	Puerta del Sol	El Cajón	El Zanjón
1980	49.50	40.49	64.62	63.12	40.24
1981	23.28	26.86	23.44	31.75	41.45
1982	46.46	47.24	46.05	47.03	50.02
1983	52.45	62.53	51.29	54.10	37.50
1984	45.43	32.65	52.39	43.64	56.64
1985	27.33	23.06	30.89	31.70	30.06
1986	39.07	38.06	47.04	42.39	46.13
1987	21.34	33.37	23.73	26.51	24.45
1988	36.45	38.99	36.85	26.26	44.23
1989	33.57	46.54	32.79	29.67	62.80
1990	40.90	85.42	37.28	38.68	65.14
1991	31.54	47.61	36.52	25.23	38.92
1992	40.39	39.73	40.43	39.66	71.31
1993	27.86	32.90	32.88	54.03	57.13
1994	83.13	70.74	99.81	129.92	113.63
1995	30.99	37.98	34.41	29.69	29.69
1996	40.69	27.97	50.29	50.37	52.40
1997	25.07	35.50	26.04	34.06	19.48
1998	28.93	48.98	18.87	35.43	51.98
1999	24.48	39.93	28.75	42.42	33.76
2000	43.94	45.86	46.30	82.22	43.64
2001	50.41	78.36	36.76	37.39	33.75
2002	17.82	22.32	21.36	24.69	20.48
2003	23.76	20.51	26.09	27.39	25.61
$R_3 =$	36.9	42.7	39.4	43.6	45.4

Tabla 4.38 Cálculo de la precipitación media máxima puntual para cada estación, R_{pj}

Máximos (Factor 1.13) Lluvia media por estación																			
	Felix Gomez	Querobabi	Hermosillo	Carbo	Pesa Abelardo	Bacanuchi	El Cajón	El Oregano	Cucurpe	Opedepe	La Colorada	Ures (DGE)	Cananea	Banamichi	Arizpe	La Cebolla	Pueblo de Alamos	Mazatlan	San Pedro de la Cueva
1980	47.5	38.4	76.4	39.6	77.6	55.1	97.0	109.8	67.8	159.1	50.9	36.9	45.3	94.4	87.0	48.1	50.3	31.1	51.4
1981	73.5	52.0	55.1	67.8	40.9	33.1	70.1	45.2	45.2	47.5	83.6	46.3	21.6	35.0	75.7	39.6	51.4	26.1	70.9
1982	47.5	79.1	73.0	45.2	63.8	47.9	79.1	59.9	54.2	47.5	40.2	45.2	59.9	49.7	41.8	57.6	54.2	44.0	35.6
1983	90.4	85.9	54.8	47.5	42.6	55.4	60.1	72.2	53.1	96.1	43.5	92.1	39.6	53.7	76.3	68.5	90.6	39.3	39.6
1984	79.1	73.5	71.1	55.4	57.6	44.4	83.4	64.4	90.4	44.9	40.7	80.5	45.7	50.3	98.9	51.1	47.7	45.7	54.2
1985	45.2	56.5	81.4	42.5	90.4	36.7	94.6	36.7	50.9	31.5	101.7	36.2	25.3	80.2	33.9	36.6	56.5	25.3	44.1
1986	46.3	56.5	70.6	92.7	73.5	57.0	122.6	71.1	48.6	33.5	72.2	62.2	36.6	72.3	53.7	54.2	45.2	27.4	56.5
1987	37.3	54.2	46.1	59.9	47.5	58.8	44.1	32.8	57.6	20.2	20.9	57.6	29.0	53.1	29.9	61.6	77.1	48.6	42.9
1988	41.8	35.6	135.0	73.5	92.6	49.7	49.9	73.1	47.5	36.5	44.1	90.4	35.9	51.4	35.5	54.2	45.3	162.7	65.5
1989	41.8	77.4	85.3	101.7	64.5	58.8	70.5	52.0	67.8	36.2	42.7	67.8	24.9	84.8	28.1	61.6	46.7	88.1	64.4
1990	55.0	43.5	127.1	58.2	111.4	55.4	72.3	226.0	90.4	45.9	79.6	76.8	32.7	75.7	31.1	98.6	58.7	135.6	84.8
1991	37.0	32.7	44.6	93.8	44.3	55.4	57.0	54.8	48.6	32.2	47.0	54.2	38.3	46.3	29.4	72.3	52.6	83.6	81.4
1992	60.4	52.9	160.5	83.6	118.3	93.2	120.0	108.1	74.6	47.1	64.8	57.6	57.1	73.5	44.7	72.9	41.8	61.0	67.8
1993	65.5	134.5	65.9	72.3	44.8	33.3	48.4	31.4	107.4	33.1	31.6	40.1	34.8	30.5	35.4	52.0	33.1	33.5	72.3
1994	98.6	66.6	172.4	169.5	137.8	143.6	165.2	126.6	157.1	97.8	90.5	67.9	104.5	126.6	103.1	104.3	67.7	84.8	45.2
1995	11.3	3.7	69.0	43.5	50.7	34.8	48.5	39.0	55.4	28.1	34.2	53.7	27.2	42.9	26.5	42.9	32.4	76.8	39.6
1996	102.8	6.7	45.2	122.0	40.7	39.6	52.8	54.2	84.8	37.3	49.9	35.0	34.8	98.3	42.4	44.1	51.2	96.1	38.1
1997	32.8	2.3	65.5	46.3	44.2	45.2	53.2	46.6	65.5	22.7	25.4	63.3	25.3	76.8	24.7	40.7	26.5	39.6	25.0
1998	39.7	74.0	49.7	54.2	49.4	46.3	74.1	74.6	39.6	36.0	45.9	42.4	25.0	37.3	26.9	35.0	41.3	50.9	38.5
1999	23.8	46.3	89.5	70.1	60.2	39.6	50.5	52.0	101.7	20.5	34.5	30.0	26.0	58.8	23.3	72.9	39.2	67.8	31.7
2000	43.8	7.3	141.8	56.5	99.9	102.8	94.8	102.6	125.4	45.0	49.1	43.8	52.9	78.0	25.4	67.8	71.2	76.8	43.3
2001	39.6	5.2	88.1	59.9	65.7	39.6	69.5	60.5	54.2	43.4	49.3	110.7	31.9	67.2	11.5	106.8	132.2	9.0	52.6
2002	36.7	17.0	117.5	39.0	74.0	37.7	39.3	47.5	44.1	16.4	25.7	20.9	19.6	28.3	32.8	39.6	22.6	58.8	19.5
2003	67.8	23.9	23.7	28.3	23.0	50.3	70.4	56.5	37.9	21.6	20.4	20.6	32.0	72.3	32.8	64.4	26.1	46.3	18.8
$R_{pj} =$	52.7	46.9	83.7	67.6	67.3	54.7	74.5	70.7	69.6	45.0	49.5	55.5	37.7	64.1	43.8	60.3	52.6	60.8	49.3
% de Thiessen																			
El Oregano						0.4%	1.4%	6.2%	0.4%	1.8%	2.1%	17.4%	6.0%	16.2%	14.4%	19.6%	10.3%	3.2%	0.6%
Molinito						3.8%	17.9%		0.9%		5.9%	35.0%		0.1%			25.0%	9.8%	1.6%
Puertadel Sol						0.7%			0.5%	2.2%		8.5%	8.9%	24.8%	22.1%	29.8%	2.4%		0.2%
El Cajón		0.0%				16.7%	9.0%		34.8%	33.7%		2.5%		0.0%	3.2%	0.1%			
El Zanjón	3.2%	23.1%	3.6%	27.0%	7.0%		13.6%	10.1%	2.9%	6.5%	3.0%								

Finalmente, con los porcentajes de influencia de cada estación, se calcula la precipitación puntual media máxima anual sobre toda el área, R_4 , y se calcula el FRA para cada subcuenca.

Tabla 4.39 Cálculo del FRA

	R_3	R_4	FRA	Área, km^2
El Oregano	36.9	55.9	0.66	11,680.6
Molinito	42.7	58.2	0.73	4,008.2
Puerta del Sol	39.4	54.7	0.72	7,671.5
El Cajón	43.6	58.1	0.75	3,805.5
El Zanjón	45.4	62.2	0.73	5,717.8

Por lo tanto, las precipitaciones de la subcuenca deberán ser afectadas, tanto por el factor de reducción por duración, como por el factor de reducción por área, y a partir de estos ajustes se pueden determinar las curvas $hp - d - Tr$ y $i - d - Tr$. En las Figuras 4.10 a 4.14 se presentan las curvas para cada subcuenca.

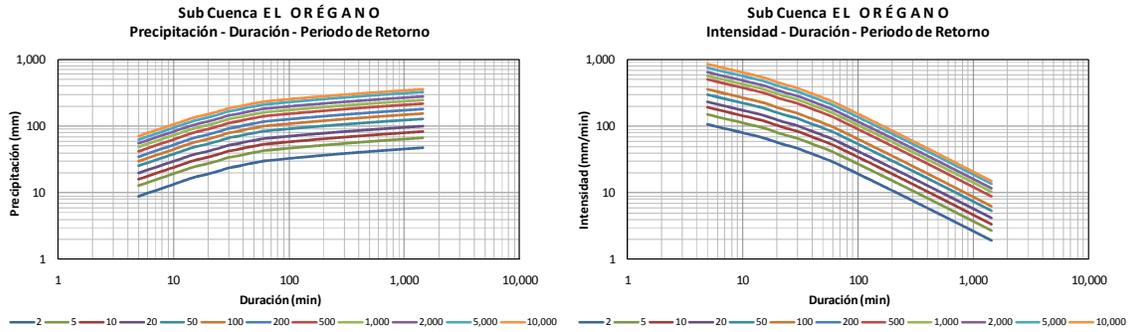


Figura 4.10 Curvas a) $hp - d - Tr$ y, b) $i - d - Tr$ de la subcuenca El Orégano

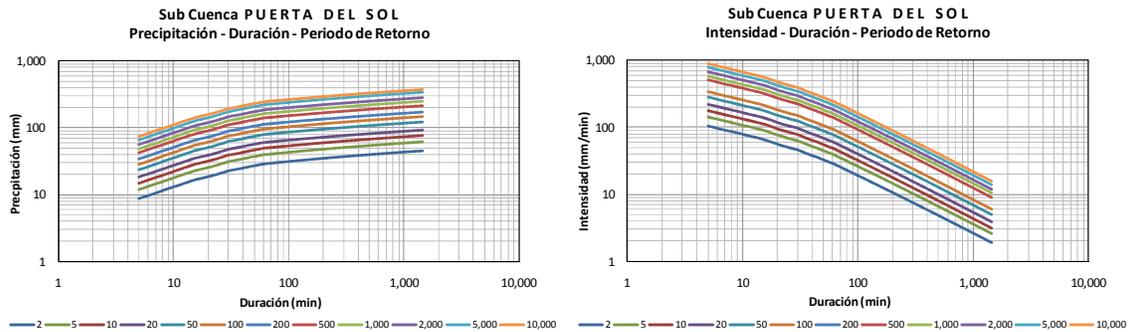


Figura 4.11 Curvas a) $hp - d - Tr$ y, b) $i - d - Tr$ de la subcuenca Puerta del Sol

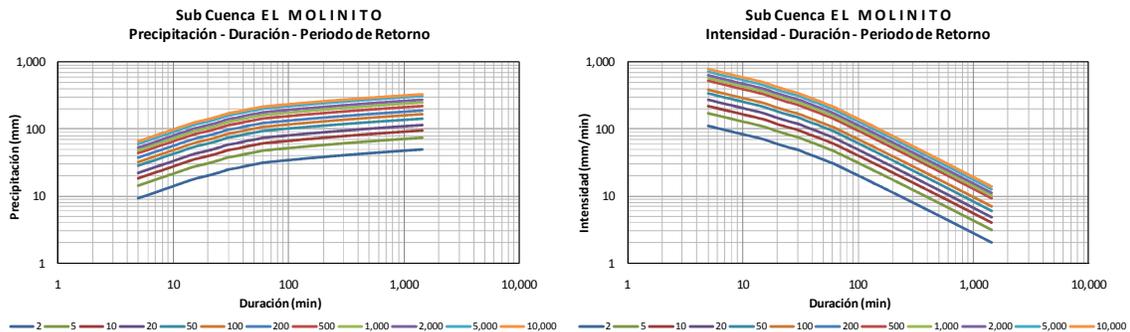


Figura 4.12 Curvas a) $hp - d - Tr$ y, b) $i - d - Tr$ de la subcuenca El Molinito

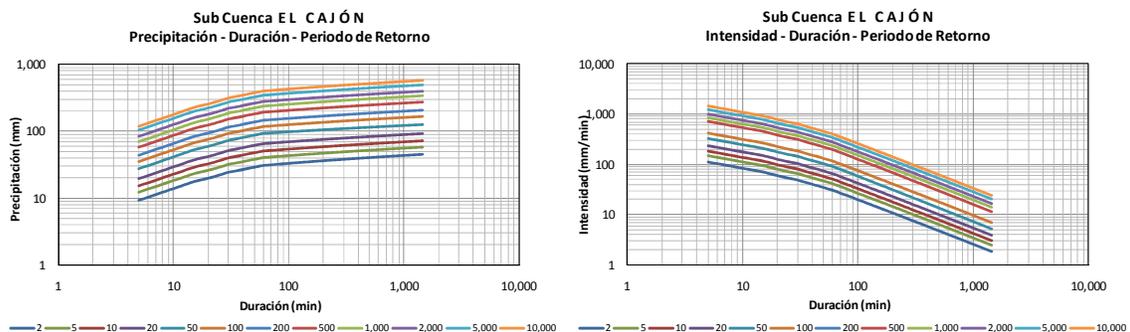


Figura 4.13 Curvas a) $hp - d - Tr$ y, b) $i - d - Tr$ de la subcuenca El Cajón

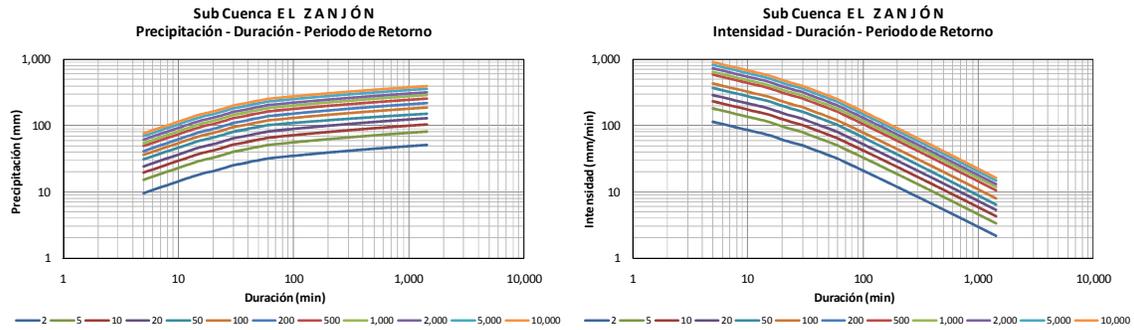


Figura 4.14 Curvas a) $hp - d - Tr$ y, b) $i - d - Tr$ de la subcuenca El Zanjón

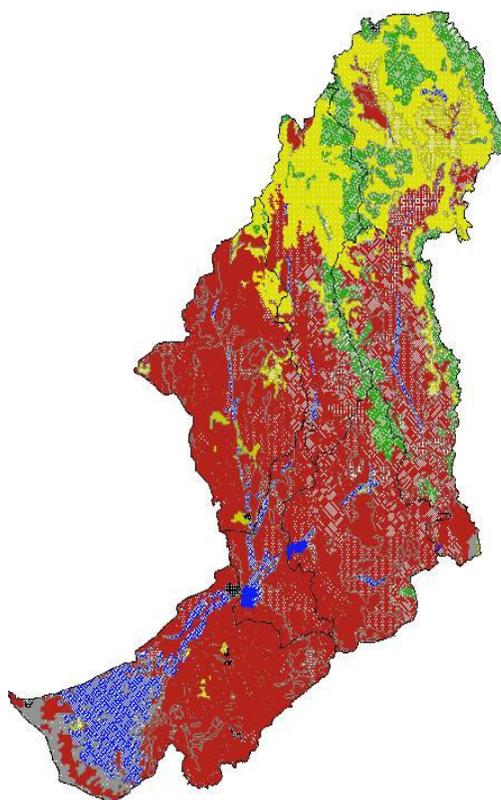
4.6 Selección del criterio para estimar pérdidas

Con el fin de estimar la precipitación en exceso, y de acuerdo con la información existente, se utilizó el método del número de escurrimiento, N , para el cálculo de pérdidas; el cual consiste en utilizar la información fuente de usos de suelo, así como edafología en las subcuencas; el INEGI cuenta con cartas de “Uso de suelo y Vegetación, Cobertura Nacional, escala 1:1,000,000” y de “Edafología y de Unidades de Suelo, Cobertura Nacional, escala 1:1,000,000.

La información de Usos del Suelo y Edafología en la cuenca hidrológica del río Sonora se presenta en los planos CEA-DPR-017-04-5 Uso de Suelo de la Cuenca Hidrológica del río Sonora, y CEA-DPR-017-04-6 Usos de Suelo Predominantes dentro de la Cuenca Hidrológica del Río Sonora”, ambas referencia gráficas se anexan a esta sección del informe.

Estas cartas deberán ser sobrepuestas para identificar las unidades y tipo de suelo; y de acuerdo con la clasificación propuesta por el Soil Conservation Service, determinar los números de escurrimiento ponderados para cada subcuenca; es decir, que de acuerdo con el tipo y superficie que ocupa, se obtiene un promedio ponderado que representa el número de escurrimiento de la subcuenca.

Para este trabajo, de acuerdo con la información disponible, se toma como dato el número de escurrimiento obtenido mediante el procedimiento descrito; el cual fue proporcionado por el Instituto de Ingeniería, UNAM.



Uso de Suelo	Área Total (km ²)	% DE SUPERFICIE
Bosque	2,517.54	9.43%
Agricultura de Riego	1,892.74	7.09%
Matorral	16,929.04	63.43%
Pastizal	4,804.94	18.00%
Otros	544.87	2.04%
ÁREA TOTAL (Km ²)	26,689.13	100.00%

Figura 4.15 Usos de suelo de la cuenca del río Sonora

Tabla 4.40 Números de escurrimiento (N) de la cuenca del río Sonora, (Instituto de Ingeniería, UNAM)

Subcuenca	Ac (Km ²)	N _{Pond}
S-1 Sinoquipe	4,545.80	66
S-2 Puerta del Sol	3,180.81	65
S-3 El Molinito	3,689.40	63
S-4 Teópari	320.89	69
S-5 Las Chivas	3,584.21	68
S-6 Río Zanjón	4,321.71	69
S-8 Abelardo L. Rodríguez	1,566.40	68
Cuenca hasta presa ALR	21,209.22	68*

Debido a que en este trabajo, la cuenca fue dividida, únicamente, en 3 y 4 subcuencas, los números de escurrimiento utilizados se presentan en la tabla 4.41.

Tabla 4.41 Números de escurrimiento empleados en análisis, cuenca del río Sonora

Subcuenca	Ac (Km ²)	N _{pond}
ORÉGANO	11680.58	63
MOLINITO	4008.19	63
PUERTA DEL SOL	7671.45	65
EL CAJÓN	3805.53	68
EL ZANJÓN	5717.84	69

4.6.1 Precipitación efectiva (Pe)

De acuerdo con el apartado de las características fisiográficas de la cuenca y las expresiones del capítulo 3.7.1.3, se obtiene la tabla 4.42.

Tabla 4.42 Características fisiográficas por subcuenca, y sus parámetros para la obtención de hidrogramas

Características fisiográficas						
SUBCUENCA	área km ²	Longitud Cauce km	Pendiente	t _c (hr)	t _p (hr)	q _p (m ³ /s/mm)
ORÉGANO	11680.58	281.26	0.00417	42.07	31.73	76.53
MOLINITO	4008.19	62.57	0.00252	16.05	13.64	61.10
PUERTA DEL SOL	7671.45	217.88	0.00496	32.32	25.08	63.59
EL CAJÓN	3805.53	175.26	0.00503	27.19	21.53	36.74
EL ZANJÓN	5717.84	156.11	0.00406	27.02	21.41	55.51

4.6.1.1 Método de bloques alternos

A partir de las características fisiográficas, del número de escurrimiento y de las curvas hp – d – Tr, y aplicando el método de bloques alternos, se calcula la precipitación efectiva.

La precipitación efectiva total, se calcula con la expresión siguiente:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

$$S = \frac{25,400}{N} - 254$$

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{5,080}{N} + 50.8\right)^2}{P + \frac{20,320}{N} - 203.2}$$

de tal forma, que $P_{min} = \frac{5,080}{N} + 50.8$

Se hace la suposición de que la duración efectiva es de 3 horas con base en varias tormentas, y a partir de ésta, se calculan los parámetros para la relación lluvia – escurrimiento. Para las subcuencas se tienen los parámetros descritos en las tablas 4.43 a 4.47.

Tabla 4.43 Parámetros para la obtención del HU de la subcuenca El Orégano

Duración efectiva (h)	de =	1.00
Tiempo de Concentración (h)	tc =	42.07
Tiempo de Retraso (h)	tr =	25.24
Tiempo de Base (h)	tb =	84.71
Tiempo de pico (h)	tp =	31.73
Gasto de Pico (m³/s/mm)	qp =	76.53
Precipitación mín (mm)	P _{mín} =	29.83

Tabla 4.44 Parámetros para la obtención del HU de la subcuenca El Molinito

Duración efectiva (h)	de =	1.00
Tiempo de Concentración (h)	tc =	16.05
Tiempo de Retraso (h)	tr =	9.63
Tiempo de Base (h)	tb =	36.41
Tiempo de pico (h)	tp =	13.64
Gasto de Pico(m³/s/mm)	qp =	61.10
Precipitación mín (mm)	P _{mín} =	29.83

Tabla 4.45 Parámetros para la obtención del HU de la subcuenca Puerta del Sol

Duración efectiva (h)	de =	1.00
Tiempo de Concentración (h)	tc =	32.32
Tiempo de Retraso (h)	tr =	19.39
Tiempo de Base (h)	tb =	66.95
Tiempo de pico (h)	tp =	25.08
Gasto de Pico (m³/s/mm)	qp =	63.59
Precipitación mín (mm)	P _{mín} =	29.83

Tabla 4.46 Parámetros para la obtención del HU de la subcuenca El Cajón

Duración efectiva (h)	de =	1.00
Tiempo de Concentración (h)	tc =	27.19
Tiempo de Retraso (h)	tr =	16.31
Tiempo de Base (h)	tb =	57.48
Tiempo de pico (h)	tp =	21.53
Gasto de Pico (m³/s/mm)	qp =	36.74
Precipitación mín (mm)	P _{mín} =	23.91

Tabla 4.47 Parámetros para la obtención del HU de la subcuenca El Zanjón

Duración efectiva (h)	de =	1.00
Tiempo de Concentración (h)	tc =	27.02
Tiempo de Retraso (h)	tr =	16.21
Tiempo de Base (h)	tb =	57.17
Tiempo de pico (h)	tp =	21.41
Gasto de Pico (m³/s/mm)	qp =	55.51
Precipitación mín (mm)	P _{mín} =	22.82

Se calcula la precipitación efectiva para cada periodo de retorno con la precipitación acumulada para una duración igual al tiempo de concentración, y el número de escurrimiento.

Para aplicar el método de bloques alternos, se propone que el incremento de tiempo de los bloques sea de 3 horas; por lo tanto, para cada subcuenca variará el número de bloques, dependiendo del tiempo de concentración.

De las curvas $h_p - d - Tr$ de cada subcuenca se obtiene la precipitación para múltiplos del incremento de tiempo propuesto, el cual es de 3 horas, se obtiene el incremento de la precipitación, de tal forma que para los primeros 180 minutos se toma toda la precipitación acumulada hasta ese momento, para el segundo incremento se calcula la diferencia entre la precipitación para la duración de 360 minutos y la precipitación de 180 minutos; y así sucesivamente. En seguida, se acomodan los bloques de tal manera que el incremento mayor se coloca en el centro, el segundo mayor del lado derecho, el tercero mayor del lado izquierdo, el cuarto mayor del lado derecho, y así sucesivamente; es decir, se alternan los incrementos acomodándolos de mayor a menor.

Para el cálculo de la precipitación efectiva distribuida para cada periodo de retorno, se calcula el coeficiente de escurrimiento:

$$C_e = \frac{P_e}{P}$$

Los bloques alternos se multiplican por el coeficiente de escurrimiento, y estos nuevos bloques representarán la precipitación efectiva. En la tabla siguiente se ejemplifica el cálculo de la precipitación efectiva para una tormenta asociada a un periodo de retorno de 2 años en la subcuenca El Orégano.

Tabla 4.48 Cálculo de la precipitación efectiva, coeficiente de escurrimiento (Ce) e índice de infiltración de la subcuenca El Orégano, Tr = 2 años

Índice de Infiltración		
Pe (mm)	Ce	φ (mm/h)
2.51	0.050	32.461

Tabla 4.49 Bloques alternos para la subcuenca El Orégano, Tr = 2 años

SUBCUENCA: E L O R É G A N O						
Tr = 2						
	Duración (min)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación incremental (mm)	Precipitación (mm)	Pe (mm)	Pe _{FRA} (mm)
1	180	34.975	34.975	0.512	0.025	0.017
2	360	39.052	4.077	0.561	0.028	0.018
3	540	41.437	2.385	0.693	0.034	0.023
4	720	43.129	1.692	0.907	0.045	0.030
5	900	44.442	1.313	1.313	0.065	0.043
6	1,080	45.514	1.072	2.385	0.119	0.078
7	1,260	46.421	0.907	34.975	1.741	1.149
8	1,440	47.206	0.785	4.077	0.203	0.134
9	1,620	47.899	0.693	1.692	0.084	0.056
10	1,800	48.519	0.620	1.072	0.053	0.035
11	1,980	49.079	0.561	0.785	0.039	0.026
12	2,160	49.591	0.512	0.620	0.031	0.020
13	2,340	50.062	0.471	0.512	0.025	0.017
14	2,520	50.498	0.436	0.436	0.022	0.014

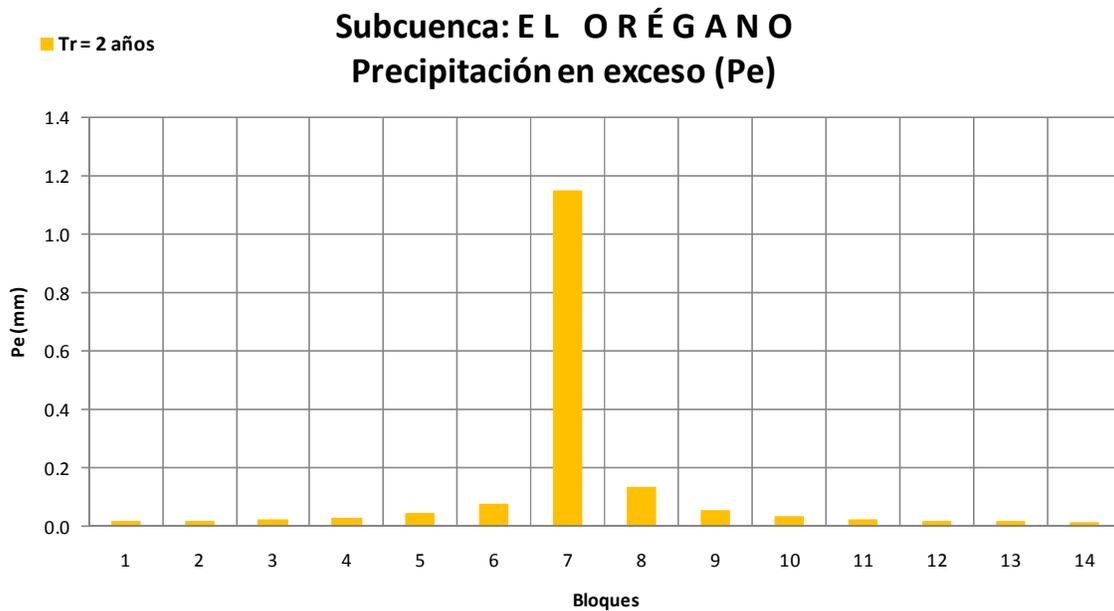


Figura 4.16 Precipitación efectiva en bloques alternos en la subcuenca El Orégano, Tr = 2 Años

A continuación se presentan la precipitación en bloques alternos para cada subcuenca, para un periodo de retorno de 10,000 años. En el Anexo 1 se presentan los bloques alternos para cada subcuenca y para diferentes periodos de retorno.

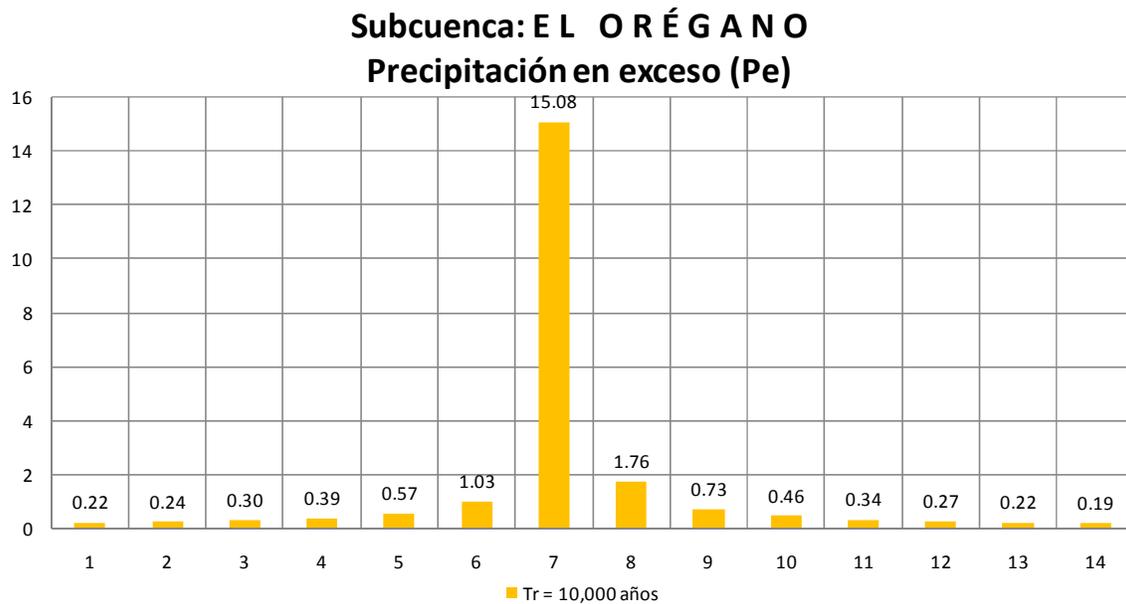


Figura 4.17 Precipitación efectiva en bloques alternos en la subcuenca El Orégano, Tr = 10,000 Años

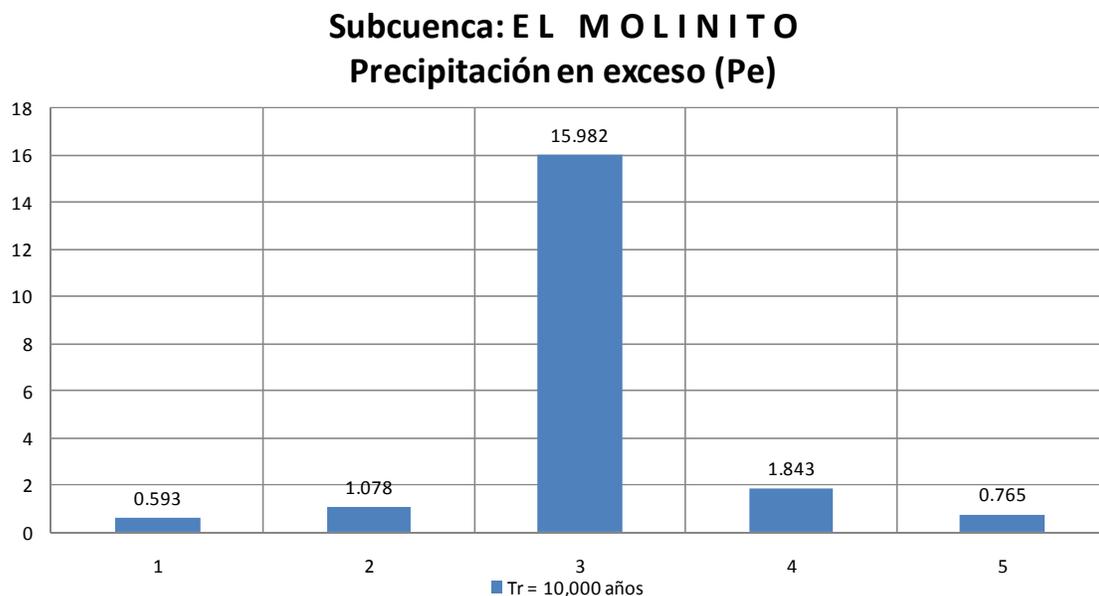


Figura 4.18 Precipitación efectiva en bloques alternos en la subcuenca El Molinito, Tr = 10,000 Años

Subcuenca: P U E R T A D E L S O L
Precipitación en exceso (Pe)

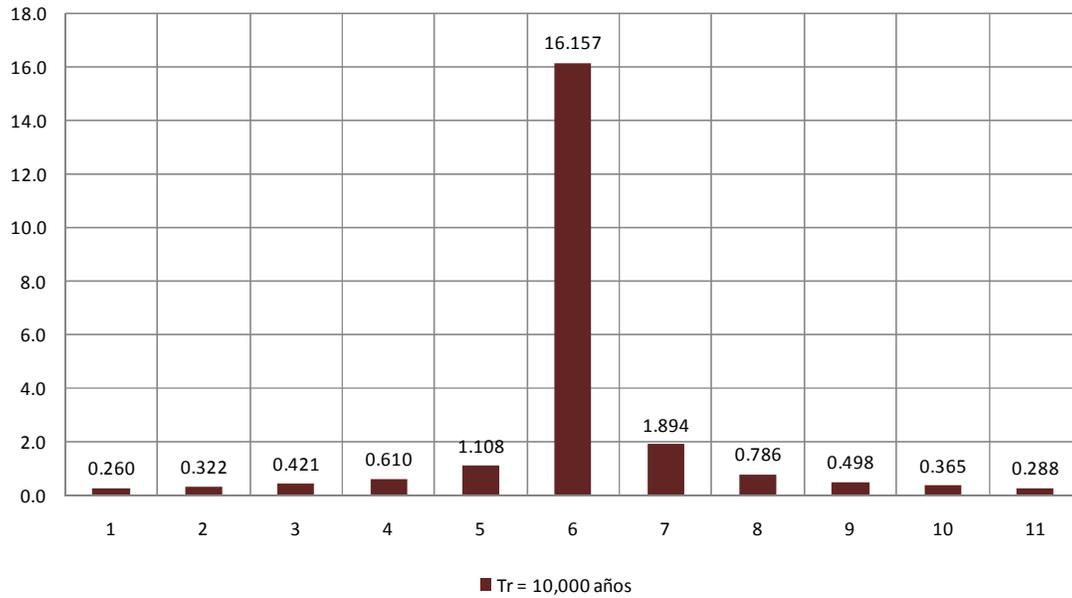


Figura 4.19 Precipitación efectiva en bloques alternos en la subcuenca Puerta del Sol, Tr = 10,000 Años

Subcuenca: E L C A J Ó N
Precipitación en exceso (Pe)

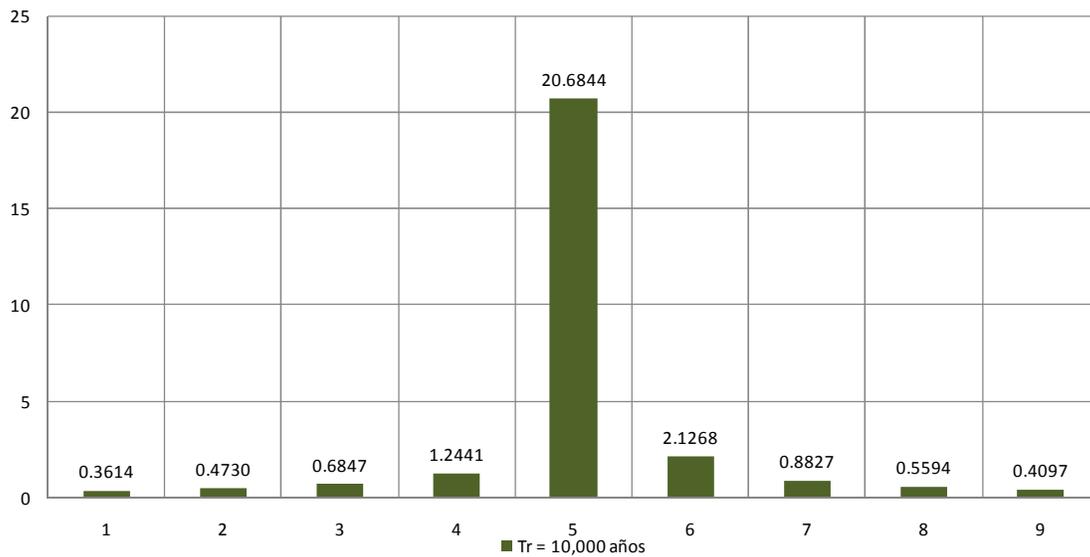


Figura 4.20 Precipitación efectiva en bloques alternos en la subcuenca El Cajón, Tr = 10,000 Años

Subcuenca: E L Z A N J Ó N
Precipitación en exceso (Pe)

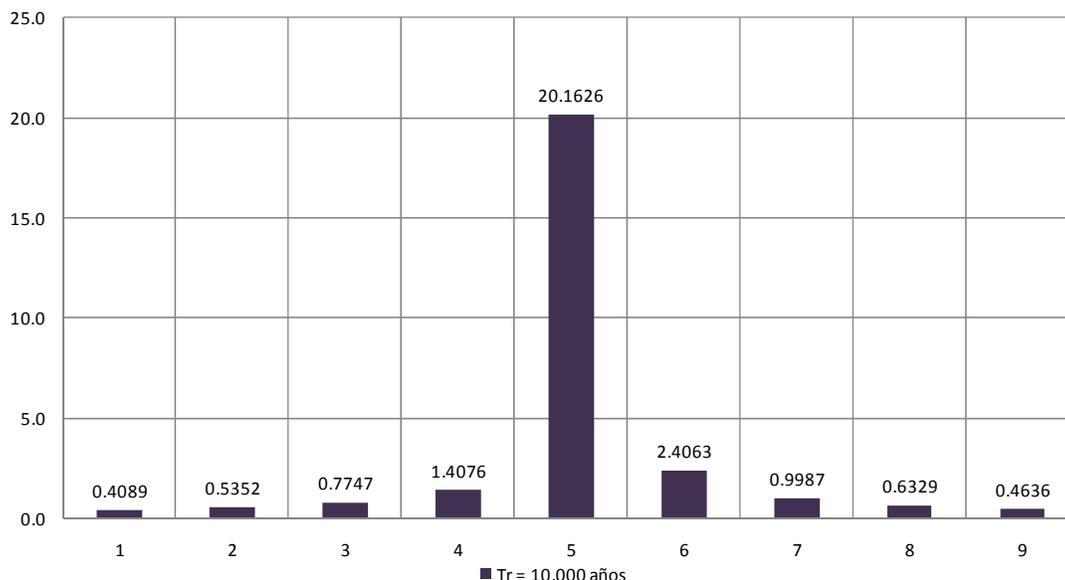


Figura 4.21 Precipitación efectiva en bloques alternos en la subcuenca El Zanjón, Tr = 10,000 Años

4.7 Relación lluvia - escurrimiento

Debido a lo escaso de la información, en este trabajo se sugiere la aplicación del hidrograma unitario sintético adimensional (HUA), para el cual se describe la metodología en el subcapítulo 3.7.1.3. De la Tabla 4.42 se toman los parámetros fisiográficos de la cuenca y los parámetros que dan forma al HU.

Tabla 4.50 Hidrograma Unitario Adimensional

HUS ADIM SCS			
t/tp	q/qp	t/tp	q/qp
0.00	0.00	1.20	0.93
0.10	0.03	1.30	0.86
0.30	0.19	1.50	0.68
0.40	0.31	1.70	0.46
0.60	0.66	1.90	0.33
0.70	0.82	2.20	0.21
0.80	0.93	2.60	0.11
0.90	0.99	3.20	0.04
1.00	1.00	5.00	0.00
1.10	0.99		

El tiempo de pico y el gasto de pico se multiplican por el HUA para obtener los hidrogramas unitarios para cada subcuenca. Es importante que se mantengan los hidrogramas en incrementos

de tiempo constantes, y de preferencia con números cerrados, es por ello que se deberán interpolar las ordenadas de los hidrogramas para un incremento de tiempo definido.

Tabla 4.51 Hidrogramas Unitarios de las subcuencas

tp = 31.73		tp = 13.64		tp = 25.08		tp = 21.53		tp = 21.41	
qp = 76.53		qp = 61.10		qp = 63.59		qp = 36.74		qp = 55.51	
HU El Orégano		HU El Molinito		HU Puerta del Sol		HU El Cajón		HU El Zanjón	
t (h)	q (m ³ /s/mm)	t (h)	q (m ³ /s/mm)	t (h)	q (m ³ /s/mm)	t (h)	q (m ³ /s/mm)	t (h)	q (m ³ /s/mm)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.17	2.30	1.36	1.83	2.51	1.91	2.15	1.10	2.14	1.67
9.52	14.54	4.09	11.61	7.52	12.08	6.46	6.98	6.42	10.55
12.69	23.72	5.45	18.94	10.03	19.71	8.61	11.39	8.56	17.21
19.04	50.51	8.18	40.33	15.05	41.97	12.92	24.25	12.85	36.63
22.21	62.75	9.55	50.10	17.55	52.14	15.07	30.13	14.99	45.52
25.38	71.17	10.91	56.82	20.06	59.14	17.22	34.17	17.13	51.62
28.55	75.76	12.27	60.49	22.57	62.95	19.38	36.38	19.27	54.95
31.73	76.53	13.64	61.10	25.08	63.59	21.53	36.74	21.41	55.51
34.90	75.76	15.00	60.49	27.58	62.95	23.68	36.38	23.55	54.95
38.07	71.17	16.36	56.82	30.09	59.14	25.83	34.17	25.69	51.62
41.24	65.81	17.73	52.55	32.60	54.69	27.99	31.60	27.84	47.74
47.59	52.04	20.45	41.55	37.61	43.24	32.29	24.99	32.12	37.74
53.94	35.20	23.18	28.11	42.63	29.25	36.60	16.90	36.40	25.53
60.28	25.25	25.91	20.16	47.65	20.98	40.90	12.13	40.68	18.32
69.80	16.07	30.00	12.83	55.17	13.35	47.36	7.72	47.11	11.66
82.49	8.42	35.45	6.72	65.20	6.99	55.97	4.04	55.67	6.11
101.53	3.06	43.63	2.44	80.24	2.54	68.89	1.47	68.52	2.22
158.63	0.00	68.18	0.00	125.38	0.00	107.64	0.00	107.06	0.00

HUS Adim : EL ORÉGANO

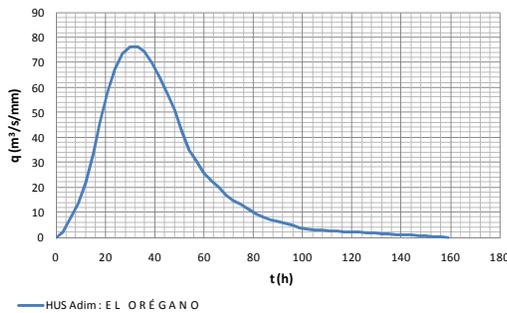


Figura 4.22 Hidrograma Unitario, subcuena El Orégano

HUS Adim : EL MOLINITO

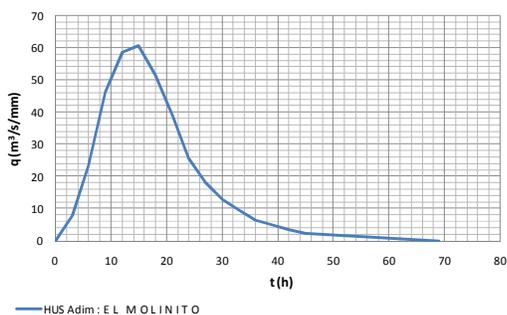


Figura 4.23 Hidrograma Unitario, subcuena El Molinito

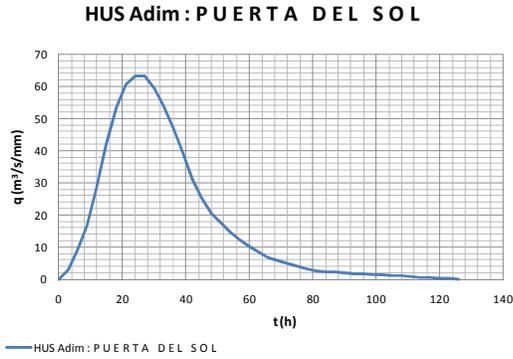


Figura 4.24 Hidrograma Unitario, subcuena Puerta del Sol

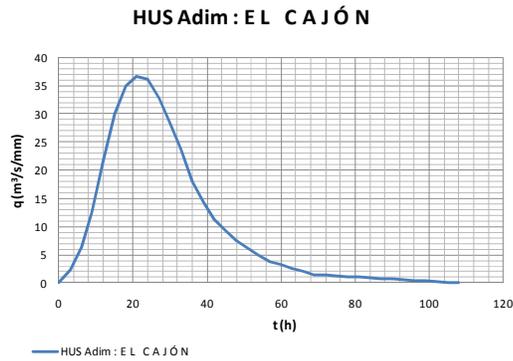


Figura 4.25 Hidrograma Unitario, subcuena El Cajón

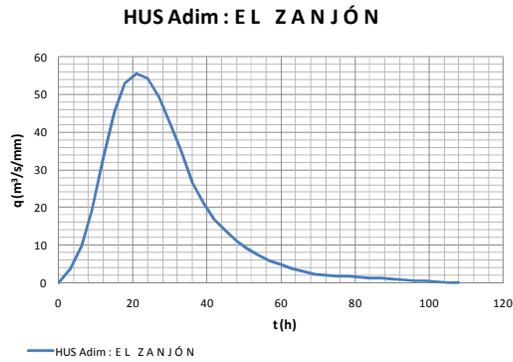


Figura 4.26 Hidrograma Unitario, subcuena El Zanjón

Para cada subcuena, a partir de los hidrogramas unitarios y de la precipitación efectiva en bloques alternos obtenidos en el capítulo 4.6, se pueden calcular las avenidas para diferentes periodos de retorno. Para ello es importante aplicar una convolución para sumar las precipitaciones. Cada barra del hidrograma de precipitación efectiva deberá multiplicarse por el hidrograma unitario, y siguiendo el orden cronológico se recorren el incremento de tiempo, de tal forma que para obtener el hidrograma para la precipitación efectiva completa, se suman las ordenadas que coincidan en el mismo incremento de tiempo. En la Tabla 4.52 se describe el procedimiento.

Tabla 4.52 Cálculo del hidrograma de escurrimiento directo a través de bloques alternos y del HUSA

Bloques	Tr = 2 años														Q (m³/s)	
	Hidrogramas Asociados a cada bloque de precipitación efectiva															
	Pe (mm)	0.017	0.018	0.023	0.030	0.043	0.078	1.149	0.134	0.056	0.035	0.026	0.020	0.017		0.014
0	0.000															0.000
3	0.037	0.000														0.037
6	0.130	0.040	0.000													0.170
9	0.228	0.143	0.049	0.000												0.420
12	0.365	0.249	0.176	0.065	0.000											0.856
15	0.563	0.400	0.308	0.231	0.094	0.000										1.596
18	0.776	0.617	0.495	0.403	0.334	0.170	0.000									2.795
21	0.977	0.850	0.762	0.647	0.584	0.608	2.495	0.000								6.923
24	1.135	1.070	1.050	0.997	0.937	1.061	8.909	0.291	0.000							15.451
27	1.236	1.244	1.322	1.375	1.444	1.703	15.563	1.039	0.121	0.000						25.045
30	1.280	1.354	1.537	1.731	1.990	2.623	24.968	1.814	0.431	0.077	0.000					37.805
33	1.282	1.402	1.674	2.011	2.505	3.616	38.470	2.911	0.753	0.273	0.056	0.000				54.952
36	1.247	1.404	1.733	2.190	2.912	4.552	53.024	4.484	1.208	0.477	0.200	0.044	0.000			73.476
39	1.171	1.366	1.735	2.268	3.171	5.290	66.762	6.181	1.861	0.766	0.349	0.158	0.037	0.000		91.115
42	1.079	1.282	1.689	2.271	3.283	5.761	77.586	7.782	2.565	1.180	0.561	0.276	0.130	0.031		105.476
45	0.970	1.182	1.585	2.210	3.287	5.965	84.491	9.044	3.230	1.626	0.864	0.442	0.228	0.111		115.235
48	0.857	1.062	1.461	2.074	3.199	5.974	87.477	9.849	3.754	2.047	1.191	0.682	0.365	0.194		120.185
51	0.723	0.939	1.313	1.912	3.002	5.813	87.603	10.197	4.088	2.379	1.499	0.940	0.563	0.311		121.281
54	0.590	0.792	1.160	1.718	2.768	5.455	85.246	10.212	4.232	2.591	1.742	1.183	0.776	0.479		118.944
57	0.511	0.647	0.979	1.518	2.487	5.029	79.999	9.937	4.238	2.682	1.897	1.375	0.977	0.661		112.937
60	0.432	0.560	0.799	1.281	2.198	4.519	73.758	9.325	4.124	2.686	1.964	1.497	1.135	0.832		105.112
63	0.381	0.473	0.692	1.046	1.854	3.993	66.273	8.598	3.870	2.614	1.967	1.550	1.236	0.967		95.515
66	0.332	0.417	0.585	0.906	1.514	3.369	58.561	7.725	3.568	2.453	1.914	1.552	1.280	1.053		85.230
69	0.283	0.364	0.515	0.766	1.311	2.751	49.412	6.826	3.206	2.262	1.796	1.510	1.282	1.090		73.375
72	0.248	0.310	0.449	0.674	1.108	2.382	40.344	5.760	2.833	2.032	1.656	1.417	1.247	1.092		61.555
75	0.218	0.272	0.383	0.588	0.976	2.014	34.938	4.703	2.391	1.796	1.488	1.307	1.171	1.062		53.306
78	0.187	0.238	0.336	0.502	0.851	1.774	29.532	4.073	1.952	1.515	1.315	1.174	1.079	0.997		45.255
81	0.157	0.205	0.294	0.439	0.726	1.547	26.010	3.443	1.690	1.237	1.110	1.038	0.970	0.919		39.785
84	0.134	0.172	0.253	0.385	0.636	1.320	22.684	3.032	1.429	1.071	0.906	0.876	0.857	0.826		34.581
87	0.120	0.147	0.212	0.331	0.558	1.155	19.357	2.644	1.258	0.906	0.785	0.715	0.723	0.730		29.642
90	0.106	0.132	0.182	0.278	0.480	1.014	16.945	2.256	1.097	0.798	0.663	0.619	0.590	0.616		25.776
93	0.092	0.116	0.163	0.238	0.402	0.872	14.866	1.975	0.936	0.696	0.584	0.523	0.511	0.503		22.478
96	0.078	0.101	0.144	0.213	0.345	0.730	12.787	1.733	0.820	0.594	0.509	0.461	0.432	0.435		19.381
99	0.063	0.085	0.124	0.188	0.308	0.626	10.708	1.491	0.719	0.520	0.435	0.402	0.381	0.368		16.418
102	0.051	0.069	0.105	0.163	0.272	0.560	9.187	1.248	0.619	0.456	0.381	0.343	0.332	0.324		14.110
105	0.048	0.056	0.086	0.138	0.236	0.494	8.216	1.071	0.518	0.392	0.334	0.300	0.283	0.283		12.455
108	0.046	0.053	0.069	0.112	0.199	0.428	7.246	0.958	0.444	0.328	0.287	0.263	0.248	0.241		10.924
111	0.043	0.050	0.065	0.090	0.163	0.362	6.276	0.845	0.398	0.282	0.240	0.227	0.218	0.211		9.469
114	0.040	0.047	0.062	0.086	0.131	0.296	5.306	0.732	0.351	0.252	0.206	0.190	0.187	0.185		8.069
117	0.038	0.044	0.058	0.081	0.124	0.238	4.335	0.618	0.304	0.222	0.185	0.163	0.157	0.159		6.725
120	0.035	0.041	0.054	0.076	0.117	0.225	3.489	0.505	0.257	0.192	0.163	0.146	0.134	0.133		5.569
123	0.032	0.038	0.051	0.071	0.110	0.213	3.304	0.407	0.210	0.163	0.141	0.128	0.120	0.114		5.103
126	0.029	0.035	0.047	0.066	0.103	0.200	3.119	0.385	0.169	0.133	0.119	0.111	0.106	0.102		4.727
129	0.027	0.032	0.043	0.062	0.096	0.188	2.935	0.364	0.160	0.107	0.097	0.094	0.092	0.090		4.386
132	0.024	0.029	0.040	0.057	0.089	0.175	2.750	0.342	0.151	0.101	0.078	0.077	0.078	0.078		4.069
135	0.021	0.026	0.036	0.052	0.082	0.162	2.565	0.321	0.142	0.096	0.074	0.062	0.063	0.066		3.769
138	0.019	0.023	0.033	0.047	0.075	0.150	2.380	0.299	0.133	0.090	0.070	0.059	0.051	0.054		3.483
141	0.016	0.020	0.029	0.043	0.069	0.137	2.195	0.277	0.124	0.084	0.066	0.055	0.048	0.043		3.207
144	0.013	0.017	0.025	0.038	0.062	0.124	2.010	0.256	0.115	0.079	0.062	0.052	0.046	0.041		2.940
147	0.010	0.014	0.022	0.033	0.055	0.112	1.826	0.234	0.106	0.073	0.058	0.049	0.043	0.039		2.673
150	0.008	0.011	0.018	0.028	0.048	0.099	1.641	0.213	0.097	0.067	0.053	0.045	0.040	0.037		2.406
153	0.005	0.009	0.014	0.023	0.041	0.087	1.456	0.191	0.088	0.062	0.049	0.042	0.038	0.034		2.139
156	0.002	0.006	0.011	0.019	0.034	0.074	1.271	0.170	0.079	0.056	0.045	0.039	0.035	0.032		1.872
159	0.000	0.003	0.007	0.014	0.027	0.061	1.086	0.148	0.070	0.050	0.041	0.036	0.032	0.030		1.605
162		0.000	0.003	0.009	0.020	0.049	0.902	0.127	0.062	0.045	0.037	0.032	0.029	0.027		1.341
165			0.000	0.004	0.013	0.036	0.717	0.105	0.053	0.039	0.033	0.029	0.027	0.025		1.080
168				0.000	0.006	0.024	0.532	0.084	0.044	0.033	0.029	0.026	0.024	0.023		0.823
171					0.000	0.011	0.347	0.062	0.035	0.028	0.024	0.023	0.021	0.020		0.571
174						0.000	0.162	0.040	0.026	0.022	0.020	0.019	0.019	0.018		0.327
177							0.000	0.019	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016		0.116
180								0.000	0.008	0.011	0.012	0.013	0.013	0.014		0.070
183									0.000	0.005	0.008	0.009	0.010	0.011		0.044
186										0.000	0.004	0.006	0.008	0.009		0.027
189											0.000	0.003	0.005	0.007		0.015
192												0.000	0.002	0.004		0.007
195													0.000	0.002		0.002
198															0.000	0.000

A continuación se presentan, de manera gráfica, los resultados obtenidos del cálculo de los hidrogramas de escurrimiento directo para cada subcuenca; en el Anexo 2 se presentan los resultados de los hidrogramas por subcuenca para diferentes periodos de retorno.

HIDROGRAMAS DE ESCURRIMIENTO DIRECTO EL ORÉGANO

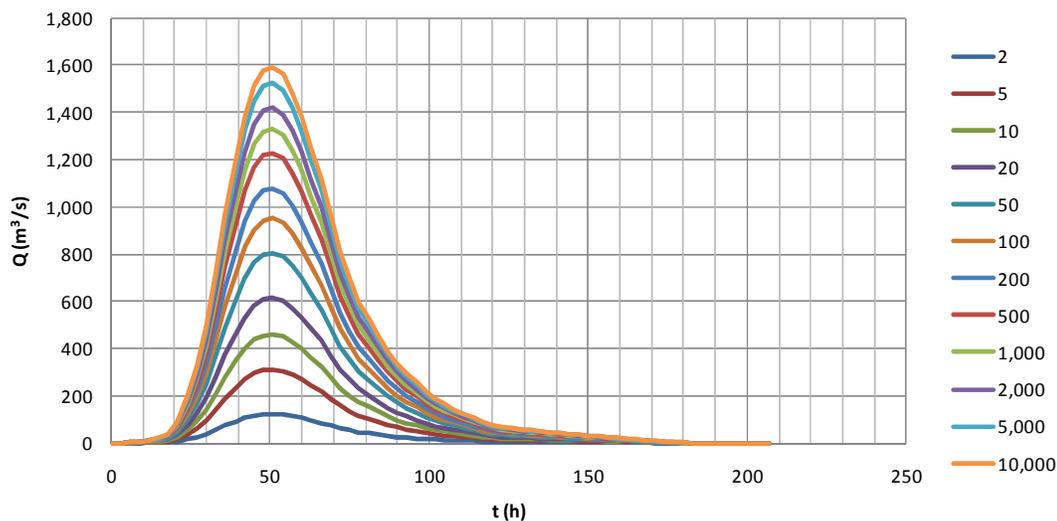


Figura 4.27 Hidrogramas de escurrimiento directo para diferentes periodos de retorno, El Orégano

HIDROGRAMAS DE ESCURRIMIENTO DIRECTO EL MOLINITO

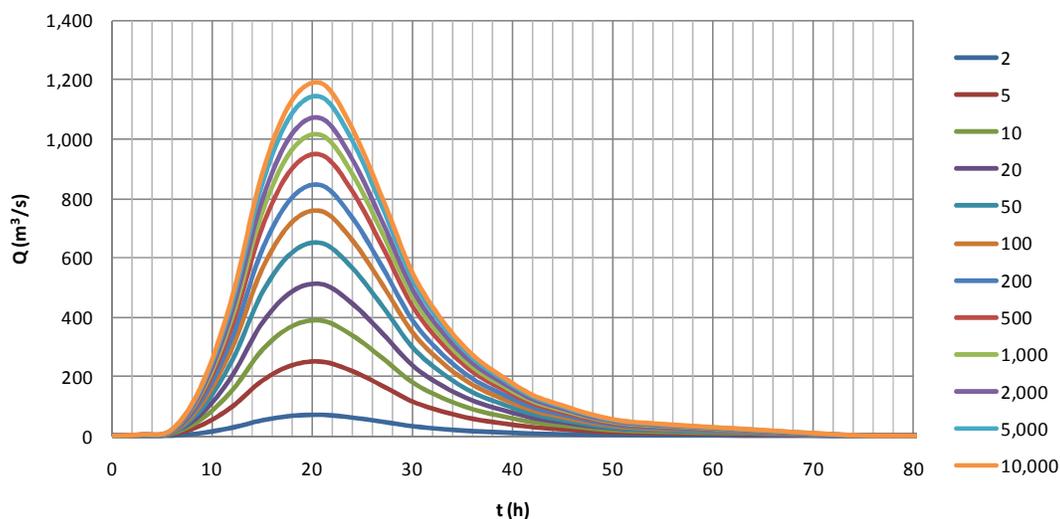


Figura 4.28 Hidrogramas de escurrimiento directo para diferentes periodos de retorno, El Molinito

HIDROGRAMAS DE ESCURRIMIENTO DIRECTO PUERTA DEL SOL

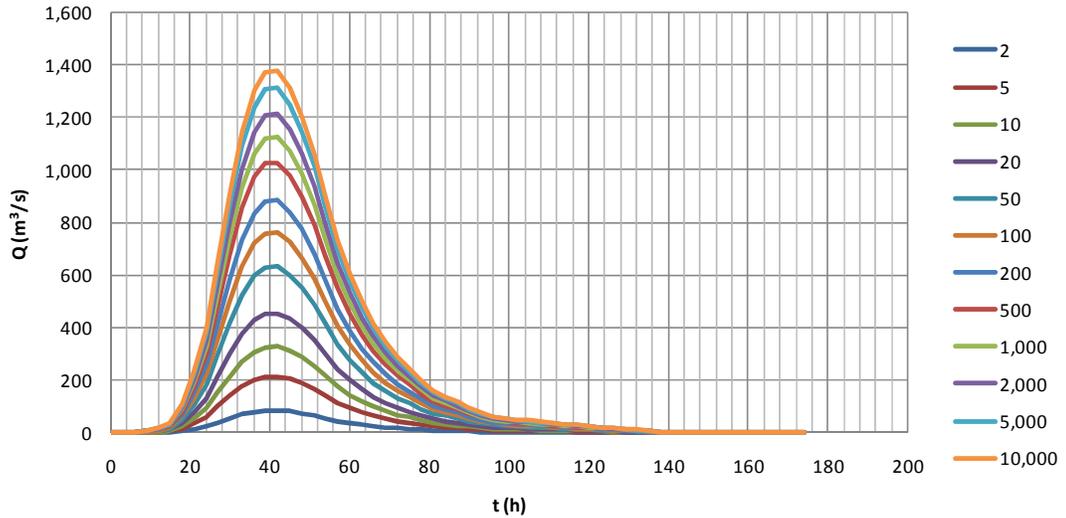


Figura 4.29 Hidrogramas de escurrimiento directo para diferentes periodos de retorno, Puerta del Sol

HIDROGRAMAS DE ESCURRIMIENTO DIRECTO EL CAJÓN

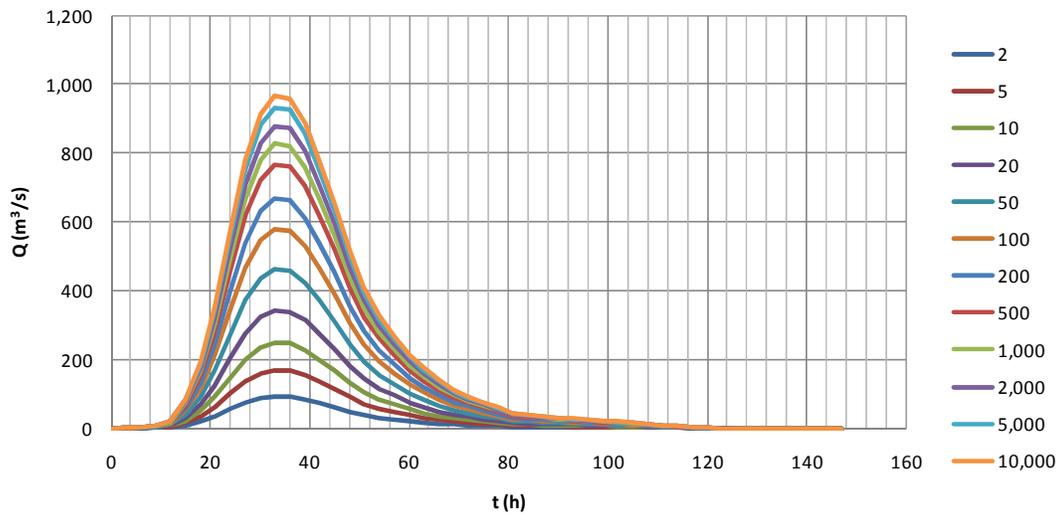


Figura 4.30 Hidrogramas de escurrimiento directo para diferentes periodos de retorno, El Cajón

HIDROGRAMAS DE ESCURRIMIENTO DIRECTO EL ZANJÓN

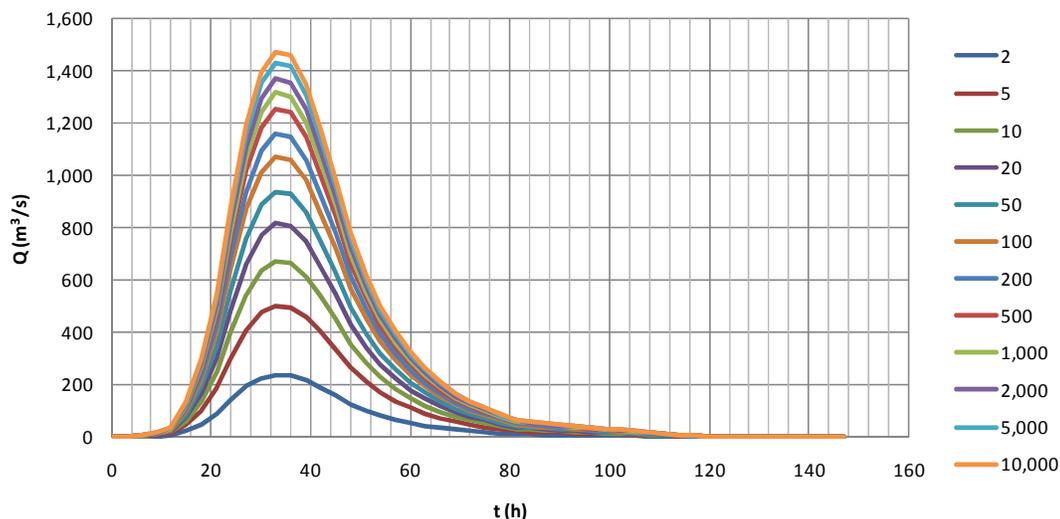


Figura 4.31 Hidrogramas de escurrimiento directo para diferentes periodos de retorno, El Zanjón

4.8 Comportamiento del sistema de obras existentes y futuras de la cuenca

En este subcapítulo se presentará el tránsito de las avenidas en las principales presas existentes y futuras que forman parte del sistema de presas ubicadas en la cuenca del río Sonora. El objetivo de estos tránsitos es determinar la configuración de obras que permita aprovechar de manera óptima los recursos hídricos.

Así mismo, se propone una metodología para generar escurrimientos en un vaso, a partir de información climatológica; es decir, que a partir de datos de lluvias, temperatura y evaporación, se generen escurrimientos para predecir el comportamiento de un vaso a través del funcionamiento del mismo en un periodo de tiempo, suficientemente largo para determinar su factibilidad de operación.

4.8.1 Configuración 1. Condiciones actuales

Se denomina como Configuración 1 a las condiciones existentes de la presa hasta 2005; se consideran, únicamente, la existencia de la presa El Molinito, la cual se encuentra en la subcuenca El Orégano; con una área de 11,680.58 km², y es la subcuenca más grande; y la presa Abelardo Rodríguez. (Ver introducción). Las características de las presas se muestran en la Tabla.4.53.

Al final del análisis de las configuraciones, se presenta un resumen, en el cual se decide la alternativa que permita un aprovechamiento del recurso hídrico.

Tabla 4.53 Configuración 1. Características de las Presas

Datos de la Presa El Molinito		
Elevación de la corona	295.4	msnm
Elevación del NAME	293.4	msnm
Elevación del NAMO	287.53	msnm
Nivel de azolves	283.8	msnm
Longitud de Cresta	18	m
Datos de la Presa Abelardo L. Rodríguez		
Elevación de la corona	231.6	msnm
Elevación del NAME	228.8	msnm
Elevación del NAMO	220.48	msnm
Nivel de azolves	214	msnm
Longitud de Cresta	14	m

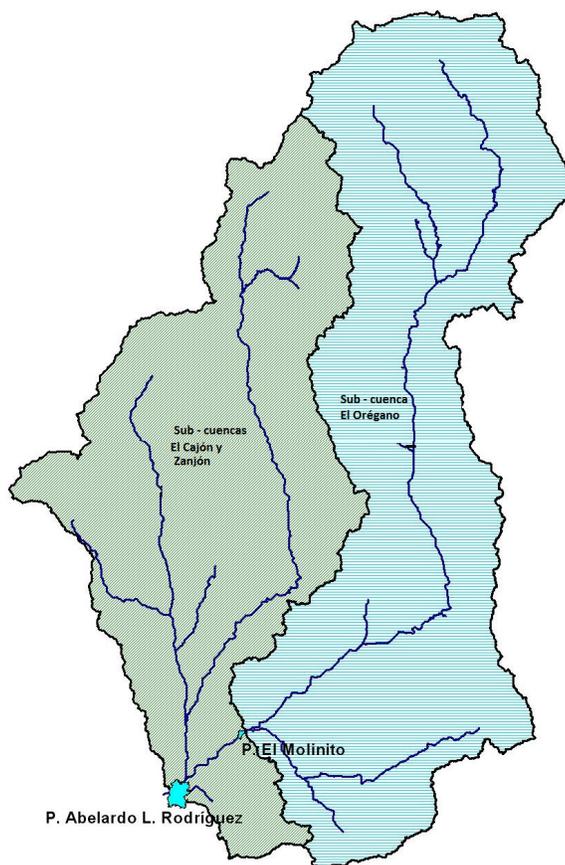


Figura 4.32 Configuración 1. Subcuencas EL Orégano, y San Miguel y Zajón

Para este caso se calcularon los hidrogramas de escurrimiento directo para la subcuenca El Orégano asociados a diferentes periodos de retorno, éstos se transitaron sobre la obra de excedencias de la presa, por lo tanto, sus descargas se suman a los hidrogramas de escurrimiento directo que llega a la presa Abelardo Rodríguez L. (subcuencas Cajón y Zanjón); con esta suma se forma un nuevo hidrograma de escurrimiento directo que será el hidrograma de entrada al vaso de la presa. Los hidrogramas de entrada a la presa El Molinito, se presentan en la Figura 4.27; y los hidrogramas de escurrimiento directo de las subcuencas El Cajón y El Zanjón se muestran en las Figuras 4.30 y 4.31. A manera de ejemplo, se presentan los resultados para un periodo de retorno de 10,000 años.

Tabla 4.54 Curva Elevaciones – Capacidades – Descargas, El Molinito

Elevaciones (msnm)	Capacidades (Hm ³)	Carga (m)	Descargas (m ³ /s)
264.00	0.00		47.00
266.00	0.11		47.00
268.00	0.54		47.00
270.00	1.37		47.00
272.00	3.52		47.00
274.00	7.55		47.00
276.00	13.39		47.00
278.00	21.30		47.00
280.00	31.87		47.00
282.00	46.05		47.00
283.53	60.56		47.00
284.00	64.95		47.00
285.53	84.00		47.00
286.00	89.87		47.00
287.53	114.70	0	47.00
288.00	122.30	0.47	58.54
289.36	150.19	1.83	140.92
290.00	163.28	2.47	198.13
291.34	201.00	3.81	351.98
291.40	202.69	3.87	359.92
292.38	230.30	4.85	502.25
292.50	233.68	4.97	521.31
293.40	259.04	5.87	675.67
294.33	285.24	6.8	856.42
295.00	304.16	7.47	1000.16
295.26	311.45	7.73	1059.02
295.40	315.39	7.87	1091.44

Tabla 4.55 Curva Elevaciones – Capacidades – Descargas, El Molinito

Elevaciones (msnm)	Capacidades (Hm ³)	Carga (m)	Descargas (m ³ /s)
205.00	0.32		15.00
206.00	0.63		15.00
207.00	0.95		15.00
208.00	1.27		15.00
209.00	1.59		15.00
210.00	1.92		15.00
211.00	2.25		15.00
212.00	2.60		15.00
213.00	2.95		15.00
214.00	3.37		15.00
215.00	6.03		15.00
216.00	13.73		15.00
217.00	22.60		15.00
218.00	33.08		15.00
219.00	45.44		15.00
220.00	60.00		15.00
220.48	67.03	0	15.00
221.00	77.52	0.52	23.40
222.00	97.33	1.52	56.98
223.00	119.22	2.52	104.61
224.00	143.13	3.52	162.93
225.00	169.30	4.52	230.26
225.80	195.00	5.32	289.86
226.00	201.86	5.52	305.51
227.00	245.78	6.52	387.92
228.00	295.58	7.52	476.93
228.80	340.00	8.32	552.57
229.00	352.62	8.52	572.07
230.00	416.90	9.52	572.07

En la Figura 4.33 se muestra en tránsito de las avenidas en el vertedor de la presa El Molinito. Así mismo en la Figura 4.34 se muestran los hidrogramas de entrada y salida en el vaso de la presa Abelardo L. Rodríguez, que se transitó en el vertedor de la presa mencionada.

TRÁNSITO EN EL VERTEDOR DE LA PRESA "EL MOLINITO", Tr = 10,000 años

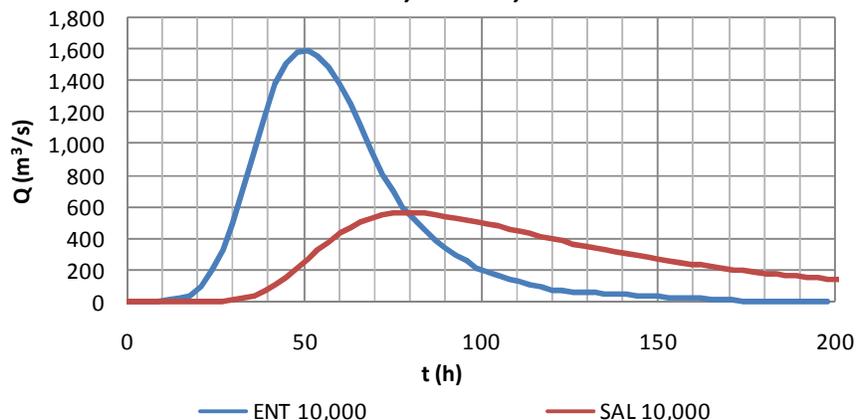


Figura 4.33 Configuración 1. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa El Molinito

TRÁNSITO EN EL VERTEDOR DE LA PRESA "ABELARDO RODRÍGUEZ", Tr = 10,000 años

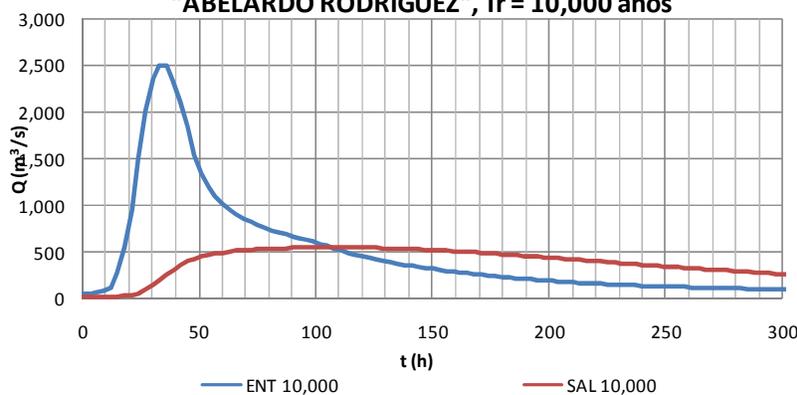


Figura 4.34 Configuración 1. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa Abelardo Rodríguez L.

En la figura 4.34, se observa que para las condiciones geométricas, se descarga un gasto de 562.6 m³/s, y la elevación máxima que alcanza dicha avenida es de 293.03 msnm, de tal forma que logra salir perfectamente el escurrimiento para la avenida de 10,000 años de periodo de retorno sin alcanzar la elevación 293.4 msnm, que corresponde a la elevación del nivel de aguas máximo extraordinario. En el Anexo 2 se presentan los cálculos para ambas presas que forman la Configuración 1.

4.8.2 Configuración 2. Construcción de la presa Puerta del Sol

En esta configuración se considera una nueva presa en la subcuenca el Orégano, aguas arriba de la presa El Molinito. Para esta opción, la cuenca de aportación a la presa Puerta del Sol tiene una área de 7,671.45 km², mientras que la cuenca de aportación para El Molinito es de 4,008.19 km². El análisis para esta configuración consiste en transitar las avenidas en la presa Puerta del Sol, y sus descargas se suman al escurrimiento propio de la subcuenca El Molinito. Las descargas de la presa el Molinito, se le adicionan el escurrimiento de las subcuencas El Cajón y El Zanjón, lo cual dará origen a la avenida que se transita en la presa Abelardo L. Rodríguez.

Tabla 4.56 Configuración 2. Características de las Presas

Datos de la Presa Puerta del Sol		
Elevación de la corona	478.22	msnm
Elevación del NAME	476.62	msnm
Elevación del NAMO	458.677	msnm
Nivel de azolves	445.25	msnm
Longitud de Cresta	15	m
Datos de la Presa El Molinito		
Elevación de la corona	295.4	msnm
Elevación del NAME	293.4	msnm
Elevación del NAMO	287.53	msnm
Nivel de azolves	283.8	msnm
Longitud de Cresta	18	m
Datos de la Presa Abelardo L. Rodríguez		
Elevación de la corona	231.6	msnm
Elevación del NAME	228.8	msnm
Elevación del NAMO	220.48	msnm
Nivel de azolves	214	msnm
Longitud de Cresta	14	m

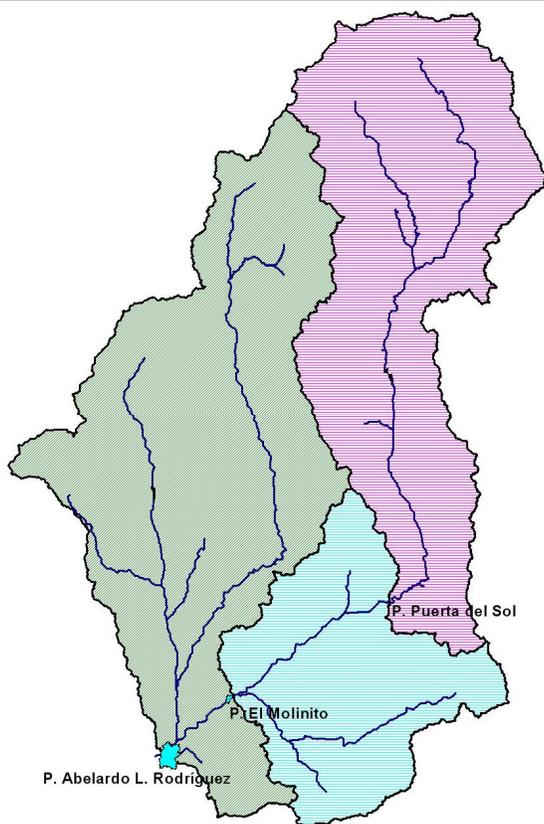


Figura 4.35 Configuración 2. Subcuencas Puerta del Sol, El Molinito, y San Miguel y Zajón

Tabla 4.57 Curva Elevaciones – Capacidades – Descargas, Puerta del Sol

Elevaciones (msnm)	Capacidades (Hm ³)	Carga (m)	Descarga (m ³ /s)
425.00	0.00		0.00
440.00	7.61		0.00
445.00	15.59		0.00
450.00	24.66		0.00
455.00	41.58		0.00
458.68	55.00	0	0.00
460.00	55.53	1.323	41.09
465.00	59.83	6.323	429.29
470.00	105.07	11.323	1,028.74
472.50	123.35	13.823	1,387.61
473.00	127.00	14.323	1,463.57
473.50	130.66	14.823	1,540.88
474.00	134.31	15.323	1,619.49
474.50	137.97	15.823	1,699.41
475.00	141.63	16.323	1,780.59
475.50	145.28	16.823	1,863.03
476.50	152.59	17.823	2,031.58
476.62	155.42	17.943	2,052.14
477.50	159.90	18.823	2,204.94
478.22	169.47	19.543	2,332.66
478.50	167.21	19.823	2,382.97
480.00	178.18	21.323	2,658.50
490.00	284.02	31.323	4,733.24
500.00	431.80	41.323	7,172.19

En las Figuras 4.36 a 4.38 se presenta el tránsito de las avenidas en las presas Puerta del Sol, El Molinito y Abelardo L. Rodríguez, respectivamente, asociadas a un periodo de retorno de 10,000 años.

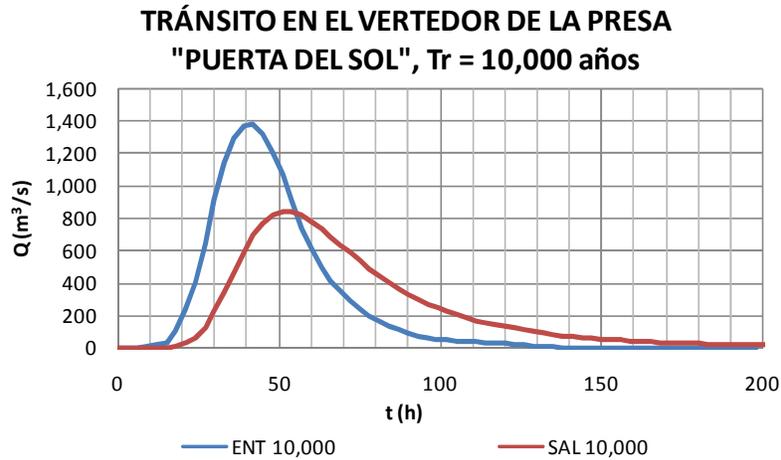


Figura 4.36 Configuración 2. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa Puerta del Sol

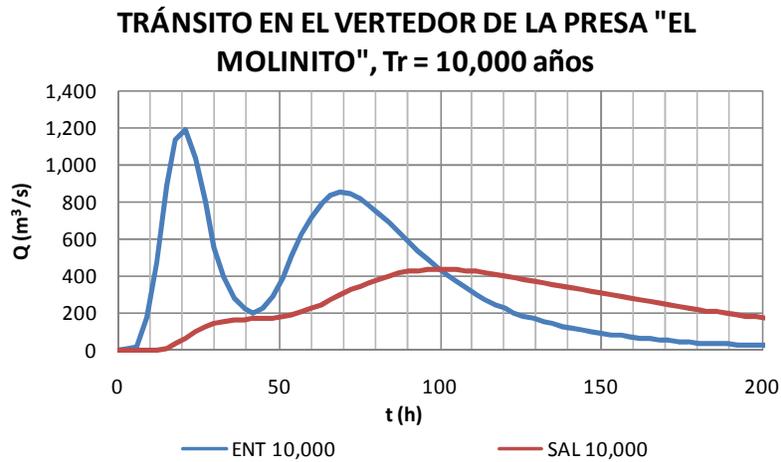


Figura 4.37 Configuración 2. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa El Molinito

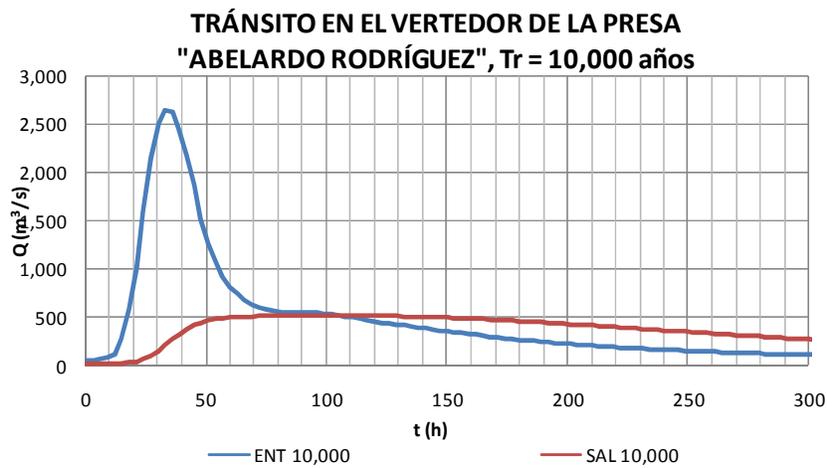


Figura 4.38 Configuración 2. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa Abelardo L. Rodríguez.

En la Figura 4.37 se observa en el tránsito de la avenida en la presa El Molinito, no se presentan mejoras significativas; si no por el contrario, el hidrograma de entrada presenta un doble pico que también se refleja en el hidrograma de entrada a la presa Abelardo L. Rodríguez. La elevación máxima de la superficie libre del agua en esta última llega a 228.42 msnm. Los resultados de los tránsitos en las tres presas que conforman esta configuración, se presentan en el Anexo 2.

4.8.3 Configuración 3. Construcción de la presa Las Chivas

Se define como la configuración 3, a la existencia de la presa Las Chivas, la cual se localiza en la cuenca del río El Cajón, el área de su cuenca es de 3,805.53 km², se mantiene la configuración de la presa El Molinito, es decir que su cuenca de aportación es, totalmente, la de la cuenca El Orégano. Por lo tanto, las salidas de los tránsitos de las avenidas en los vertedores de las presas El Molinito y Las Chivas se suman al hidrograma de escurrimiento por cuenca propia del río Zanjón para dar forma al hidrograma de entrada a la presa Abelardo L. Rodríguez.

Tabla 4.58 Configuración 3. Características de las Presas

Datos de la Presa El Molinito		
Elevación de la corona	295.4	msnm
Elevación del NAME	293.4	msnm
Elevación del NAMO	287.53	msnm
Nivel de azolves	283.8	msnm
Longitud de Cresta	18	m
Datos de la Presa Las Chivas		
Elevación de la corona		msnm
Elevación del NAME	483.75	msnm
Elevación del NAMO	478.266	msnm
Nivel de azolves		msnm
Longitud de Cresta	15	m
Datos de la Presa Abelardo L. Rodríguez		
Elevación de la corona	231.6	msnm
Elevación del NAME	228.8	msnm
Elevación del NAMO	220.48	msnm
Nivel de azolves	214	msnm
Longitud de Cresta	14	m

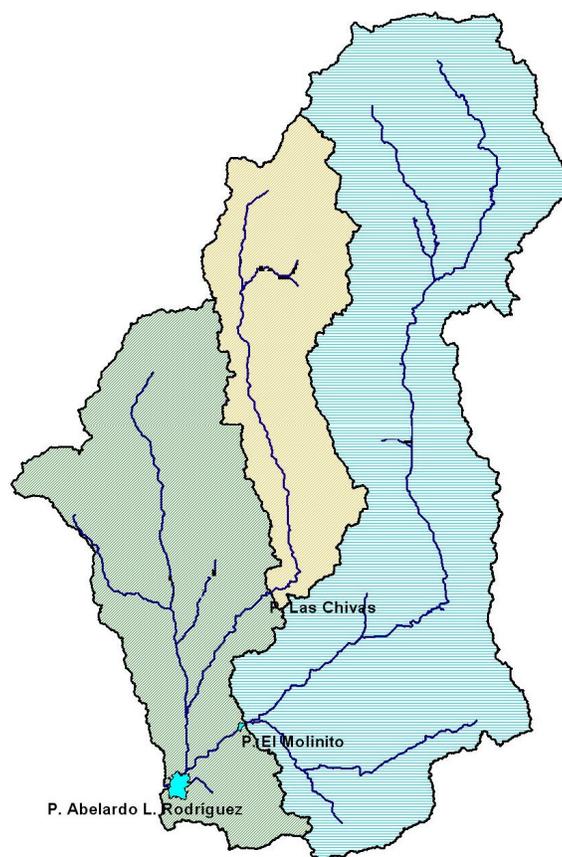


Figura 4.39 Configuración 2. Subcuencas El Orégano, El Cajón y Zajón

Tabla 4.59 Curva Elevaciones – Capacidades – Descargas, Las Chivas

Elevaciones (msnm)	Capacidades (Hm ³)	Carga (m)	Descarga (m ³ /s)
430.00	0.00		0.00
440.00	2.14		0.00
452.05	25.00		0.00
460.00	40.08		0.00
461.54	50.00		0.00
463.86	65.00		0.00
465.41	75.00		0.00
467.00	85.25		0.00
467.50	88.48		0.00
467.75	90.09		0.00
468.00	91.71		0.00
469.00	98.16		0.00
469.28	100.00		0.00
469.50	101.39		0.00

Elevaciones (msnm)	Capacidades (Hm ³)	Carga (m)	Descarga (m ³ /s)
470.00	104.62		0.00
471.00	111.08		0.00
472.00	117.53		0.00
473.16	125.00		0.00
475.48	140.00		0.00
477.03	150.00		0.00
478.27	158.00	0	0.00
480.00	169.20	1.734	68.50
480.30	173.38	2.034	87.03
480.42	175.00	2.150	94.57
481.00	183.15	2.734	135.62
482.00	197.09	3.734	216.46
482.21	200.00	3.943	234.85
483.00	211.04	4.734	309.00
483.75	221.50	5.484	385.27
484.00	224.98	5.734	411.92
485.00	238.93	6.734	524.24
485.75	249.39	7.484	614.22
486.00	252.87	7.734	645.25
500.00	448.11	21.734	3,039.70

El tránsito de las avenidas en la presa El Molinito, es el mismo que se presenta para la Configuración 1, mientras que ahora la presa Abelardo L. Rodríguez tiene una aportación controlada por parte de las 2 presas que se ubican aguas arriba de la presa Abelardo L. Rodríguez. En las figuras 4.40 a 4.42 se presentan los resultados de los tránsitos en las presas que conformación la configuración 3

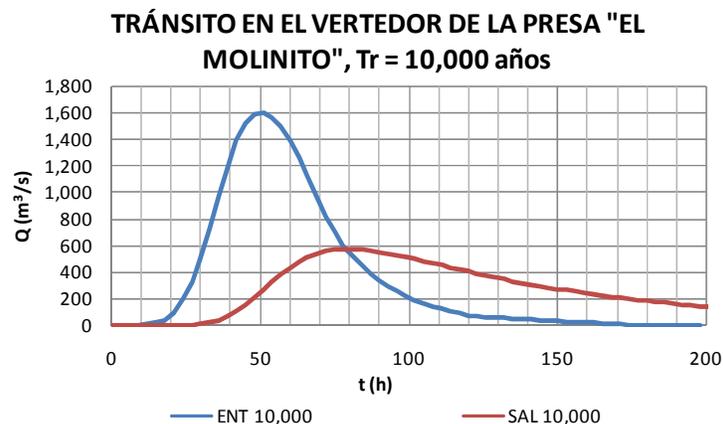


Figura 4.40 Configuración 3. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa El Molinito

TRÁNSITO EN EL VERTEDOR DE LA PRESA "LAS CHIVAS", Tr = 10,000 años

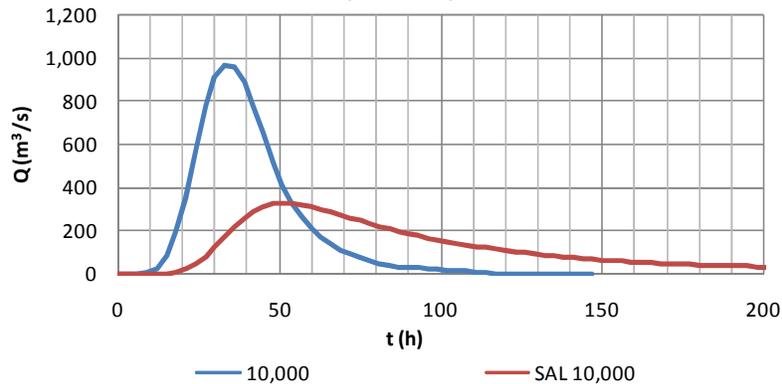


Figura 4.41 Configuración 3. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa Las Chivas

TRÁNSITO EN EL VERTEDOR DE LA PRESA "ABELARDO RODRÍGUEZ", Tr = 10,000 años

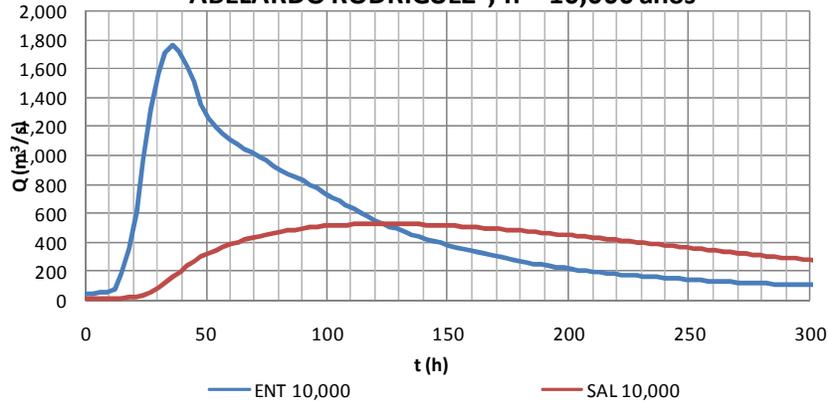


Figura 4.42 Configuración 3. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa Abelardo Rodríguez L.

Para esta configuración, se observa una variación en la forma del hidrograma de entrada en la presa Abelardo L. Rodríguez; sin embargo, éste resulta menor que el hidrograma que se obtuvo para la Configuración 2. La elevación máxima que alcanza es muy parecida a 229.58 msnm, para la avenida de 10,000 años. Los resultados completos se presentan en el Anexo 2.

4.8.4 Configuración 4. Construcción de las presas Puerta del Sol y Las Chivas

Esta configuración consiste en la construcción de las presas Puerta del Sol y Las Chivas, de tal forma que en el sistema se consideran las cuatro presas mencionadas en las configuraciones anteriores.

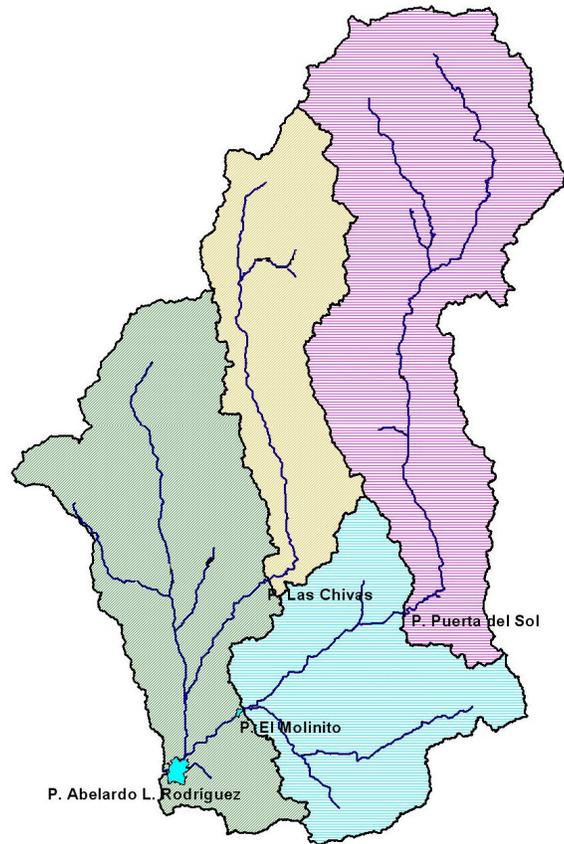


Figura 4.43 Configuración 4. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa Puerta del Sol

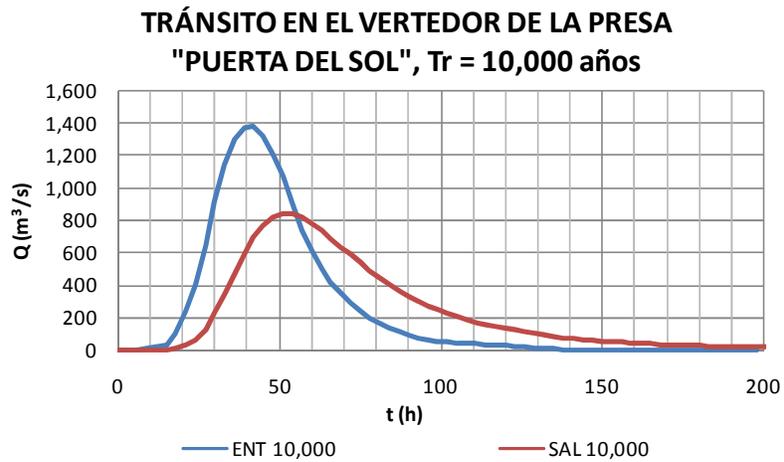


Figura 4.44 Configuración 4. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa Puerta del Sol

TRÁNSITO EN EL VERTEDEDOR DE LA PRESA "EL MOLINITO", $Tr = 10,000$ años

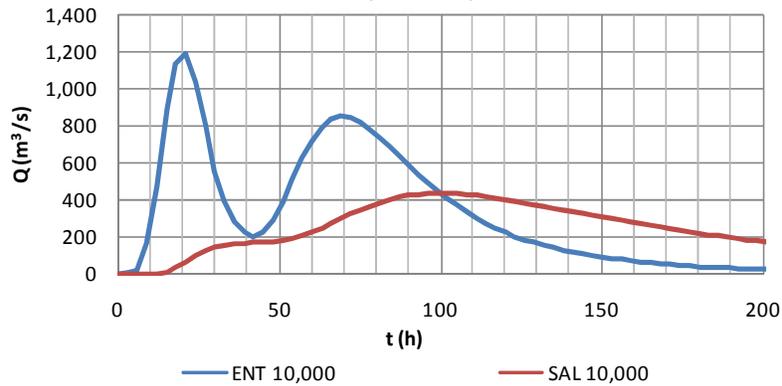


Figura 4.45 Configuración 4. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa El Molinito

TRÁNSITO EN EL VERTEDEDOR DE LA PRESA "LAS CHIVAS", $Tr = 10,000$ años

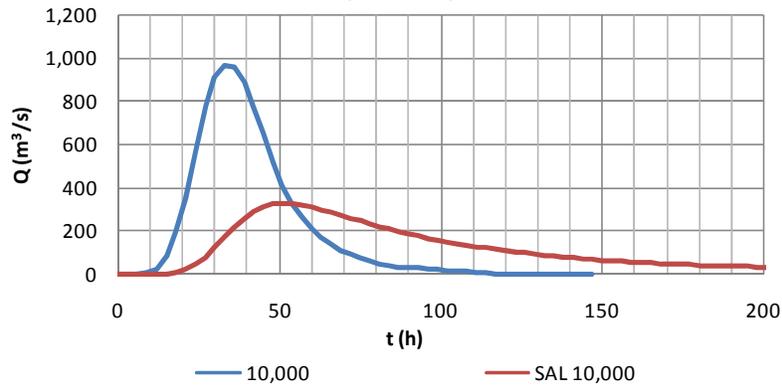


Figura 4.46 Configuración 4. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa El Molinito

TRÁNSITO EN EL VERTEDEDOR DE LA PRESA "ABELARDO RODRÍGUEZ", $Tr = 10,000$ años

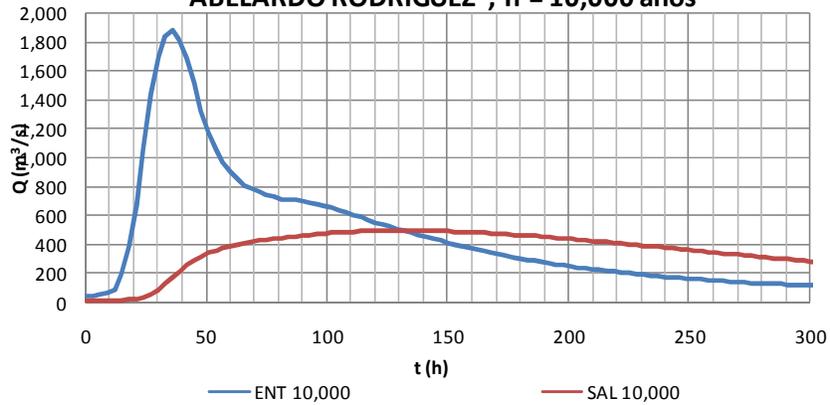


Figura 4.47 Configuración 4. Tránsito de avenidas sobre el vertedor de la presa El Molinito

Se observa disminución en el hidrograma de descarga; sin embargo, esta no es una disminución considerable.

4.8.5 Selección de la configuración óptima

El criterio a seguir para la selección de la configuración óptima es seleccionar aquella que, además de optimizar los recursos hídricos, muestre factibilidad o el menor riesgo.

A continuación se presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis de las configuraciones, y a partir de los cuales se justifica la selección de la configuración óptima.

Tabla 4.60 Comparación de las Configuraciones para un periodo de retorno de 10,000 años

Tr = 10,000 años							
CONFIGURACIÓN	DESCRIPCIÓN	NAMO (msnm)	NAME (msnm)	ELEVACIÓN (msnm)	Q _{máx} Entrada (m ³ /s)	V _{máx} Entrada (m ³)	Q _{máx} Salida (m ³ /s)
1	PRESA MOLINITO	287.53	293.40	293.03	1,591.43		562.59
	PRESA ABELARDO L. RODRÍGUEZ	220.48	228.80	228.76	2,504.95	326.72	548.91
2	PRESA PUERTA DEL SOL	458.68	476.62	468.57	1,376.12		839.69
	PRESA MOLINITO	287.53	293.40	292.24	1,189.18		432.75
	PRESA ABELARDO L. RODRÍGUEZ	220.48	228.80	228.42	2,639.09	306.34	515.92
3	PRESA MOLINITO	287.53	293.40	293.03	1,591.43		562.59
	PRESA LAS CHIVAS	478.27	483.75	483.19	965.45		327.50
	PRESA ABELARDO L. RODRÍGUEZ	220.48	228.80	228.58	1,761.70	315.60	531.40
4	PRESA PUERTA DEL SOL	458.68	476.62	468.57	1,376.12		839.69
	PRESA MOLINITO	287.53	293.40	292.24	1,189.18		432.75
	PRESA LAS CHIVAS	478.27	483.75	483.19	965.45		327.50
	PRESA ABELARDO L. RODRÍGUEZ	220.48	228.80	228.25	1,884.27	297.39	500.17

La presa Abelardo L. Rodríguez se localiza muy cerca de la ciudad de Hermosillo, en Sonora; por lo tanto; de acuerdo con los resultados, se puede observar que, si el criterio fuera la menor descarga, la Configuración 4 presenta una menor descarga en comparación con las demás configuraciones. Para el caso en el que la factibilidad sea el principal criterio para seleccionar la configuración óptima; se considera que la Configuración 3 presenta mejores beneficios, ya que permitirá el aprovechamiento del recurso en el río El Cajón, mientras que si sólo se construye la presa Puerta del Sol, sólo se reducirán las entradas a la presa el Molinito, y los ríos Cajón y Zanjón quedarían sin ser regulados.

4.8.6 Funcionamiento de vaso

En este subcapítulo se propone una metodología para estimar los escurrimientos de entrada a un vaso, con el fin de analizar la operación de una presa a largo plazo, a través del funcionamiento de vaso. Sin embargo, este análisis requiere de considerar las demandas naturales y artificiales que tiene la obra; y debido a la falta de información, este problema se vuelve complicado.

Dado que se ha partido del hecho de que resulta menos complicado obtener información de las estaciones climatológicas, la metodología que se propone consiste en utilizar sólo información mensual de precipitación y de temperatura de ellas con influencia en el vaso, de tal forma que con el peso de cada una de las estaciones, se obtenga un registro de esos parámetros a escala mensual. A partir de estos registros, se propone calcular la precipitación potencial; es decir, calcular la precipitación real que forman los escurrimientos que llegan directamente al vaso; esta precipitación se obtiene a partir de la temperatura, con la cual es posible calcular la

evapotranspiración potencial, y con ella y el registro de precipitación, se puede determinar la precipitación potencial o agua disponible.

4.8.6.1 Cálculo de la Evapotranspiración

A continuación se presentan los resultados de aplicar los tres métodos descritos en este subcapítulo:

Método de Thornthwaite

Tabla 4.61 Temperaturas medias mensuales para el vaso El Molinito

		Temperaturas medias mensuales																							
ARITMÉTICO	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
El Molinito	ENERO	8.6	10.9	9.2	9.6	8.5	7.9	10.3	6.8	7.6	6.4	7.3	7.5	8.3	10.9	10.0	8.9	8.3	9.2	6.5	6.1	6.9	7.2	9.2	9.2
	FEBRERO	11.6	10.9	11.0	9.7	8.4	8.6	10.8	9.6	11.0	10.0	7.5	10.4	10.1	9.9	8.7	12.1	11.8	8.1	7.4	8.8	9.8	9.4	11.7	9.9
	MARZO	11.5	12.2	14.4	12.1	11.6	11.7	15.4	11.2	11.9	12.1	11.8	10.7	11.5	11.4	13.0	11.8	11.3	13.2	10.0	10.9	11.6	11.5	12.6	9.7
	ABRIL	15.3	17.0	20.2	14.4	16.6	18.6	19.7	18.1	17.8	17.3	16.3	13.2	16.0	14.4	16.8	12.8	13.9	14.5	10.8	15.4	16.9	16.4	18.5	14.0
	MAYO	19.3	21.5	22.6	21.5	22.3	23.2	21.1	21.7	21.9	21.2	21.2	17.7	22.5	20.3	21.2	18.2	17.9	18.9	16.2	21.3	23.6	22.5	20.5	19.9
	JUNIO	27.8	27.3	26.5	25.2	27.3	27.7	26.4	27.5	26.0	26.6	27.3	21.9	25.0	22.9	28.1	24.7	25.2	22.5	21.4	25.8	27.0	25.8	24.7	22.8
	JULIO	27.9	26.7	27.6	26.9	26.2	27.6	26.0	28.3	26.5	27.5	25.6	25.6	26.1	25.7	26.7	27.5	25.7	24.8	26.1	26.4	26.8	26.5	26.3	26.0
	AGOSTO	26.0	26.5	24.8	25.1	25.5	25.8	25.7	26.2	27.0	25.7	24.0	25.0	25.0	25.4	27.0	26.3	25.3	25.3	25.0	26.2	25.2	25.7	25.4	25.1
	SEPTIEMBRE	24.5	23.8	25.0	24.8	24.4	23.2	24.3	24.5	23.9	24.4	24.0	23.2	23.6	20.9	23.9	25.1	21.6	24.0	23.2	25.1	24.7	25.1	23.8	23.5
	OCTUBRE	19.2	19.0	17.7	18.4	18.2	18.5	17.8	22.5	19.4	19.4	18.8	18.9	18.6	16.3	15.6	18.2	16.5	16.8	17.6	19.5	18.4	18.8	15.7	19.3
	NOVIEMBRE	12.2	12.3	13.2	12.2	11.4	12.6	13.1	12.9	10.9	13.5	13.8	12.5	11.8	10.7	15.2	14.8	11.4	13.9	11.6	13.0	9.7	13.4	11.5	11.4
	DICIEMBRE	11.0	10.1	8.9	10.2	9.9	8.6	8.7	7.4	7.3	8.6	9.7	9.4	9.3	11.8	9.2	9.9	9.3	7.3	6.6	6.7	9.3	7.4	6.8	6.4

Tabla 4.62 Índice de calor mensual i , anual I y parámetro a

		Índice de calor mensual, i																							
ARITMÉTICO	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
El Molinito	ENERO	2.3	3.3	2.6	2.7	2.3	2.0	3.0	1.6	1.9	1.5	1.8	1.8	2.2	3.3	2.9	2.4	2.2	2.5	1.5	1.3	1.6	1.8	2.5	2.5
	FEBRERO	3.6	3.3	3.4	2.8	2.2	2.3	3.3	2.7	3.4	2.9	1.9	3.1	2.9	2.9	2.3	3.9	3.8	2.1	1.8	2.4	2.8	2.6	3.7	2.9
	MARZO	3.6	3.9	5.1	3.9	3.6	3.7	5.7	3.5	3.8	3.9	3.7	3.2	3.6	3.6	4.4	3.8	3.5	4.5	2.9	3.3	3.6	3.6	4.2	2.8
	ABRIL	5.6	6.6	8.6	5.1	6.4	7.6	8.3	7.3	7.1	6.8	6.2	4.5	6.0	5.1	6.5	4.2	4.8	5.1	3.3	5.6	6.5	6.3	7.5	4.9
	MAYO	8.0	9.5	10.2	9.5	10.0	10.7	9.2	9.6	9.7	9.3	9.3	7.0	10.1	8.7	9.3	7.3	7.2	7.8	6.1	9.3	11.0	10.2	8.8	8.4
	JUNIO	14.1	13.7	13.0	12.1	13.7	14.0	13.0	13.8	12.7	13.1	13.6	9.7	11.9	10.4	14.3	11.7	12.1	10.1	9.4	12.5	13.4	12.5	11.7	10.4
	JULIO	14.1	13.2	13.9	13.3	12.8	13.9	12.7	14.4	13.1	13.8	12.4	12.4	12.7	12.5	13.2	13.8	12.5	11.8	12.8	13.0	13.3	13.1	12.9	12.7
	AGOSTO	12.7	13.1	11.8	12.0	12.3	12.5	12.5	12.8	13.4	12.4	11.2	12.0	11.9	12.3	13.5	12.9	12.2	12.2	11.9	12.9	12.1	12.4	12.3	12.0
	SEPTIEMBRE	11.6	11.1	12.0	11.8	11.5	10.7	11.4	11.5	11.1	11.5	11.2	10.6	10.9	9.0	11.1	12.0	9.5	11.2	10.6	12.0	11.7	12.0	11.1	10.8
	OCTUBRE	8.0	7.8	7.0	7.5	7.3	7.5	7.1	10.1	8.1	8.1	7.7	7.7	7.6	6.2	5.8	7.3	6.3	6.5	6.9	8.1	7.5	7.7	5.9	8.0
	NOVIEMBRE	3.9	4.0	4.5	4.0	3.5	4.2	4.4	4.3	3.3	4.6	4.8	4.1	3.8	3.2	5.6	5.3	3.6	4.8	3.7	4.4	2.8	4.5	3.6	3.6
	DICIEMBRE	3.4	2.9	2.4	3.0	2.8	2.3	2.3	1.8	1.8	2.3	2.8	2.7	2.6	3.7	2.6	2.9	2.6	1.8	1.5	1.6	2.6	1.8	1.6	1.5
Índice de Calor Anual (I)	90.9	92.5	94.5	87.6	88.6	91.4	92.8	93.7	89.5	90.4	86.6	78.9	86.4	80.8	91.4	87.6	80.1	80.4	72.5	86.5	89.0	88.5	85.7	80.4	
a =	2.0	2.0	2.1	1.9	1.9	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	1.8	1.9	1.8	2.0	1.9	1.8	1.8	1.6	1.9	2.0	1.9	1.9	1.8	

Tabla 4.63 Evapotranspiración mensual sin corrección, número de días d , y número de horas máximo de sol

		Evapotranspiración Mensual sin corrección, $ETP_{s/corrección}$																									
ARITMÉTICO	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	d	N	
El Molinito	ENERO	14.2	22.5	15.3	19.2	14.7	11.9	19.7	8.2	11.6	8.1	11.7	14.5	14.9	27.4	19.4	16.6	17.1	20.3	13.5	8.2	9.7	10.7	18.1	20.2	31	11
	FEBRERO	25.8	22.2	21.9	19.3	14.6	14.0	21.7	16.8	23.8	19.7	12.1	25.9	21.4	23.2	14.4	29.9	31.9	16.2	16.6	16.6	19.1	17.8	28.7	23.3	28	11.5
	MARZO	25.3	27.9	38.0	29.9	26.9	26.2	44.8	23.3	28.1	28.6	28.6	27.2	27.7	29.6	32.6	28.6	29.5	38.9	27.2	24.9	26.7	26.5	33.3	22.2	31	12
	ABRIL	45.0	54.7	76.9	41.7	54.6	66.6	73.9	61.9	61.7	58.1	53.4	39.6	51.6	45.2	54.0	33.0	42.6	45.7	30.7	47.8	55.8	53.2	68.0	43.2	30	12.6
	MAYO	71.5	88.1	96.6	90.2	96.6	103.4	84.4	89.9	92.8	87.0	88.4	66.2	98.5	83.4	86.3	65.3	67.2	73.5	60.0	88.7	107.8	98.0	82.8	80.8	31	13.1
	JUNIO	148.2	143.3	134.5	121.9	142.4	147.6	133.6	145.5	130.2	135.4	142.0	96.3	120.1	103.4	151.1	117.2	122.7	100.3	94.6	127.5	139.3	128.0	118.1	102.9	30	13.3
	JULIO	148.9	136.7	147.0	138.3	131.4	146.6	129.3	153.9	135.0	145.1	126.5	126.9	130.6	127.3	136.8	144.6	127.4	119.9	131.5	134.1	137.9	134.8	132.5	130.2	31	13.2
	AGOSTO	129.9	134.6	118.0	121.3	124.8	127.8	127.0	131.8	139.6	126.6	111.1	121.7	120.5	125.1	140.1	132.9	123.8	124.0	122.3	132.2	122.5	126.6	124.5	122.5	31	12.8
	SEPTIEMBRE	115.5	108.9	119.8	118.1	114.6	103.5	113.1	114.3	109.9	114.5	111.4	106.3	108.1	87.6	109.7	121.0	93.4	112.4	108.1	121.0	117.0	121.1	110.0	108.3	30	12.3
	OCTUBRE	71.1	68.8	58.3	66.9	65.0	65.3	59.8	96.3	73.1	72.6	70.3	74.1	68.9	56.1	46.5	65.1	58.0	59.7	68.6	74.8	66.4	69.1	50.4	76.2	31	11.7
	NOVIEMBRE	28.7	28.5	32.0	30.3	26.0	30.6	32.4	30.7	23.7	35.6	39.0	36.0	29.1	26.4	44.4	43.9	30.0	42.2	34.6	34.8	19.0	35.6	27.9	29.8	30	11.2
	DICIEMBRE	23.5	19.1	14.3	21.6	19.7	14.2	13.9	10.0	10.7	14.7	19.9	21.9	18.5	31.3	16.2	20.1	20.8	13.4	13.6	9.9	17.5	11.2	10.4	10.5	31	10.9

Tabla 4.64 Evapotranspiración Potencial corregida

Evapotranspiración Potencial corregida, <i>ETP</i> corregida																									
ARITMÉTICO	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
El Molinito	ENERO	13.4	21.3	14.5	18.2	13.9	11.2	18.6	7.8	11.0	7.7	11.1	13.7	14.1	25.9	18.3	15.7	16.2	19.2	12.8	7.7	9.2	10.1	17.2	19.1
	FEBRERO	23.1	19.9	19.6	17.2	13.0	12.6	19.4	15.0	21.3	17.6	10.8	23.2	19.1	20.8	12.9	26.8	28.5	14.5	14.8	14.8	17.1	16.0	25.7	20.9
	MARZO	26.2	28.8	39.2	30.9	27.8	27.1	46.2	24.0	29.0	29.6	29.6	28.1	28.7	30.5	33.7	29.5	30.5	40.2	28.1	25.8	27.6	27.4	34.4	23.0
	ABRIL	47.2	57.4	80.8	43.7	57.3	69.9	77.6	65.0	64.8	61.1	56.1	41.6	54.2	47.4	56.7	34.6	44.8	48.0	32.3	50.2	58.6	55.9	71.4	45.4
	MAYO	80.6	99.4	109.0	101.8	109.0	116.7	95.3	101.4	104.7	98.1	99.7	74.6	111.1	94.0	97.3	73.6	75.8	82.9	67.7	100.0	121.6	110.5	93.4	91.1
	JUNIO	164.2	158.8	149.0	135.1	157.8	163.6	148.0	161.3	144.3	150.1	157.4	106.7	133.2	114.6	167.4	129.9	136.0	111.1	104.9	141.3	154.3	141.9	130.9	114.1
	JULIO	169.3	155.4	167.1	157.2	149.4	166.7	147.0	174.9	153.5	164.9	143.7	144.3	148.4	144.7	155.5	164.4	144.8	136.2	149.5	152.4	156.8	153.2	150.6	148.0
	AGOSTO	143.2	148.3	130.0	133.7	137.6	140.8	140.0	145.3	153.8	139.5	122.5	134.2	132.8	137.9	154.5	146.5	136.4	136.7	134.8	145.7	135.0	139.5	137.2	135.0
	SEPTIEMBRE	118.4	111.6	122.8	121.1	117.5	106.1	116.0	117.2	112.7	117.4	114.2	109.0	110.8	89.8	112.4	124.0	95.7	115.3	110.8	124.0	119.9	124.1	112.8	111.0
	OCTUBRE	71.6	69.3	58.7	67.4	65.5	65.8	60.3	97.0	73.6	73.1	70.8	74.6	69.4	56.5	46.8	65.6	58.5	60.2	69.1	75.3	66.9	69.6	50.8	76.7
	NOVIEMBRE	26.8	26.6	29.9	28.3	24.3	28.6	30.2	28.6	22.1	33.2	36.4	33.6	27.2	24.6	41.4	41.0	28.0	39.4	32.3	32.5	17.8	33.2	26.0	27.8
	DICIEMBRE	22.1	17.9	13.4	20.2	18.5	13.3	13.0	9.3	10.0	13.8	18.6	20.6	17.3	29.4	15.2	18.9	19.5	12.6	12.8	9.3	16.5	10.5	9.7	9.9

Tabla 4.65 Precipitación media mensual en el vaso El Molinito

Precipitaciones Media Mensual																									
ARITMÉTICO	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
El Molinito	ENERO	7.7	62.4	14.7	29.7	41.4	28.9	11.9	1.7	15.1	24.4	14.4	9.0	40.1	96.5	3.1	53.3	0.0	4.4	0.0	0.0	0.1	17.6	3.6	0.0
	FEBRERO	29.7	9.7	0.0	33.0	2.2	19.6	30.1	24.0	0.6	15.9	19.0	86.4	38.2	29.3	9.4	52.9	15.5	8.9	39.7	0.1	0.4	5.8	33.2	36.0
	MARZO	2.4	37.7	0.0	46.5	0.0	0.9	3.6	0.3	11.4	5.1	4.0	5.3	51.6	2.6	2.3	4.8	0.1	3.8	5.5	0.7	22.9	1.6	1.1	5.8
	ABRIL	0.0	21.3	0.2	16.6	4.4	10.9	7.6	2.9	21.2	0.1	0.1	0.0	4.1	10.9	0.5	0.1	0.3	13.4	0.1	0.8	0.0	4.3	0.0	1.0
	MAYO	0.0	2.6	0.0	0.1	11.6	0.0	30.0	4.4	2.4	3.1	0.1	0.0	3.7	1.5	0.0	10.8	0.0	4.8	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1.8
	JUNIO	7.0	32.8	0.0	0.0	25.5	5.1	24.2	5.4	0.4	4.6	31.3	0.6	5.8	25.4	8.0	0.1	5.4	0.8	19.5	11.4	60.5	37.2	0.7	5.0
	JULIO	125.5	129.2	90.7	169.1	160.1	102.4	166.3	102.6	138.1	158.2	220.7	58.7	117.0	76.3	74.2	63.5	139.1	67.6	128.2	166.4	147.5	131.0	84.8	125.0
	AGOSTO	118.9	38.2	60.6	137.0	158.2	104.2	107.3	107.3	86.2	129.5	214.4	88.6	127.3	129.5	94.1	103.0	92.9	125.5	68.8	130.2	103.9	94.4	107.1	113.2
	SEPTIEMBRE	24.5	72.3	36.8	163.9	43.5	47.2	65.0	16.5	146.3	53.4	99.0	41.5	78.8	54.0	69.7	116.1	43.4	67.3	36.7	42.5	64.8	85.0	40.1	71.4
	OCTUBRE	2.3	3.9	0.0	35.2	17.4	39.0	4.5	4.1	30.5	25.8	36.7	7.9	3.1	62.7	9.6	0.0	4.1	9.7	9.9	18.4	158.4	36.0	4.2	27.7
	NOVIEMBRE	0.6	16.4	27.8	33.8	22.1	15.3	4.2	1.8	0.1	5.4	23.1	21.7	1.1	30.8	71.6	25.0	2.7	22.8	7.3	0.1	26.6	0.0	21.6	13.1
	DICIEMBRE	3.1	0.0	87.8	32.4	96.3	6.0	53.9	29.7	54.2	34.5	60.1	85.9	70.8	27.1	152.9	1.1	0.2	76.9	1.9	3.1	0.2	4.0	42.0	8.1

La Precipitación Potencial o agua disponible será la diferencia entre la precipitación en el vaso y la evapotranspiración real.

Tabla 4.66 Precipitación Potencial, método de Thornthwaite

Precipitaciones Potencial																									
ARITMÉTICO	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
El Molinito	ENERO	0.0	41.1	0.2	11.5	27.5	17.6	0.0	0.0	4.1	16.8	3.3	0.0	25.9	70.6	0.0	37.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.5	0.0	0.0
	FEBRERO	6.6	0.0	0.0	15.8	0.0	7.1	10.6	9.0	0.0	0.0	8.2	63.2	19.0	8.6	0.0	26.1	0.0	0.0	24.9	0.0	0.0	0.0	7.5	15.1
	MARZO	0.0	8.9	0.0	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ABRIL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	MAYO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	JUNIO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	JULIO	0.0	0.0	0.0	11.9	10.7	0.0	19.3	0.0	0.0	0.0	77.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	AGOSTO	0.0	0.0	0.0	3.4	20.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	91.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SEPTIEMBRE	0.0	0.0	0.0	42.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	OCTUBRE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	91.5	0.0	0.0	0.0
	NOVIEMBRE	0.0	0.0	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	30.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.8	0.0	0.0	0.0
	DICIEMBRE	0.0	0.0	74.5	12.2	77.8	0.0	40.9	20.3	44.3	20.7	41.5	65.3	53.5	0.0	137.7	0.0	0.0	64.3	0.0	0.0	0.0	0.0	32.3	0.0

Método de Turc

A partir de las temperaturas medias mensuales, se obtiene el parámetro L.

Tabla 4.67 Parámetro L, método de Turc

$$L = (300 - 25T - 0.05T^3)$$

ARITMÉTICO	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
El Molinito	ENERO	117.4	92.0	108.3	103.9	118.7	127.6	97.4	146.2	131.8	153.1	136.3	134.4	120.6	92.2	99.5	112.4	120.9	109.2	150.7	159.5	144.1	138.7	109.5	109.4
	FEBRERO	88.2	92.5	91.6	103.6	119.1	117.4	93.1	104.4	91.8	99.6	134.1	96.4	99.3	100.6	115.8	86.0	87.2	124.0	135.3	114.0	102.6	107.0	87.7	100.6
	MARZO	88.8	85.9	89.0	86.0	88.2	87.6	97.6	90.0	86.7	86.0	87.3	94.0	88.3	89.2	84.9	87.0	89.7	85.0	99.9	92.1	88.2	88.7	85.0	103.5
	ABRIL	96.3	120.2	207.1	89.3	114.5	157.6	190.2	144.7	137.0	127.1	109.2	85.0	104.9	89.4	116.7	84.9	86.7	89.8	93.1	97.3	118.4	111.1	152.9	87.3
	MAYO	176.2	258.8	309.9	260.4	298.8	345.6	240.1	270.3	278.4	248.4	248.5	134.5	306.3	210.3	246.7	146.3	140.1	164.6	107.5	249.6	369.5	307.0	217.5	197.0
	JUNIO	679.0	636.3	565.3	467.5	632.5	673.4	558.7	653.3	532.3	573.6	630.7	277.7	453.5	326.4	703.3	433.4	467.4	305.5	254.0	510.3	605.6	514.9	437.4	322.9
	JULIO	685.5	583.3	664.0	598.5	542.0	665.3	526.3	723.2	570.8	653.5	502.0	501.0	534.7	505.5	584.6	652.3	505.5	445.0	537.9	563.5	594.6	569.0	550.0	529.6
	AGOSTO	530.2	566.5	445.7	463.1	490.6	514.3	508.9	545.2	607.8	504.7	388.6	458.2	455.8	487.2	611.4	553.7	476.0	478.1	455.5	547.5	473.1	503.7	485.7	465.6
	SEPTIEMBRE	424.8	381.9	458.4	439.7	415.6	346.0	410.7	419.8	384.7	417.4	390.6	342.8	367.9	232.3	385.6	460.9	263.1	388.8	343.4	460.1	433.2	462.2	379.7	359.1
	OCTUBRE	174.7	168.2	133.9	152.3	147.0	152.8	136.3	306.2	180.2	179.9	163.3	164.0	157.5	108.5	99.4	145.5	112.4	117.4	132.1	181.7	152.6	162.2	101.5	176.0
	NOVIEMBRE	85.8	85.5	85.0	85.8	89.2	85.0	84.9	84.8	92.0	85.6	86.5	85.1	87.0	93.9	95.7	92.2	89.1	86.6	88.1	84.9	102.9	85.2	88.5	89.1
	DICIEMBRE	91.3	99.2	112.3	97.7	101.4	116.8	116.1	134.8	137.4	116.2	103.1	106.0	107.4	87.3	108.9	101.3	108.0	137.0	149.9	147.2	107.4	135.7	145.5	153.7

Y con las precipitaciones de la Tabla 4.66 se obtiene la ETR.

Tabla 4.68 Evapotranspiración Real, método de Turc

Evaporación Real, *ETR*

ARITMÉTICO	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
El Molinito	ENERO	8.1	53.5	15.3	30.0	41.0	29.6	12.4	1.8	15.8	25.4	15.1	9.4	39.9	68.3	3.3	50.3	0.0	4.7	0.1	0.0	0.1	18.4	3.8	0.0
	FEBRERO	29.5	10.1	0.0	33.0	2.4	20.4	30.0	24.6	0.7	16.6	19.8	66.2	37.3	29.5	9.8	46.8	16.1	9.3	40.0	0.1	0.4	6.1	32.5	35.5
	MARZO	2.6	36.0	0.0	42.6	0.0	1.0	3.8	0.3	11.9	5.3	4.2	5.6	46.3	2.7	2.4	5.1	0.1	4.0	5.7	0.7	23.3	1.7	1.1	6.1
	ABRIL	0.0	22.0	0.2	17.1	4.6	11.5	8.0	3.1	22.0	0.1	0.1	0.0	4.3	11.4	0.6	0.1	0.4	13.9	0.1	0.8	0.0	4.6	0.0	1.0
	MAYO	0.0	2.7	0.0	0.1	12.2	0.0	31.4	4.6	2.5	3.2	0.1	0.0	3.9	1.6	0.0	11.4	0.0	5.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1.9
	JUNIO	7.3	34.5	0.0	0.0	26.8	5.4	25.5	5.7	0.4	4.8	33.0	0.6	6.2	26.7	8.5	0.1	5.7	0.9	20.5	12.0	63.4	39.1	0.8	5.3
	JULIO	129.9	132.6	94.6	170.9	161.1	106.5	166.3	107.0	141.1	161.5	211.1	61.4	120.2	79.4	77.5	66.6	140.8	70.4	131.0	167.4	150.4	134.2	88.2	127.8
	AGOSTO	122.0	40.2	63.2	137.9	157.9	107.5	110.4	110.7	89.8	131.8	195.3	91.5	128.8	131.4	97.9	106.5	95.9	127.5	71.6	133.1	106.7	97.6	109.9	115.6
	SEPTIEMBRE	25.8	74.8	38.7	160.8	45.6	49.3	67.5	17.4	143.1	55.8	100.8	43.4	81.0	55.3	72.2	118.3	45.1	69.8	38.5	44.6	67.5	87.9	42.0	73.6
	OCTUBRE	2.4	4.1	0.1	36.0	18.2	39.7	4.8	4.3	31.7	26.9	37.6	8.3	3.2	56.4	10.1	0.0	4.3	10.1	10.4	19.3	112.7	37.0	4.4	28.9
	NOVIEMBRE	0.6	16.9	27.7	32.9	22.5	15.9	4.4	1.9	0.1	5.7	23.5	22.1	1.1	30.7	59.3	25.4	2.8	23.2	7.7	0.1	27.0	0.0	22.0	13.7
	DICIEMBRE	3.3	0.0	71.4	32.2	71.8	6.3	51.1	30.5	52.8	34.7	54.0	68.8	61.3	27.2	90.2	1.1	0.2	69.8	2.0	3.2	0.2	4.2	42.4	8.6

Por lo tanto, la precipitación potencial será:

Tabla 4.69 Precipitación potencial, método de Turc

Precipitaciones Potencial

ARITMÉTICO	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
El Molinito	ENERO	0.0	8.9	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	28.2	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	FEBRERO	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	20.2	0.9	0.0	0.0	6.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.5
	MARZO	0.0	1.6	0.0	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ABRIL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	MAYO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	JUNIO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	JULIO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	AGOSTO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	19.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	SEPTIEMBRE	0.0	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	OCTUBRE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	45.8	0.0	0.0	0.0
	NOVIEMBRE	0.0	0.0	0.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	12.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	DICIEMBRE	0.0	0.0	16.4	0.2	24.6	0.0	2.9	0.0	1.5	0.0	6.1	17.0	9.5	0.0	62.7	0.0	0.0	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Método de Coutange

De las temperaturas medias mensuales de la tabla 4.62, se obtiene el parámetro x,

Tabla 4.70 Parámetro x, método de Coutange

		$x = 1/(0.8 + 0.14t)$																								
ARITMÉTICO		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
El Molinito	ENERO	0.50	0.43	0.48	0.47	0.50	0.53	0.45	0.57	0.54	0.59	0.55	0.54	0.51	0.43	0.45	0.49	0.51	0.48	0.58	0.61	0.57	0.55	0.48	0.48	
	FEBRERO	0.41	0.43	0.43	0.46	0.50	0.50	0.43	0.47	0.43	0.45	0.54	0.44	0.45	0.46	0.50	0.40	0.41	0.52	0.54	0.49	0.46	0.47	0.41	0.46	
	MARZO	0.42	0.40	0.36	0.40	0.41	0.41	0.34	0.42	0.41	0.40	0.41	0.44	0.41	0.42	0.38	0.41	0.42	0.38	0.45	0.43	0.41	0.42	0.39	0.46	
	ABRIL	0.34	0.31	0.28	0.35	0.32	0.29	0.28	0.30	0.30	0.31	0.32	0.38	0.33	0.35	0.32	0.39	0.36	0.35	0.43	0.34	0.32	0.32	0.30	0.36	
	MAYO	0.29	0.26	0.25	0.26	0.25	0.25	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.31	0.25	0.27	0.27	0.30	0.30	0.29	0.33	0.26	0.24	0.25	0.27	0.28	
	JUNIO	0.21	0.22	0.22	0.23	0.22	0.21	0.22	0.21	0.22	0.22	0.22	0.22	0.26	0.23	0.25	0.21	0.24	0.23	0.25	0.26	0.23	0.22	0.23	0.23	
	JULIO	0.21	0.22	0.21	0.22	0.22	0.21	0.23	0.21	0.22	0.21	0.23	0.23	0.22	0.23	0.22	0.22	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.23	
	AGOSTO	0.23	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22	0.23	0.24	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22	0.23	0.23	0.23	0.22	0.23	0.23	0.23	0.23	
	SEPTIEMBRE	0.24	0.24	0.23	0.23	0.24	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.24	0.27	0.24	0.23	0.26	0.24	0.25	0.23	0.24	0.23	0.24	0.24	
	OCTUBRE	0.29	0.29	0.31	0.30	0.30	0.30	0.30	0.25	0.28	0.29	0.29	0.29	0.32	0.34	0.30	0.32	0.34	0.30	0.32	0.31	0.28	0.30	0.29	0.33	0.29
	NOVIEMBRE	0.40	0.40	0.38	0.40	0.42	0.39	0.38	0.38	0.43	0.37	0.37	0.39	0.41	0.44	0.34	0.35	0.42	0.37	0.41	0.38	0.46	0.37	0.41	0.42	
	DICIEMBRE	0.43	0.45	0.49	0.45	0.46	0.50	0.50	0.54	0.55	0.50	0.46	0.47	0.48	0.41	0.48	0.46	0.48	0.55	0.58	0.57	0.47	0.55	0.57	0.59	

La precipitación media mensual, en m se muestra en la tabla 4.72

Tabla 4.71 Precipitación media mensual, en m

		Precipitaciones Media Mensual, en m																							
ARITMÉTICO		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
El Molinito	ENERO	0.008	0.062	0.015	0.030	0.041	0.029	0.012	0.002	0.015	0.024	0.014	0.009	0.040	0.097	0.003	0.053	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.018	0.004	0.000
	FEBRERO	0.030	0.010	0.000	0.033	0.002	0.020	0.030	0.024	0.001	0.016	0.019	0.086	0.038	0.029	0.009	0.053	0.016	0.009	0.040	0.000	0.000	0.006	0.033	0.036
	MARZO	0.002	0.038	0.000	0.046	0.000	0.001	0.004	0.000	0.011	0.005	0.004	0.005	0.052	0.003	0.002	0.005	0.000	0.004	0.005	0.001	0.023	0.002	0.001	0.006
	ABRIL	0.000	0.021	0.000	0.017	0.004	0.011	0.008	0.003	0.021	0.000	0.000	0.000	0.004	0.011	0.001	0.000	0.000	0.013	0.000	0.001	0.000	0.004	0.000	0.001
	MAYO	0.000	0.003	0.000	0.000	0.012	0.000	0.030	0.004	0.002	0.003	0.000	0.000	0.004	0.001	0.000	0.011	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	JUNIO	0.007	0.033	0.000	0.000	0.025	0.005	0.024	0.005	0.000	0.005	0.031	0.001	0.006	0.025	0.008	0.000	0.005	0.001	0.019	0.011	0.061	0.037	0.001	0.002
	JULIO	0.125	0.129	0.091	0.169	0.160	0.102	0.166	0.103	0.138	0.158	0.221	0.059	0.117	0.076	0.074	0.064	0.139	0.068	0.128	0.166	0.147	0.131	0.085	0.125
	AGOSTO	0.119	0.038	0.061	0.137	0.158	0.104	0.107	0.107	0.086	0.129	0.214	0.089	0.127	0.129	0.094	0.103	0.093	0.126	0.069	0.130	0.104	0.094	0.107	0.113
	SEPTIEMBRE	0.025	0.072	0.037	0.164	0.044	0.047	0.065	0.017	0.146	0.053	0.099	0.042	0.079	0.054	0.070	0.116	0.043	0.067	0.037	0.043	0.065	0.085	0.040	0.071
	OCTUBRE	0.002	0.004	0.000	0.035	0.017	0.039	0.005	0.004	0.031	0.026	0.037	0.008	0.003	0.063	0.010	0.000	0.004	0.010	0.010	0.018	0.158	0.036	0.004	0.028
	NOVIEMBRE	0.001	0.016	0.028	0.034	0.022	0.015	0.004	0.002	0.000	0.005	0.023	0.022	0.001	0.031	0.072	0.025	0.003	0.023	0.007	0.000	0.027	0.000	0.022	0.013
	DICIEMBRE	0.003	0.000	0.088	0.032	0.096	0.006	0.054	0.030	0.054	0.034	0.060	0.086	0.071	0.027	0.153	0.001	0.000	0.077	0.002	0.003	0.000	0.004	0.042	0.008

Tabla 4.72 Evapotranspiración real, en mm/mes, método de Coutange

		Evaporación Real, ETR, en m/mes																							
ARITMÉTICO		1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
El Molinito	ENERO	0.01	0.06	0.01	0.03	0.04	0.03	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04	0.09	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
	FEBRERO	0.03	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.03	0.02	0.00	0.02	0.02	0.08	0.04	0.03	0.01	0.05	0.02	0.01	0.04	0.00	0.00	0.01	0.03	0.04
	MARZO	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01
	ABRIL	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	MAYO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	JUNIO	0.01	0.03	0.00	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.06	0.04	0.00	0.01
	JULIO	0.12	0.13	0.09	0.16	0.15	0.10	0.16	0.10	0.13	0.15	0.21	0.06	0.11	0.07	0.07	0.06	0.13	0.07	0.12	0.16	0.14	0.13	0.08	0.12
	AGOSTO	0.12	0.04	0.06	0.13	0.15	0.10	0.10	0.10	0.08	0.13	0.20	0.09	0.12	0.13	0.09	0.10	0.09	0.12	0.07	0.13	0.10	0.09	0.10	0.11
	SEPTIEMBRE	0.02	0.07	0.04	0.16	0.04	0.05	0.06	0.02	0.14	0.05	0.10	0.04	0.08	0.05	0.07	0.11	0.04	0.07	0.04	0.04	0.06	0.08	0.04	0.07
	OCTUBRE	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.04	0.00	0.00	0.03	0.03	0.04	0.01	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.15	0.04	0.00	0.03
	NOVIEMBRE	0.00	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.03	0.07	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.01
	DICIEMBRE	0.00	0.00	0.08	0.03	0.09	0.01	0.05	0.03	0.05	0.03	0.06	0.08	0.07	0.03	0.14	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01

Por lo tanto, la Precipitación Potencial resulta de:

Tabla 4.73 Precipitación Potencial, Método de Coutange

Precipitaciones Potencial en mm																									
ARITMÉTICO	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	
El Molinito	ENERO	0.0	1.7	0.1	0.4	0.9	0.4	0.1	0.0	0.1	0.4	0.1	0.0	0.8	4.0	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	
	FEBRERO	0.4	0.0	0.0	0.5	0.0	0.2	0.4	0.3	0.0	0.1	0.2	3.3	0.7	0.4	0.0	1.1	0.1	0.0	0.9	0.0	0.0	0.5	0.6	
	MARZO	0.0	0.6	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	
	ABRIL	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	MAYO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	JUNIO	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.8	0.3	0.0	0.0	
	JULIO	3.3	3.7	1.8	6.3	5.7	2.2	6.2	2.2	4.2	5.4	11.1	0.8	3.1	1.3	1.2	0.9	4.4	1.1	3.7	6.1	4.8	3.8	1.6	3.5
	AGOSTO	3.2	0.3	0.9	4.4	5.7	2.5	2.6	2.6	1.6	3.8	11.1	1.8	3.8	3.8	1.9	2.4	2.0	3.6	1.1	3.8	2.5	2.0	2.6	3.0
	SEPTIEMBRE	0.1	1.3	0.3	6.3	0.4	0.6	1.0	0.1	5.2	0.7	2.4	0.4	1.5	0.8	1.2	3.1	0.5	1.1	0.3	0.4	1.0	1.7	0.4	1.2
	OCTUBRE	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	0.5	0.0	0.0	0.3	0.2	0.4	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	7.4	0.4	0.0	0.2	
	NOVIEMBRE	0.0	0.1	0.3	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.4	1.8	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0	0.2	0.1
	DICIEMBRE	0.0	0.0	3.8	0.5	4.3	0.0	1.4	0.5	1.6	0.6	1.7	3.5	2.4	0.3	11.2	0.0	0.0	3.2	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	

De estos resultados, se tomarán los optimistas para realizar el funcionamiento de vaso; es decir, se tomarán los resultados obtenidos del método de Coutange para el cálculo.

4.8.6.2 Generación sintética de la precipitación potencial

De acuerdo con el procedimiento descrito en el subcapítulo 3.8.1.2 se requiere de datos de entradas y salidas al vaso de almacenamiento, sin embargo, para el problema que aquí se aborda, la falta de información lleva a que se busquen alternativas para la generación de ella.

Con la información de precipitación potencial obtenida a partir de los registros de precipitación y evaporación de las estaciones climatológicas de la zona, es posible generar sintéticamente información de precipitación potencial.

Los resultados del método de Coutange se utilizaron para la generación sintética de entradas potenciales al vaso de almacenamiento; es decir que a las precipitaciones potenciales se les aplican los modelos autoregresivos, y de acuerdo con el criterio de AKAIKE se toman los datos generados por dicho modelo, los cuales pueden ser convertidos en escurrimientos al multiplicar las precipitaciones potenciales por el área de la cuenca, que serán las entradas al vaso.

En la Tabla 4.75 se presentan las precipitaciones potenciales que se utilizaron para el proceso de generación. Es importante mencionar que para el caso de estudio se requiere del análisis periódico, es decir que la simulación se llevará a cabo de manera mensual, esto con el fin de buscar una mejor representación de los escurrimientos de entrada al vaso.

Se obtienen los parámetros estadísticos de cada serie mensual, como los que se presentan en la Tabla 4.76.

Tabla 4.74 Precipitación Potencial, Método de Coutange

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	3.3	3.2	0.1	0.0	0.0	0.0	7.1
1981	1.7	0.0	0.6	0.1	0.0	0.2	3.7	0.3	1.3	0.0	0.1	0.0	8.0
1982	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.9	0.3	0.0	0.3	3.8	7.1
1983	0.4	0.5	0.9	0.1	0.0	0.0	6.3	4.4	6.3	0.4	0.5	0.5	20.1
1984	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	5.7	5.7	0.4	0.1	0.2	4.3	17.5
1985	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	2.5	0.6	0.5	0.1	0.0	6.5
1986	0.1	0.4	0.0	0.0	0.2	0.1	6.2	2.6	1.0	0.0	0.0	1.4	12.2
1987	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	2.6	0.1	0.0	0.0	0.5	5.6
1988	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	4.2	1.6	5.2	0.3	0.0	1.6	13.2
1989	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	5.4	3.8	0.7	0.2	0.0	0.6	11.1
1990	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	11.1	11.1	2.4	0.4	0.2	1.7	27.3
1991	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.8	0.4	0.0	0.2	3.5	10.1
1992	0.8	0.7	1.1	0.0	0.0	0.0	3.1	3.8	1.5	0.0	0.0	2.4	13.3
1993	4.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.2	1.3	3.8	0.8	1.3	0.4	0.3	12.5
1994	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	1.9	1.2	0.0	1.8	11.2	17.4
1995	1.4	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	2.4	3.1	0.0	0.2	0.0	9.1
1996	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	2.0	0.5	0.0	0.0	0.0	7.0
1997	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	1.1	3.6	1.1	0.0	0.2	3.2	9.4
1998	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.1	3.7	1.1	0.3	0.0	0.0	0.0	6.1
1999	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	3.8	0.4	0.1	0.0	0.0	10.5
2000	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.8	4.8	2.5	1.0	7.4	0.3	0.0	17.0
2001	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	3.8	2.0	1.7	0.4	0.0	0.0	8.4
2002	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	2.6	0.4	0.0	0.2	1.0	6.3
2003	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	3.0	1.2	0.2	0.1	0.0	8.7

Tabla 4.75 Parámetros estadísticos

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
X _{media} =	0.44	0.40	0.12	0.02	0.01	0.09	3.69	3.04	1.33	0.47	0.20	1.50
S =	0.89	0.69	0.29	0.04	0.05	0.18	2.39	2.09	1.54	1.51	0.36	2.48
g =	3.21	3.55	2.65	2.03	4.63	3.15	1.24	2.56	2.28	4.65	3.80	2.86
k =	14.68	17.61	9.23	6.11	25.01	14.68	5.59	12.30	8.07	25.16	19.48	13.03

Las series de datos se normalizan, según el procedimiento de apartado 3.8.1.2, para series periódicas, en la Tabla 4.77 se presenta la serie de precipitaciones potenciales normalizada; y en la Tabla 4.78 se muestran las series estandarizadas.

Tabla 4.76 Series periódicas normalizadas

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1	-3.5	-1.0	-6.0	-15.9	-6.9	-4.6	1.2	1.2	-2.0	-6.5	-8.9	-5.5	-58.4
2	0.5	-3.2	-0.6	-1.9	-6.3	-1.5	1.3	-1.1	0.2	-5.4	-2.2	-6.9	-27.2
3	-2.3	-17.0	-14.1	-11.7	-15.6	-6.9	0.6	-0.2	-1.2	-14.1	-1.2	1.3	-82.3
4	-0.9	-0.7	-0.1	-2.3	-12.5	-15.1	1.8	1.5	1.8	-1.0	-0.8	-0.8	-29.0
5	-0.1	-6.0	-6.9	-5.1	-3.4	-2.0	1.7	1.7	-0.8	-2.4	-1.6	1.4	-23.3
6	-0.8	-1.6	-8.0	-3.4	-6.9	-5.2	0.8	0.9	-0.6	-0.8	-2.4	-4.0	-32.0
7	-2.8	-0.9	-5.4	-4.1	-1.4	-2.0	1.8	1.0	0.0	-5.1	-5.0	0.4	-23.6
8	-6.4	-1.3	-10.0	-6.0	-5.3	-5.1	0.8	0.9	-2.7	-5.5	-6.7	-0.7	-48.0
9	-2.1	-8.7	-2.9	-2.0	-6.5	-10.5	1.4	0.5	1.6	-1.3	-12.1	0.5	-42.1
10	-1.0	-2.2	-4.6	-13.9	-6.0	-5.4	1.7	1.3	-0.4	-1.7	-4.5	-0.5	-37.1
11	-2.2	-1.6	-5.0	-12.7	-12.6	-1.5	2.4	2.4	0.9	-0.9	-1.6	0.5	-32.0
12	-3.1	1.2	-4.4	-6.9	-6.9	-9.4	-0.2	0.6	-0.9	-4.0	-1.7	1.2	-34.5
13	-0.2	-0.4	0.1	-5.2	-5.7	-4.8	1.1	1.3	0.4	-5.9	-7.6	0.9	-26.0
14	1.4	-0.9	-5.9	-3.2	-7.4	-1.8	0.3	1.3	-0.2	0.2	-0.9	-1.2	-18.3
15	-5.4	-3.1	-6.2	-9.4	-19.4	-4.3	0.2	0.7	0.2	-3.5	0.6	2.4	-47.3
16	0.3	0.1	-4.7	-12.0	-3.4	-12.3	-0.1	0.9	1.1	-6.9	-1.5	-7.6	-46.1
17	-15.2	-2.3	-13.4	-10.0	-6.9	-5.0	1.5	0.7	-0.7	-5.2	-5.8	-11.3	-73.8
18	-4.7	-3.2	-5.2	-2.8	-5.0	-8.6	0.1	1.3	0.1	-3.5	-1.7	1.2	-32.0
19	-13.5	-0.2	-4.3	-13.0	-6.9	-2.3	1.3	0.1	-1.1	-3.5	-3.8	-6.2	-53.3
20	-6.9	-13.5	-8.5	-8.5	-6.9	-3.5	1.8	1.3	-0.9	-2.3	-13.6	-5.2	-66.8
21	-12.7	-9.7	-1.5	-6.9	-6.9	-0.2	1.6	0.9	0.0	2.0	-1.1	-10.9	-45.5
22	-1.8	-4.1	-6.8	-5.1	-13.9	-1.2	1.3	0.7	0.5	-1.0	-15.2	-4.7	-51.3
23	-5.1	-0.8	-7.7	-6.9	-6.9	-9.0	0.5	1.0	-0.9	-5.1	-1.6	0.0	-42.7
24	-6.9	-0.5	-4.2	-8.0	-7.1	-5.1	1.3	1.1	0.2	-1.5	-2.6	-3.2	-36.5

Tabla 4.77 Series periódicas estandarizadas

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1	0.1	0.5	-0.1	-2.1	0.2	0.2	0.2	0.4	-1.6	-0.9	-1.1	-0.8	-5.0
2	1.0	0.0	1.4	1.3	0.4	1.0	0.3	-3.0	0.4	-0.6	0.5	-1.1	1.6
3	0.4	-3.0	-2.3	-1.0	-1.9	-0.4	-0.7	-1.6	-0.9	-3.3	0.7	0.9	-13.2
4	0.7	0.6	1.5	1.2	-1.1	-2.6	1.1	0.8	2.0	0.8	0.8	0.4	6.2
5	0.9	-0.6	-0.3	0.5	1.1	0.9	0.9	1.2	-0.6	0.4	0.6	1.0	6.0
6	0.7	0.4	-0.6	1.0	0.2	0.0	-0.4	0.0	-0.4	0.8	0.4	-0.4	1.8
7	0.3	0.5	0.1	0.8	1.5	0.9	1.0	0.1	0.2	-0.5	-0.2	0.7	5.5
8	-0.5	0.5	-1.2	0.3	0.6	0.1	-0.4	0.0	-2.4	-0.6	-0.5	0.4	-3.8
9	0.4	-1.2	0.8	1.3	0.3	-1.3	0.5	-0.6	1.8	0.7	-1.8	0.7	1.5
10	0.7	0.3	0.3	-1.6	0.4	0.0	0.8	0.6	-0.2	0.6	0.0	0.5	2.4
11	0.4	0.4	0.2	-1.3	-1.2	1.0	1.9	2.2	1.0	0.8	0.6	0.7	6.8
12	0.2	1.0	0.4	0.1	0.2	-1.1	-1.9	-0.5	-0.6	-0.1	0.6	0.9	-0.8
13	0.8	0.7	1.6	0.5	0.5	0.1	0.0	0.6	0.6	-0.7	-0.8	0.8	4.9
14	1.2	0.5	-0.1	1.0	0.1	0.9	-1.1	0.6	0.0	1.2	0.8	0.3	5.5
15	-0.3	0.1	-0.1	-0.5	-2.8	0.3	-1.3	-0.4	0.4	0.0	1.1	1.2	-2.4
16	1.0	0.8	0.3	-1.1	1.1	-1.8	-1.7	-0.1	1.3	-1.0	0.6	-1.3	-2.1
17	-2.5	0.2	-2.2	-0.6	0.2	0.1	0.6	-0.3	-0.5	-0.5	-0.3	-2.2	-8.1
18	-0.2	0.0	0.1	1.1	0.7	-0.9	-1.4	0.5	0.3	0.0	0.6	0.9	1.9
19	-2.1	0.7	0.4	-1.3	0.2	0.8	0.3	-1.2	-0.8	0.0	0.1	-0.9	-3.9
20	-0.7	-2.2	-0.8	-0.3	0.2	0.5	1.0	0.6	-0.6	0.4	-2.1	-0.7	-4.7
21	-2.0	-1.4	1.2	0.1	0.2	1.3	0.7	0.0	0.2	1.7	0.7	-2.1	0.7
22	0.5	-0.2	-0.3	0.5	-1.5	1.1	0.4	-0.3	0.7	0.8	-2.5	-0.6	-1.4
23	-0.2	0.6	-0.6	0.1	0.2	-1.0	-0.9	0.1	-0.7	-0.5	0.6	0.6	-1.6
24	-0.7	0.6	0.4	-0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.4	-0.2	2.2

A estas series estandarizadas, se le aplican los modelos autoregresivos periódicos con coeficientes periódicos. En las tablas 4.79, 4.80, 4.81 y 4.82 se presentan los coeficientes de cada uno de los modelos, así como su valor del CIA para que sea comparado con el criterio de AKAIKE.

Tabla 4.78 Coeficientes y CIA del modelo PARMA (1,1)

Parma (1,1)												
SUBCUENCA: EL MOLINITO												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
$\phi_{1,t} =$	0.021	0.009	0.029	0.025	0.014	0.001	0.030	0.023	0.009	0.029	-0.005	0.014
$\sigma_{\epsilon_t}^2 =$	0.078	0.070	0.071	0.077	0.079	0.068	0.072	0.078	0.070	0.078	0.078	0.074
$\sigma_{\epsilon_t} =$	0.280	0.265	0.266	0.277	0.282	0.262	0.268	0.279	0.265	0.279	0.279	0.273
$C_0 =$	0.079	0.080	0.078	0.079	0.080	0.080	0.078	0.079	0.080	0.078	0.080	0.079
$C_1 =$	0.007	0.026	0.023	0.012	0.001	0.028	0.021	0.008	0.026	-0.005	0.013	0.020
$\theta_1 =$	-0.088	-0.373	-0.321	-0.162	-0.011	-0.410	-0.297	-0.100	-0.373	0.060	-0.168	-0.263
CIA	-729.436	-761.780	-757.835	-735.666	-725.242	-768.399	-754.818	-730.499	-761.810	-730.631	-732.064	-744.614

Tabla 4.79 Coeficientes y CIA del modelo PARMA (1,2)

Parma (1,2)												
SUBCUENCA: EL MOLINITO												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
$\phi_{1,t} =$	0.021	0.009	0.029	0.025	0.014	0.001	0.030	0.023	0.009	0.029	-0.005	0.014
$\sigma_{\epsilon_t}^2 =$	0.085	0.088	0.085	0.082	0.080	0.089	0.085	0.092	0.087	0.080	0.082	0.098
$\sigma_{\epsilon_t} =$	0.291	0.296	0.292	0.286	0.282	0.299	0.291	0.304	0.295	0.283	0.286	0.313
$C_0 =$	0.079	0.080	0.078	0.079	0.080	0.080	0.078	0.079	0.080	0.078	0.080	0.079
$C_1 =$	0.007	0.026	0.023	0.012	0.001	0.028	0.021	0.008	0.026	-0.005	0.013	0.020
$C_2 =$	0.021	0.001	0.013	-0.008	0.004	-0.003	0.015	0.034	0.004	-0.011	0.006	0.036
$\theta_1 =$	-0.064	-0.296	-0.231	-0.168	-0.010	-0.324	-0.213	-0.059	-0.285	0.068	-0.147	-0.135
$\theta_2 =$	-0.252	-0.006	-0.154	0.096	-0.048	0.032	-0.174	-0.366	-0.050	0.141	-0.077	-0.369
CIA	-704.829	-695.557	-703.392	-715.174	-722.510	-689.396	-704.635	-679.960	-696.737	-720.497	-714.015	-662.257

Tabla 4.80 Coeficientes y CIA del modelo PARMA (2,1)

Parma (2,1)												
SUBCUENCA: EL MOLINITO												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
$\phi_{1,t} =$	0.021	0.008	0.028	0.025	0.014	0.001	0.030	0.023	0.009	0.028	-0.005	0.014
$\phi_{2,t} =$	0.006	0.037	0.022	0.001	0.014	-0.008	0.004	-0.003	0.014	0.034	0.004	-0.011
$\sigma_{\varepsilon_t}^2 =$	0.078	0.067	0.071	0.077	0.079	0.068	0.072	0.078	0.070	0.076	0.078	0.074
$\sigma_{\varepsilon_t} =$	0.280	0.258	0.266	0.277	0.281	0.261	0.268	0.279	0.265	0.275	0.279	0.272
$C_0 =$	0.079	0.076	0.077	0.079	0.079	0.080	0.078	0.079	0.079	0.076	0.080	0.079
$C_1 =$	0.006	0.025	0.022	0.012	0.001	0.028	0.021	0.007	0.026	-0.005	0.013	0.020
$\theta_1 =$	-0.079	-0.379	-0.314	-0.158	-0.013	-0.410	-0.298	-0.095	-0.364	0.064	-0.167	-0.263
CIA	-727.268	-774.053	-757.735	-733.200	-724.477	-766.835	-753.054	-728.315	-759.655	-736.986	-730.129	-743.560

Tabla 4.81 Coeficientes y CIA del modelo PARMA (2,2)

Parma (2,2)												
SUBCUENCA: EL MOLINITO												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
$\phi_{1,t} =$	0.021	0.008	0.028	0.025	0.014	0.001	0.030	0.023	0.009	0.028	-0.005	0.014
$\phi_{2,t} =$	0.006	0.037	0.022	0.001	0.014	-0.008	0.004	-0.003	0.014	0.034	0.004	-0.011
$\sigma_{\varepsilon_t}^2 =$	0.084	0.083	0.084	0.082	0.079	0.089	0.085	0.090	0.086	0.078	0.082	0.095
$\sigma_{\varepsilon_t} =$	0.290	0.289	0.290	0.286	0.282	0.299	0.291	0.301	0.294	0.280	0.286	0.309
$C_0 =$	0.079	0.076	0.077	0.079	0.079	0.080	0.078	0.079	0.079	0.076	0.080	0.079
$C_1 =$	0.006	0.025	0.022	0.012	0.001	0.028	0.021	0.007	0.026	-0.005	0.013	0.020
$C_2 =$	0.020	0.005	0.012	-0.007	0.003	-0.003	0.014	0.031	0.004	-0.011	0.006	0.033
$\theta_1 =$	-0.059	-0.286	-0.230	-0.163	-0.012	-0.323	-0.217	-0.059	-0.281	0.072	-0.147	-0.143
$\theta_2 =$	-0.235	-0.057	-0.144	0.089	-0.042	0.030	-0.162	-0.345	-0.051	0.144	-0.071	-0.350
CIA	-705.867	-707.278	-705.806	-713.967	-721.869	-687.951	-703.607	-684.271	-696.946	-726.247	-712.405	-668.667

Tabla 4.82 Criterio de AKAIKE

CIA	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep.	Octubre	Nov.	Dic.
PARMA (1,1)	-729.436	-761.780	-757.835	-735.666	-725.242	-768.399	-754.818	-730.499	-761.810	-730.631	-732.064	-744.614
PARMA (1,2)	-704.829	-695.557	-703.392	-715.174	-722.510	-689.396	-704.635	-679.960	-696.737	-720.497	-714.015	-662.257
PARMA (2,1)	-727.268	-774.053	-757.735	-733.200	-724.477	-766.835	-753.054	-728.315	-759.655	-736.986	-730.129	-743.560
PARMA (2,2)	-705.867	-707.278	-705.806	-713.967	-721.869	-687.951	-703.607	-684.271	-696.946	-726.247	-712.405	-668.667
	PARMA (1,1)	PARMA (2,1)	PARMA (1,1)	PARMA (2,1)	PARMA (1,1)	PARMA (1,1)						

De la Tabla 4.83 se observa que el modelo PARMA (1,1) es el que resulta un mejor modelo de generación sintética para este caso; por lo tanto, con este modelo se generaron las precipitaciones potenciales para 1,000 años para la realización del funcionamiento de vaso, y los resultados se muestran en la Tabla 4.84.

Tabla 4.83 Resultados del funcionamiento de vaso

Funcionamiento de Vaso						
Corrida	Años	Meses			Derrames	Déficits
1	100	1	-	1,200	0	140
2	200	1,201	-	2,400	2	153
3	300	2,401	-	3,600	2	152
4	400	3,601	-	4,800	2	151
5	500	4,801	-	6,000	3	164
6	600	6,001	-	7,200	0	147
7	700	7,201	-	8,400	2	159
8	800	8,401	-	9,600	2	166
9	900	9,601	-	10,800	0	152
10	1,000	10,801	-	12,000	2	172
					15	1556
					0.13%	12.97%

De acuerdo con los resultados del funcionamiento de vaso, puede observarse que al aplicar la generación sintética para la generación de precipitaciones potenciales, se presenta un porcentaje considerable de los meses que presentan déficit en el almacenamiento, es decir que el 13% del tiempo deberá suspenderse el abastecimiento al acueducto.

5 CONCLUSIONES

La simulación del comportamiento hidrológico sin contar con la suficiente información real, puede producir gran incertidumbre en si el diseño de obras de infraestructura es seguro o no. Sin embargo, la toma de decisiones obliga a analizar diversas alternativas para seleccionar aquella que muestre la menor incertidumbre.

En el caso particular de la cuenca del río Sonora, el problema de lo escaso de la información hidrológica está aunado a lo escaso del recurso, debido a que la zona es árida; y esta complicación aumenta cuando la poca cantidad de información existente no tiene la calidad necesaria.

El análisis hidrológico que se presentó en este trabajo ejemplifica el uso de herramientas que generan la información necesaria para simular el comportamiento hidrológico para la zona de interés y además proporcionan confiabilidad de los resultados.

5.1 Conclusiones de los resultados

La cuenca del río Sonora fue dividida en 4 subcuencas para 4 diferentes configuraciones de análisis. La primera configuración corresponde a las condiciones iniciales, en las que se considera sólo la existencia de las presas El Molinito y Abelardo L. Rodríguez, de tal forma que la cuenca se subdivide en 3 subcuencas (El Orégano, El Cajón y Zanjón). La segunda configuración, considera la construcción de la presa Puerta del Sol, aguas arriba de la presa El Molinito, y las dos presas ya existentes, de tal forma que para este análisis se consideran 4 subcuencas. La tercera configuración considera la construcción de la presa Las Chivas en la cuenca El Cajón. Finalmente, la configuración 4, considera la construcción de las dos presas.

Se adoptó el método exponencial para la interpolación de lluvias diarias y se logró obtener un registro común de las 19 estaciones pluviométricas para un periodo de 24 años, debido a que este método fue el que presentó el menor error en la interpolación anual tomando como base la estación Carbó y año 1981, que fue el año en el que dicha estación tenía menos porosidad en el registro.

Este registro fue sometido a las pruebas de homogeneidad y de independencia para, posteriormente, generar registros medios de precipitación por subcuenca. De estos registros se extrajeron las precipitaciones máximas anuales para someterlas a la teoría distribucional, de la cual resultó que la función de distribución de probabilidad Gamma de 3 parámetros resultó la que presentó mejor ajuste de los datos de 3 de las 4 subcuencas; por lo que se tomaron los eventos que se calcularon con esta función.

Con las precipitaciones calculadas se obtuvieron las curvas de intensidad – duración – periodo de retorno, considerando los ajustes por duración y por área.

Las pérdidas se estimaron a partir del método del número de escurrimiento, ponderando este número a partir del área de influencia del uso de suelo, de tal forma que el número de escurrimiento de la cuenca es 68.

Con el número de escurrimiento, las precipitaciones calculadas a partir de la función Gamma, y las características fisiográficas de la cuenca, se calculó la precipitación efectiva; con la cual se determinó el coeficiente de escurrimiento representativo de la subcuenca; y por medio del método de bloques alternos se determinaron los hietogramas de precipitación efectiva.

Estos hietogramas dieron lugar a los hidrogramas de escurrimiento directo de las subcuencas, los cuales fueron obtenidos a partir de la aplicación de la metodología del hidrograma unitario sintético adimensional. Estas avenidas fueron transitadas en las obras de excedencias de las presas consideradas para cada configuración. Y de acuerdo con los resultados, se observó que la configuración que contempla a las 2 presas ya existentes y la presa que se localizará en la subcuenca El Cajón (Presa Las Chivas) proporciona un mayor beneficio; ya que permitirá regular una parte que no está siendo aprovechada del río Sonora, además que disminuirá las aportaciones a la presa Abelardo L. Rodríguez.

Finalmente, para el caso de la generación sintética de escurrimientos por medio de la precipitación potencial, muestra un comportamiento semejante al que se presentan los registros históricos; ya que debido a que la zona es árida, lo escaso del recurso se hace presente. Y de acuerdo con los resultados obtenidos del funcionamiento de vaso a 1,000 años en la presa El Molinito, habrá déficit del recurso en, aproximadamente, 13% de los años; por lo que se recomienda que en los meses en los que se presente tal déficit, se evite la extracción del recurso por medio del acueducto (actualmente, la única extracción el vaso).

6 REFERENCIAS

- Escalante Sandoval, Carlos. "Técnicas Estadísticas en Hidrología". Facultad de Ingeniería, UNAM. México 2002.
- Domínguez Mora, Ramón. "Análisis Regional para la Obtención de Precipitaciones de Diseño Asociadas a Duraciones Menores que 2 horas". XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Baeza Ramírez, Carlos. Tesis de Maestría: "Estimación regional de factores de convectividad para el cálculo de las relaciones intensidad – duración – frecuencia". División de Estudios de Posgrado. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 2007.
- Chow, Ben T. "Hidrología Aplicada". 1996
- Aparicio Mijares, Francisco J. "Fundamentos de Hidrología de Superficie", LIMUSA. México 2006.
- Fuentes Mariles, Óscar A. "Estudio Hidrológico para Obras de Protección". Series del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Springall Galindo, Rolando. "Esguimientos en Cuencas Grandes". Series del Instituto de Ingeniería, UNAM. México 1967.
- Springall Galindo, Rolando. "Hidrología. Primera Parte". Series del Instituto de Ingeniería, UNAM. México 1970.
- Consultores S.A. "Recomendaciones para el Diseño y Revisión de Estructuras para el Control de Avenidas", México 1978.
- Franco, Víctor. "Manual de Hidrología", CONAGUA. México, 2007.

-
- Castiglioni, M. G. et al. "Análisis de un Modelo Hidrológico en una Microcuenca de Pampa Ondulada, Argentina". Facultad de Agronomía. UBA. Argentina 1999.
 - Estudio sobre las Normas de Operación en las Presas Acuífero de la Cuenca del Río Sonora, Instituto de Ingeniería, UNAM. México 2006.
 - Estudio y Proyecto de las Presas Sinoquipe y Las Chivas, Gobierno del Estado de Sonora, Sonora 2004.
 - Programa Estatal de Mediano Plazo. Aprovechamiento Sustentable de Agua. 2004 – 2009. Gobierno del Estado de Sonora.
 - Ortiz Vera, Oswaldo. "Evaluación Hidrológica". Revista Hidrored, Red Latinoamericana de Micro – Energía. Enero 2004
 - <http://www.ceasonora.gob.mx/Articulos.aspx?id=59>
 - http://transparencia.esonora.gob.mx/NR/rdonlyres/2E30645A-C97C-41DD-B967-B72DAC5BE854/9004/informe_jta_gob_04_abr_2006.pdf
 - http://meted.ucar.edu/hydro/basic/Routing_es/print_version/print_index.htm