



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

REGIONALIZACIÓN DE DATOS DE ESCURRIMIENTO DE LAS REGIONES
HIDROLÓGICAS DE MÉXICO PARA LA ESTIMACIÓN DE AVENIDAS DE DISEÑO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
HUMBERTO GUZMÁN GARCÍA

TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)
DRA. MARITA LILIANA ARGANIS JUÁREZ
DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gracia Sánchez Jesús
Secretario: Dr. Fuentes Mariles Oscar
Vocal: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana
1^{er} Suplente: Dr. Domínguez Mora Ramón
2^d Suplente: M.I. Franco Víctor

INSTITUTO DE INGENIERÍA

TUTOR DE TESIS:

DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ

FIRMA

Agradecimientos

A mi madre Esther García Falcón por darme la vida y apoyarme incondicionalmente.

A mis hermanos Esther, Laura y Emmanuel por su apoyo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por las oportunidades brindadas para la superación y formación tanto humana como profesionalmente.

A la Facultad de Ingeniería por la educación que recibí durante mi estancia en sus aulas.

Al Instituto de Ingeniería por el apoyo recibido durante la elaboración de esta tesis.

A la Dra. Maritza Liliana Arganis y al Dr. Ramón Domínguez Mora por su paciencia y asesoría durante el desarrollo de esta tesis.

A los Sinodales por su apoyo para concluir con esta etapa.

A Ana Gabriela García García y su familia por ser una parte importante de mi vida.



ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. DESCRIPCION DE LOS CAPÍTULOS DE LA TESIS.....	2
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	3
2.1. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL TEMA DE LA TESIS.....	3
CAPÍTULO 3. CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA E HIDROLOGÍA.....	9
3.1. LA ESTADÍSTICA.....	9
3.1.1 Medidas de tendencia central.....	9
3.1.2 Media.....	10
3.1.3 Mediana.....	10
3.1.4 Moda.....	11
3.1.5 Varianza.....	11
3.1.6 Desviación estándar.....	12
3.1.7 Coeficiente de determinación.....	13
3.1.8 Coeficiente de variación.....	14
3.1.9 Funciones continuas de probabilidad.....	15
3.1.10 Periodo de retorno.....	15
3.1.11 Funciones de distribución de probabilidad comúnmente usadas en Hidrología.....	17
3.1.12 Distribución Normal.....	18
3.1.13 Distribución Lognormal.....	19
3.1.14 Distribución Gumbel.....	20
3.1.15 Funciones para dos poblaciones.....	20
3.1.16 Distribución Pearson III o Gamma de tres parámetros.....	23
3.1.17 Programa AX.....	23
3.1.18 Algoritmos Genéticos (AGs).....	24
3.1.19 Algoritmo Genético Simple (AGS).....	25
3.2 LA HIDROLOGÍA.....	30
3.2.1 Área drenada.....	30



3.2.2 Tiempo de concentración.....	31
3.2.3 Precipitación media hp.....	32
3.2.4 Número de escurrimiento N y espesor del suelo S.....	32
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	33
4.1 ESTIMACIÓN DE LA MEDIA DE LOS GASTOS MÁXIMOS ANUALES COMO FUNCIÓN DEL ÁREA	42
4.2 ESTIMACIÓN DE LA MEDIA DE LOS GASTOS MÁXIMOS ANUALES COMO FUNCIÓN DEL ÁREA Y DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	43
4.3 MODELOS CON AG RELACIONANDO VOLUMEN, TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y EL ESPESOR DE SUELO.....	50
4.4 OBTENCIÓN DE AJUSTE PARA EVENTOS DE DISEÑO CON ANÁLISIS REGIONAL	60
CAPÍTULO 5.- EJEMPLO DE OBTENCIÓN DE GASTOS DE DISEÑO.....	75
5.1 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN REGIONAL PARA LA MQMIA EN LA RH19	76
CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
CAPÍTULO 7.- BIBLIOGRAFÍA.....	88



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

En la República Mexicana existen alrededor de 1500 grandes cuencas hidrográficas, las cuales se agrupan en 37 Regiones Hidrológicas. La información climatológica que existe de ellas es mucho mayor que la hidrométrica, además de que la mayoría de las veces, esta última no cuenta con un periodo amplio de registro y en algunas zonas, es inexistente. Por ello, es importante desarrollar métodos que faciliten la estimación de valores de escurrimiento que se pueden presentar en estos sitios.

Los análisis regionales permiten hacer agrupaciones de sitios que tienen un comportamiento hidrológico estadísticamente similar (escurrimientos o precipitaciones), con lo que se puede construir registros amplios para poder obtener una función de distribución de probabilidades de toda la zona de estudio, con lo que se pueden deducir datos en aquellos sitios donde con no existe información o bien ésta es insuficiente.

La presente Tesis describe un método de Regionalización a nivel nacional en la República Mexicana para estimar datos de escurrimiento con distinto periodo de retorno en zonas donde la información registrada es escasa.

Se realizaron 3 modelos en donde se relacionan características fisiográficas de las cuencas analizadas, como el área, tiempo de concentración y espesor de suelo, para obtener las medias de los gastos máximos anuales instantáneos con ayuda de la Programación Genética, además se compararon estos 3 modelos entre sí y con el Modelo de Pronóstico de Escurrimiento MPE (Domínguez, 2008) para determinar si los resultados obtenidos son confiables.



1.2. DESCRIPCION DE LOS CAPÍTULOS DE LA TESIS

En el Capítulo 2, se presenta una revisión bibliográfica sobre los métodos de Regionalización que se han empleado en distintas partes del mundo así como los resultados que se han obtenido y la comparación entre distintos modelos existentes.

También se detalla el planteamiento del problema y se describe la importancia de contar con un modelo confiable para poder estimar datos de escurrimiento en sitios donde no se tenga información suficiente o bien ésta no exista.

En el Capítulo 3 se describen los principales conceptos que se manejan en hidrología y estadística concernientes a la metodología que se utilizó.

En el Capítulo 4 se describe la metodología que se llevó a cabo para realizar la Regionalización de la República Mexicana, así como las principales características que se tomaron para desarrollar los 3 modelos propuestos y el empleo de la programación genética para su obtención, así como la comparación estadística entre ellos para determinar cuál es el mejor.

En el Capítulo 5 se presenta en ejemplo de la obtención de datos de escurrimiento para distintos periodos de retorno de una zona en particular utilizando los tres métodos propuestos además de compararlos con los datos obtenidos con el método de pronóstico de escurrimiento (MPE) utilizando datos reales.

En el Capítulo 6 se presentan los principales resultados y conclusiones que se obtuvieron de este estudio y finalmente en el Capítulo 7 se presenta la Bibliografía consultada durante el mismo.



CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE EL TEMA DE LA TESIS

La estimación de valores del escurrimiento, tanto instantáneo como medio diario, con fines de estudios hidrológicos es un importante problema por resolver. El análisis regional permite hacer agrupaciones de sitios con comportamiento hidrológico estadísticamente similar (escurrimientos, precipitaciones), con lo que se logra la construcción de registros lo más grandes posibles para obtener una función de distribución de probabilidades de toda la zona considerada (Domínguez et al. 2012). Por otra parte, al relacionar estos resultados con las características fisiográficas y de precipitación de las cuencas, es posible deducir datos en sitios con escasa o nula información a partir de los obtenidos en los sitios aforados. (Domínguez et al., 2013). Sin embargo, la delimitación de regiones hidrológicamente homogéneas puede considerarse como un problema más complejo para la clasificación de un conjunto de datos (Hall y Minns, 1999), por lo que el empleo de herramientas informáticas cada vez es mayor para abordar esta problemática.

En distintos países se han llevado a cabo estudios de regionalización basados en diversas técnicas para agrupar cuencas, tomando en cuenta datos medidos, así como características fisiográficas.

Ahmad et al (2013) realizan una regionalización en la Península de Malasia basándose en la cantidad de precipitación registrada en 59 estaciones pluviométricas en un periodo de 36 años y realizan un agrupamiento jerárquico para encontrar grupos homogéneos de lluvias basándose en diferentes medidas de similitud y medios de vinculación, por otra parte Moreno y Roldán (1999) proponen una regionalización en el Valle de Guadalquivir, España, que por la



forma característica en que abre hacia el Océano Atlántico, la variable geográfica que se toma en cuenta es la distancia al mar de cada estación meteorológica en vez de la distancia entre cada una de ellas y la obtención de los parámetros estocásticos fue mediante cadenas de Markov mezclada con un modelo exponencial, los resultados obtenidos con el modelo se compararon con simulaciones sintéticas de precipitación y se pudo observar que el modelo es bastante preciso.

Es importante mencionar que en los últimos años el uso de Software de computación para modelar procesos hidrológicos complicados se hace cada vez mayor, ya que se pueden simular procesos de la vida real sin conocimientos previos de la relación exacta entre sus componentes, tal es el caso de Chavoshi et al. (2013), quien propone una regionalización basada en conceptos de computación flexible en la franja sur de la cuenca del Mar Caspio, el norte de Irán, que ha sido afectada por severas inundaciones, para ello emplean registros de 61 estaciones hidrométricas y 32 estaciones meteorológicas con 44 años de registro en el área de estudio. Para determinar la homogeneidad de cuencas de captación mediante características físicas, climáticas, estacionalidad de inundaciones y la ubicación geográfica, se utiliza un enfoque de sistema experto difuso (FES, Fuzzy Expert System), y con el uso de Algoritmos Genéticos (GA) se ajustaron los parámetros del FES para optimizar el sistema, este procedimiento se comparó con los métodos tradicionales de regionalización hidrológica en la zona y dio los mejores resultados.

Malekinezhad et al (2011) desarrollan una regionalización en Irán para poder estimar datos de escurrimiento en regiones áridas y semi-áridas donde la información registrada es escasa, ya que a pesar de que la precipitación anual es baja, a menudo ocurren grandes inundaciones, para ello se determinaron regiones homogéneas analizando grupos y regiones de influencia y caracterizando atributos



o características de la cuenca en relación con las inundaciones, posteriormente se realizaron pruebas de homogeneidad con H-statistic, un método de análisis basado en L-momentos, con lo que se demostró que una subdivisión de cuencas en grupos homogéneos es necesaria para obtener mejores resultados. Ghumman et al. (2011) describen una regionalización de parámetros hidrológicos con el modelo Nash en una zona semiárida que drena al río Indo, en Pakistán, para ello se utilizaron 57 eventos de lluvia para la regionalización de los parámetros y 55 eventos se utilizaron para validar los resultados, además de que para la optimización de los parámetros se utilizó el método Downhill Simplex. Los resultados indican que el modelo Nash puede simular un hidrograma de escurrimiento directo utilizando parámetros hidrológicos regionales con una eficiencia del 67%.

Otros estudios se enfocan en la comparación de distintas técnicas de regionalización, tal es el caso de Razavi y Coulibaly (2013), quienes realizan una investigación de los métodos desarrollados y su evolución, los principales resultados que obtuvieron indican que los atributos físicos de captación y la variabilidad climática produce diferentes resultados para cada método de regionalización. Sin embargo, en general, la proximidad espacial y la similitud física han demostrado un rendimiento satisfactorio en las zonas áridas de clima cálido templado (por ejemplo, Australia) y los métodos basados en regresión se han preferido en las regiones templadas cálidas (por ejemplo, la mayor parte de países de Europa). Del mismo modo, en las regiones frías y nevadas (por ejemplo, Canadá) la proximidad espacial y enfoques de similitud física parecen ser buenas opciones entre los métodos que dependen del modelo hidrológico.



Abreu et al. (2008) realizan la comparación de los dos métodos de regionalización más utilizados en Brasil, estos son el uso de curvas tradicionales y de curvas adimensionales, tomando como zona de estudio la cuenca del Río Grande, se utilizaron variables dependientes como el gasto bajo o medio de 7 días en 10 años y el gasto máximo o pico presentado en 100 años, mientras que las variables independientes son características fisiográficas como el área de drenaje, la lluvia anual total y la equivalente.

La comparación se realizó mediante un análisis estadístico y un análisis físico y se determinó que el método tradicional presenta un rendimiento un poco mayor que el empleo de curvas adimensionales para el caso del gasto bajo mientras que para el gasto máximo de 100 años los dos modelos presentan un rendimiento similar.

Heuvelmans et al. (2006) realizan una comparación entre los modelos de regionalización tradicionales basados en la regresión lineal con modelos que son independientes de la distribución de estructuras de modelos no lineales y que son por lo tanto herramientas potencialmente útiles para la regionalización de los parámetros del modelo como es el caso de las redes neuronales artificiales (ANNs por sus siglas en inglés), estas últimas estiman de manera más exacta los parámetros de los modelos que las ecuaciones de regresión lineal.

Trabajos como el de Domínguez (1983), quien propuso modificaciones a las ecuaciones de estimación del gasto a partir de características fisiográficas del Flood Studies Report (1975), este documento fue valorado por Hosking et al. (1985); por otra parte Gottschalk (1985) y Nathan y McMahon (1990), realizaron una identificación de cuencas regionalmente homogéneas en Suecia y Australia, respectivamente a partir del análisis de escurrimiento usando análisis de componentes principales y regresiones no lineales múltiples; otros modelos de



regionalización basados en técnicas estadísticas y relaciones de tipo no lineales potenciales, análisis multivariado y manejos de sistemas de información geográfica, así como validación de metodologías de regionalización son los de Domínguez (1981), Carrizosa (1997), Allasia y Avruch (2000), Erazo (2004), Cabrera et al. (2004), Azevedo et al. (2008), Zamanillo (2008), Isik y Singh (2008), Ganancias (2010), Olgún et al. (2011), Luna y Domínguez (2013) y Byzedi et al. (2014).

2.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

De acuerdo con los trabajos realizados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el INEGI y el Instituto Nacional de Ecología (INE), se han identificado 1,471 cuencas hidrográficas en el país, las cuales se han agrupado en 37 Regiones hidrológicas (Figura 1) para fines de publicación de la disponibilidad de aguas superficiales.

Asimismo se cuenta con estaciones climatológicas e hidrométricas, sin embargo la información climatológica es considerablemente mayor que la hidrométrica ya que al 2012 se contaban 3817 estaciones climatológicas oficiales operadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), mientras que las estaciones hidrológicas existentes son alrededor de 2200 de las cuales solo 309 tienen 20 o más años de registro y corresponden a cuencas cuyo funcionamiento no está alterado con obras hidráulicas.

Es por esto que el desarrollo de modelos regionales para obtener estimaciones de gastos o caudales para distintos periodos de retorno en zonas de la República Mexicana donde no hay información disponible, o bien ésta es insuficiente.

La presente Tesis describe tres modelos de regionalización para estimar estos gastos en función de sus características fisiográficas fácilmente medibles como el área, el tiempo de concentración y el espesor del suelo, además de datos de precipitación. También se plantea el uso de un Algoritmo Genético en Matlab, para poder obtener los parámetros de 2 de los modelos que relacionan diferentes variables con base en la minimización del error medio cuadrático entre los valores medidos de la media de los máximos instantáneos y los calculados con el modelo de la ecuación. Este Algoritmo se alimentó con los datos estadísticos que se analizaron de los registros de las estaciones hidrométricas.

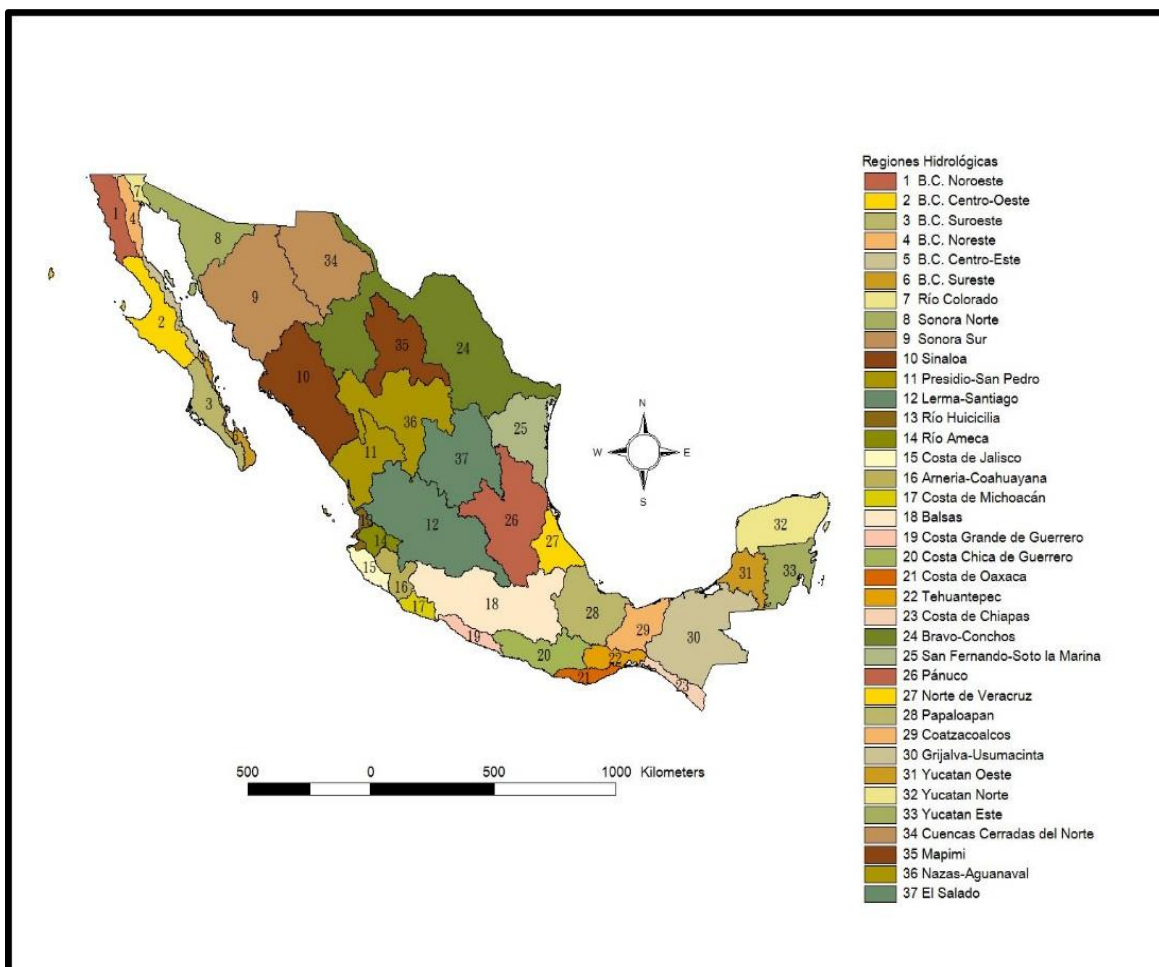


Figura 1.- Regiones hidrológicas de la República Mexicana



CAPÍTULO 3. CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA E HIDROLOGÍA

3.1. LA ESTADÍSTICA

La estadística es una colección de métodos para planificar y realizar experimentos, obtener datos y luego analizar, interpretar, y formular una conclusión basada en esos datos. Es la ciencia encargada de recopilar, organizar, analizar e interpretar información numérica o cualitativa, de manera que pueda llevar a conclusiones válidas. Esta ciencia tiene dos subdivisiones: la estadística descriptiva y la estadística inferencial.

La estadística descriptiva es la ciencia que recopila, organiza e interpreta la información numérica o cualitativa. Los periódicos, revistas, radio y televisión usan la estadística descriptiva para informar y persuadirnos acerca de ciertas acciones a tomar y en la formación de opiniones.

La estadística inferencial es la ciencia que interpreta información de manera que pueda llevar a conclusiones válidas. Los gobiernos y las organizaciones utilizan la estadística para tomar decisiones que afectan directamente nuestras vidas.

3.1.1 Medidas de tendencia central

Este tipo de medidas permiten identificar y ubicar el punto (valor) alrededor del cual se tienden a reunir los datos ("Punto central"). Estas medidas aplicadas a las características de las unidades de una muestra se les denomina estimadores o estadígrafos; mientras que aplicadas a poblaciones se les denomina parámetros o valores estadísticos de la población. Los principales métodos utilizados para ubicar el punto central son la media, la mediana y la moda.

3.1.2 Media

La media (aritmética) generalmente es la más importante de todas las medidas numéricas utilizadas para describir datos; constituye lo que la mayoría de la gente denomina *promedio*.

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{x_1+x_2+x_3+\dots+x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

Donde:

μ representa la media

n representa el tamaño de la población

x_i representa cada uno de los valores de la población.

Ya que en la mayoría de los casos se trabajan con muestras de la población todas las ecuaciones que se presenten a continuación serán representativas para las muestras.

3.1.3 Mediana

Con esta medida se identifica al valor que se encuentra en el centro de los datos: es decir, permite conocer el valor que se encuentra exactamente en la mitad del conjunto de datos después que las observaciones se han ubicado en serie ordenada. Esta medida indica que la mitad de los datos se encuentran por debajo de este valor y la otra mitad por encima del mismo. Para determinar la posición de la mediana se utiliza la ecuación:

$$\text{Posición de la mediana} = \frac{n+1}{2} \quad (3)$$



En otras palabras la mediana indica el valor que separa los datos en dos fracciones iguales con el cincuenta por ciento de los datos cada una. Para las muestras que cuentan con un número impar de observaciones o datos, la mediana dará como resultado una de las posiciones de la serie ordenada; mientras que para las muestras con un número par de observaciones se debe promediar los valores de las dos posiciones centrales.

3.1.4 Moda

En Estadística, la moda es el valor que cuenta con una mayor frecuencia en una distribución de datos. Se tendrá una distribución bimodal de los datos, cuando se encuentran dos modas, es decir, dos datos que tengan la misma frecuencia absoluta máxima. Una distribución trimodal de los datos es en la que se encuentran tres modas. Si todas las variables tienen la misma frecuencia diremos que no hay moda. El intervalo modal es el de mayor frecuencia absoluta. Cuando se cuenta con datos agrupados antes de definir la moda, se ha de definir el intervalo modal. La moda, cuando los datos están agrupados, es un punto que divide al intervalo modal en dos partes de la forma p y $c-p$, siendo c la amplitud del intervalo, que verifiquen que: Siendo la frecuencia absoluta del intervalo modal las frecuencias absolutas de los intervalos anterior y posterior, respectivamente, al intervalo modal.

3.1.5 Varianza

La varianza de un conjunto de valores es la medida de variación igual al cuadrado de la desviación estándar, se pueden definir dos tipos:

Varianza muestral: cuadrado de la desviación estándar s

Varianza poblacional: cuadrado de la desviación estándar poblacional σ

Se dice que la varianza muestra s^2 es un estimador sin sesgo de la varianza poblacional σ^2 , lo que significa que los valores de s^2 tienden a igualar el valor de σ^2 , en lugar de hacerlo de manera sistemática, a sobreestimar o subestimar σ^2 .

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

3.1.6 Desviación estándar

La desviación estándar o desviación típica (S_x) es una medida de centralización o dispersión para variables de razón y de intervalo, de gran utilidad en la estadística descriptiva. Se define como la raíz cuadrada de la varianza. Junto con este valor, la desviación típica es una medida (cuadrática) que informa de las distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable. Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que se requiere conocer también la desviación que representan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones

$$S_x = \sqrt{S_x^2} \quad (5)$$

Donde:

S_x es la desviación estándar de la muestra



3.1.7 Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación (R^2) o coeficiente de correlación múltiple al cuadrado, es una medida descriptiva que sirve para evaluar la bondad de ajuste del modelo a los datos, ya que mide la capacidad predictiva del modelo ajustado. Se define como el cociente entre la variabilidad explicada por la regresión y la variabilidad total, esto es:

$$R^2 = \frac{\text{varianza explicada}}{\text{varianza total}} = 1 - \frac{\text{varianza no explicada}}{\text{varianza total}} \quad (6)$$

En estadística, el coeficiente de determinación, denominado R^2 y pronunciado R cuadrado, es usado en el contexto de un modelo estadístico cuyo principal propósito es predecir futuros resultados o probar una hipótesis. Con este coeficiente se tiene una estimación cuantitativa de la calidad del ajuste de los datos a dicho modelo.

Hay varias definiciones diferentes para R^2 que son algunas veces equivalentes. Las más comunes se refieren a la regresión lineal. En este caso, el R^2 corresponde al cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson, lo cual es sólo cierto para la regresión lineal simple.

$$R^2 = \frac{\sigma_{XY}^2}{\sigma_X^2 \sigma_Y^2} \quad (7)$$

Donde:

σ_{XY} es la covarianza de (X, Y)

σ_X es la desviación típica de la variable X

σ_Y es la desviación típica de la variable Y



3.1.8 Coeficiente de variación

En estadística, cuando se desea hacer referencia a la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable, se utiliza el coeficiente de variación.

Su fórmula expresa la desviación estándar como porcentaje de la media aritmética, mostrando una mejor interpretación porcentual del grado de variabilidad que la desviación típica o estándar. Por otro lado presenta problemas ya que a diferencia de la desviación típica este coeficiente es variable ante cambios de origen. Por ello es importante que todos los valores sean positivos y su media sea, por tanto, un valor positivo. A mayor valor del coeficiente de variación mayor heterogeneidad de los valores de la variable; y a menor C.V., mayor homogeneidad en los valores de la variable. Suele representarse por medio de las siglas **C.V.**

El coeficiente de variación permite comparar la dispersión entre dos poblaciones distintas e incluso, comparar la variación producto de dos variables diferentes (que pueden provenir de una misma población).

El coeficiente de variación, no tiene unidades, por lo que se afirma que es adimensional. Este coeficiente tiene en cuenta la proporción existente entre la media y la desviación típica o estándar.

$$CV = \frac{S_x}{\bar{x}} \quad (8)$$



3.1.9 Funciones continuas de probabilidad

Cuando un número n de valores que puede tomar una variable aleatoria X es infinito, como en el caso de los volúmenes de escurrimiento de un río, se dice que dicha variable aleatoria es continua y es posible deducir la forma de la función, la cual se llama Función de densidad de Probabilidad

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (9)$$

3.1.10 Periodo de retorno

Cada espacio muestral tiene su propia función de distribución de probabilidad. Cuando de ese espacio se extrae un grupo de datos (muestra) al azar, se espera que su función de distribución de probabilidad sea similar a la del espacio completo, en particular si la muestra es grande, además de que la frecuencia de cada dato sea igual a la observada.

Existe una probabilidad no nula de que se presente un evento menor o igual que un valor cualquiera que se encuentre dentro del rango de datos extraídos, no importando que tan pequeño o grande sea dicho valor, es por eso que surge la necesidad de usar una fórmula que asigne una probabilidad distinta de cero a cualquier evento.

Una forma de hacerlo es suponiendo que la frecuencia observada de un evento es la misma que la población de frecuencias de ese evento, como lo muestra la siguiente ecuación (Aparicio 1992).

$$P(X \leq x) = 1 - \frac{m}{n+1} \quad (10)$$



Donde:

P es la probabilidad

m es el número de orden

n el número total de datos.

Sin embargo, en Hidrología normalmente se prefiere trabajar con periodos de retorno en lugar de probabilidades, ya que el concepto resulta más claro por tener las mismas unidades (tiempo) que la vida útil de las obras y puede compararse con estas; el periodo de retorno se puede calcular como

$$T = \frac{n+1}{m} \quad (11)$$

Donde:

T es el periodo de retorno

n es el número total de datos registrados

m es el m -ésimo evento de los n registrados ordenados de mayor a menor.

Por ejemplo, el máximo evento registrado en un conjunto de 10 tiene un periodo de retorno de 11 años y el mínimo lo tiene de 1.1 años.

El periodo de retorno se define como el tiempo promedio en años en que un evento puede ser igualado o excedido; es el inverso de la probabilidad de excedencia del evento x y por lo tanto:

$$Tr = \frac{1}{1-F(x)} \quad (12)$$



Donde :

T_r periodo de retorno en años

$F(x)$ probabilidad de no excedencia de la variable aleatoria x .

3.1.11 Funciones de distribución de probabilidad comúnmente usadas en Hidrología

Una vez asignado el periodo de retorno al gasto de diseño de alguna obra, es necesario conocer dicho gasto de diseño, hacer extrapolaciones a partir de gastos máximos anuales registrados ya que rara vez este periodo es menor al periodo de datos.

En la estadística existen tantas funciones de distribución como se deseen, pero no es posible aplicarlas en un problema particular, por lo que es necesario seleccionar aquellas que mejor se adapten al problema que se esté analizando.

Algunas de las funciones de distribución de probabilidad que se usan en Hidrología son las siguientes

a) Normal

b) Lognormal

d) Gumbel

f) Pearson III

e) Funciones para dos poblaciones

Las funciones Normal y Lognormal son generalmente apropiadas para las variables aleatorias que cubren todo el rango de valores de resultados posibles del

experimento bajo análisis, por ejemplo, en el análisis de los volúmenes de escurrimiento de un río.

Las funciones Gumbel se desarrollan para el análisis de los valores extremos de dichos resultados, como los gastos máximos o mínimos anuales. La función Pearson III ocupa el lugar intermedio.

3.1.12 Distribución Normal

La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (13)$$

Donde:

μ y σ son los parámetros de la distribución, estos parámetros determinan la forma de la función $f(x)$ y su posición en el eje x , también ha sido comprobado que μ y σ son la media y la desviación estándar de la población.

La función de distribución de probabilidad normal se define como:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (14)$$

Sin embargo, no se conoce analíticamente la integral de la ecuación 14, por lo que es necesario recurrir a métodos numéricos para evaluarla, para hacer esto se necesitaría una tabla para cada valor de μ y σ , por lo que se ha definido una variable *estandarizada*:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (15)$$

Que está distribuida con media cero y desviación estándar unitaria, así, la función de distribución de probabilidad se puede escribir como:

$$F(x) = F(z) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (16)$$

La Función $F(z)$ se ha calculado numéricamente y se han publicado tablas de ella.

3.1.13 Distribución Lognormal

En esta función los logaritmos naturales de la variable aleatoria se distribuyen normalmente. La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} \quad (17)$$

Donde:

α y β son los parámetros de la distribución, y se deduce que son respectivamente la media y la desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria, y la función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \alpha}{\beta}\right)^2} dx \quad (18)$$

Y la variable estandarizada se define como:

$$z = \frac{\ln x - \alpha}{\beta} \quad (19)$$

3.1.14 Distribución Gumbel

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

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (20)$$

La función de densidad de probabilidad es entonces:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (21)$$

Donde:

α y β son parámetros de la función, que a su vez se estiman como:

$$\alpha = \frac{1.2825}{S} \quad (22)$$

$$\beta = \bar{x} - 0.45 S \quad (23)$$

Para muestras muy grandes, y para muestras relativamente pequeñas:

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{S} \quad (24)$$

$$\beta = \bar{x} - \frac{\mu_y}{\alpha} \quad (25)$$

3.1.15 Funciones para dos poblaciones

En muchos lugares de México, sobre todo en las zonas costeras, los gastos máximos anuales pertenecen a dos poblaciones diferentes: la primera es la de los

gastos producidos por precipitaciones relacionadas con los fenómenos meteorológicos dominantes en la región de estudio, y la segunda es de los gastos producidos por precipitaciones ciclónicas, generalmente mayores que los primeros.

Generalmente se observa con cierta claridad un salto brusco en los valores de los gastos no ciclónicos a ciclónicos como lo muestra la Figura 2 donde se muestra una gráfica del Gasto contra el periodo de retorno.

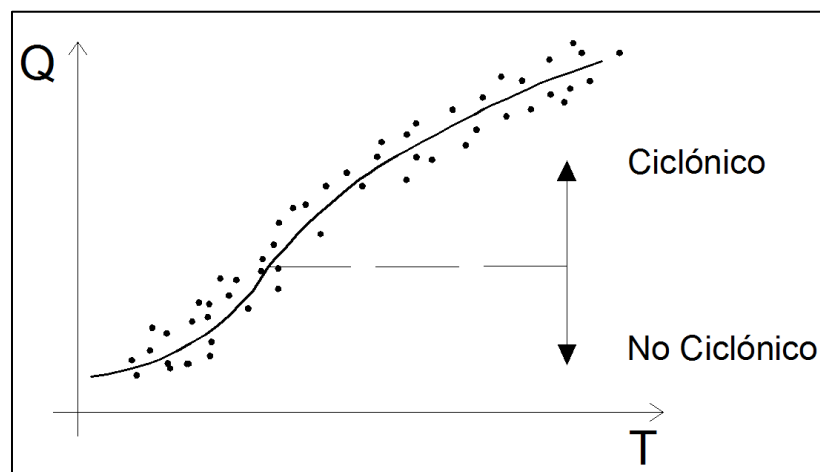


Figura 2.-Ejemplo gasto contra periodo de retorno para eventos ciclónicos y no ciclónicos

Se ha demostrado que en estos casos, la función de distribución de probabilidad se puede expresar como:

$$F(x) = F_1(x)[p + (1 - p)F_2(x)] \quad (26)$$

Donde:

$F_1(x)$ y $F_2(x)$ son las funciones de distribución de probabilidad de los gastos máximos anuales no producidos por tormentas ciclónicas y de los producidos por ellas respectivamente



p es la probabilidad de que en un año cualquiera el gasto máximo no sea producido por una tormenta ciclónica.

$$p = \frac{N_n}{N_t} \quad (27)$$

Donde:

N_n es el número de años de registro en que el gasto máximo no se produjo por una tormenta ciclónica

N_T es el número total de años de registro.

Es común aceptar que $F_1(x)$ y $F_2(x)$ son del tipo Gumbel, por lo que:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \left[p + (1-p)e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \right] \quad (28)$$

Donde:

α_1 y β_1 son los parámetros correspondientes a la población no ciclónica y α_2 y β_2 corresponden a la ciclónica.

Por lo anterior se puede decir que cuando una serie de máximos anuales tiene un comportamiento que claramente obedece a dos comportamientos de tipo lineal en una escala Gumbel, a partir de un cierto número de datos, dicha función puede ajustarse a través de la función doble Gumbel (o Gumbel de dos poblaciones) (González, 1970).

Al contar dicha función de distribución con cinco parámetros, la determinación de los mismos requiere de un algoritmo numérico de solución, ya sea determinístico o de tipo aleatorio y una opción que es la optimización.

3.1.16 Distribución Pearson III o Gamma de tres parámetros

Ésta función se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \left\{ \frac{x-\delta_1}{\alpha_1} \right\}^{\beta_1-1} e^{-\frac{x-\delta_1}{\alpha_1}} \quad (29)$$

Donde:

α_1 , β_1 y δ_1 son los parámetros de la función, y $\Gamma(\beta_1)$ es la función Gamma.

La función de distribución de probabilidad es:

$$F(y) = \frac{1}{\Gamma(\beta_1)} \int_0^y y^{\beta-1} e^{-y} dy \quad (30)$$

Donde:

$$y = \frac{x-\delta_1}{\alpha_1} \quad (31)$$

3.1.17 Programa AX

El programa AX (Jiménez, 1996) se emplea principalmente para realizar el análisis estadístico de datos de funciones de distribución en México y se utiliza desde poco más de mediados de los años 1990, por distintas dependencias del Agua, así como de organismos encargados de protección civil y se ha validado en distintas regiones del país donde los datos tienen un comportamiento de tipo doble Gumbel. Este programa resuelve el problema de la determinación de los parámetros de la función Doble Gumbel con un algoritmo de optimización determinístico.



3.1.18 Algoritmos Genéticos (AGs)

Los AG son métodos adaptativos, técnicas de optimización que se desarrollan como parte de los algoritmos de inteligencia artificial que están basados en analogías con el funcionamiento de la teoría evolutiva de selección natural de Charles Darwin, la cual indica que dada una población de cromosomas, la selección de dos de ellos (padre y madre) produce individuos nuevos, los cuales pueden ser el resultado de aplicar los operadores de cruce o mutación; se procura conservar a aquellos cromosomas con las mejores características de los que surgieron, para ello se plantea una función objetivo que indica la calidad del cromosoma (concepto de la ley del más fuerte o selección natural). A estos nuevos individuos se les sigue aplicando los operadores, hasta que se considera que los cromosomas obtenidos cumplen con la función objetivo, para ello se utilizan procesos aleatorios (Arganis, 2004).

Los resultados obtenidos con este proceso pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización, fueron desarrollados durante los años 60 y 70 y son atribuidos a John Holland. La diferencia con las estrategias evolutivas y la programación evolutiva vigentes es que la meta original de Holland no era la de desarrollar algoritmos para resolver problemas específicos, sino estudiar formalmente el fenómeno de adaptación, tal como ocurre en la naturaleza, y desarrollar los medios para que los mecanismos de adaptación natural pudieran ser utilizados en sistemas computacionales.

En Holland (1975) se presenta a los AG como una abstracción de la evolución biológica y se da el marco teórico para su fundamentación. El AG que se desarrolla es un método para moverse de una población de cromosomas (cadenas de caracteres de unos y ceros, hacia una nueva población utilizando un tipo de



selección natural junto con operadores inspirados genéticamente) de cruza, mutación e inversión. Cada cromosoma está formado por genes, a cada gen le corresponde una instancia en particular (alelo, cero o uno). El operador de selección escoge aquellos cromosomas de la población que son aptos para reproducirse y en promedio, los más aptos producen más descendientes que los menos aptos. La cruza intercambia subpartes de dos cromosomas, imitando la recombinación biológica entre dos organismos de origen haploide, es decir, de un solo cromosoma; la mutación cambia aleatoriamente los valores de los alelos de algunas localidades del cromosoma, en la Tabla 1 se presentan algunos términos biológicos y su analogía con un sistema artificial.

Tabla 1.- Términos biológicos y su analogía con el sistema artificial

Naturaleza	Sistema artificial
Cromosoma	Cadena de caracteres
Gen	Característica, carácter
Alelo	Valor de la característica
Locus	Posición de la cadena
Genotipo	Estructura
Fenotipo	Conjunto de parámetros, solución alternativa, estructura decodificada

3.1.19 Algoritmo Genético Simple (AGS)

Este algoritmo también recibe el nombre de Algoritmo Canónico, en la Figura_ se representa el diagrama general del mismo. Para este algoritmo se necesita una codificación o representación del problema, que resulte adecuada al mismo. Además se requiere de una función de evaluación de aptitud o adaptación al problema, la cual asigna un número real a cada posible solución codificada. Durante la ejecución del algoritmo, los padres deben ser seleccionados para la reproducción; a continuación, dichos padres seleccionados se cruzarán generando

dos hijos, sobre cada uno de los cuales actuará un operador de mutación. El resultado de la combinación de las anteriores funciones será un conjunto de individuos (posibles soluciones), los cuales en la evolución del AG formarán parte de la siguiente población.

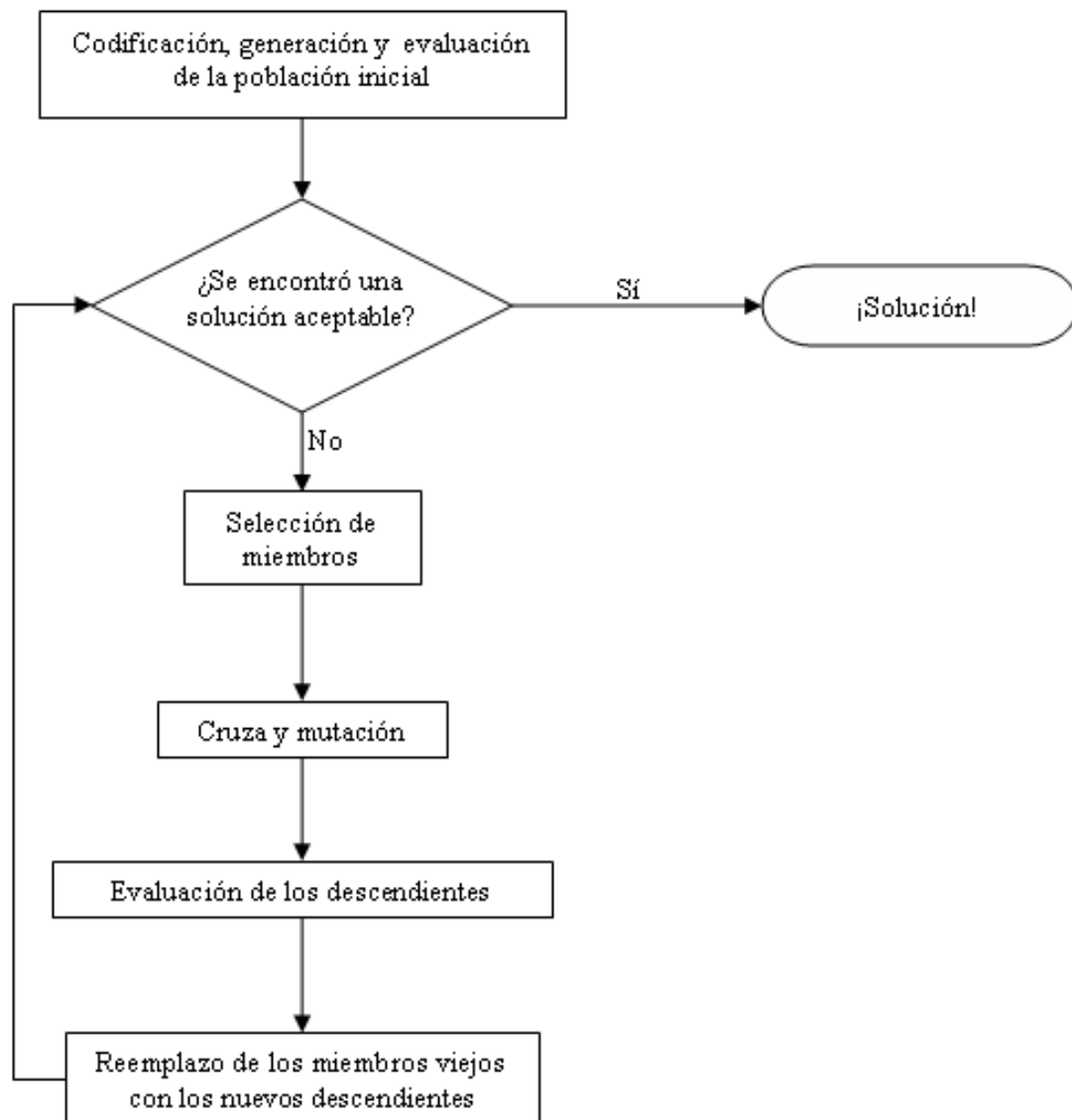


Figura 3.- Diagrama del Algoritmo Genético Simple o Canónico



3.1.19.1 Codificación

Se supone que los individuos (posibles soluciones al problema), pueden representarse como un conjunto de parámetros, que denominaremos genes, los cuales agrupados forman un cadena de caracteres (denominada cromosoma). Si bien, el alfabeto utilizado para representar a los individuos no debe estar necesariamente constituido por $\{0,1\}$, buena parte de la teoría en la que se fundamentan los AG utiliza dicho alfabeto. En términos biológicos, el conjunto de parámetros representando un cromosoma particular se denomina fenotipo. El fenotipo contiene la información requerida para construir un organismo, el cual se refiere como genotipo.

Los mismos términos se utilizan en el campo de los AG. La aptitud se infiere a través del fenotipo usando la función de evaluación. La función de aptitud o evaluación debe ser diseñada para cada problema de manera específica. Dado un cromosoma particular, la función de aptitud le asigna un número real, que se supone, indica el nivel de adaptación al problema del individuo representado por el cromosoma.

Durante la fase reproductiva se seleccionan los individuos de la población para cruzarse y generar descendientes, que constituirán, una vez mutados, la siguiente generación de individuos. La selección de padres se efectúa al azar usando un procedimiento que favorezca a los individuos más aptos, ya que a cada individuo se le asigna una probabilidad de ser seleccionado que es proporcional a su función de aptitud. Se dice que este procedimiento está basado en la ruleta sesgada. Según dicho esquema, los mejor adaptados se escogerán probablemente varias veces por generación, mientras que, los pobremente adaptados, no se escogerán más que de vez en cuando o nunca.

Una vez seleccionadas dos partes, sus cromosomas se combinan, utilizando habitualmente los operadores de cruce y mutación.

3.1.19.2 Operador de cruce

Se toman los dos padres seleccionados y se cortan las cadenas de caracteres en una posición escogida al azar, para así producir dos subcadenas iniciales y dos subcadenas finales. Después se intercambian las subcadenas finales, produciéndose dos nuevos cromosomas completos; de esta manera, ambos descendientes heredan genes de cada uno de los padres. Este operador se conoce como operador de cruce basado en un punto (Figura 4). Habitualmente, el operador de cruce no se aplica a todos los pares de individuos seleccionados para reproducirse, sino que se emplea de manera aleatoria, normalmente con una probabilidad comprendida entre 0.6 y 1.0. En el caso en que el operador de cruce no se aplique, la descendencia se obtiene simplemente duplicando los padres.

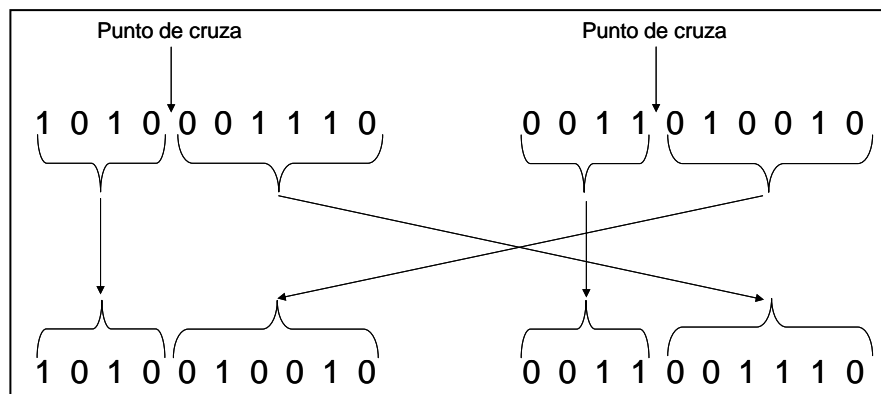


Figura 4.- Operador de cruce en un solo punto

3.1.19.3 Operador de mutación

El operador de mutación se aplica a cada hijo de manera individual, y consiste en la alteración aleatoria (normalmente con probabilidad pequeña) de cada gen componente del cromosoma (Figura 5). Si bien en principio puede pensarse que el

operador de cruza es más importante que el operador de mutación, ya que proporciona una exploración rápida del espacio de búsqueda, éste último asegura que ningún punto del espacio de búsqueda tenga probabilidad cero de ser examinado, y es de capital importancia para asegurar la convergencia de los AG.

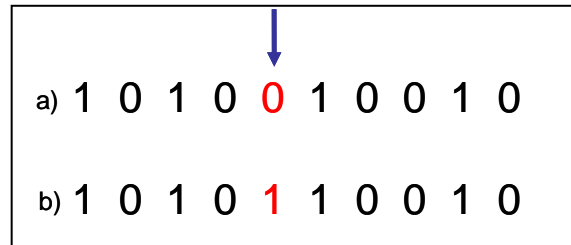


Figura 5.- Operador de mutación, a) descendiente, b) descendiente mutado

Los pasos a seguir para la aplicación de un algoritmo genético básico son (Arganis, 2004):

- Inicializar un conjunto de cromosomas, conjunto C
- Decodificar los cromosomas en individuos: $I=d(C)$
- Evaluar el desempeño de los individuos, $D=f(I)$ (función objetivo)
- Suprimir los individuos de peor desempeño: $C=C-P$
- Crear nuevos cromosomas combinando los cromosomas restantes, mediante cruza o recombinación: $N=\text{recombinación}(C)$ y mutación: $N=\text{mutación}(N)$
- Actualizar el conjunto de cromosomas $C=C+N$
- Regresar al paso 3 o bien terminar el proceso según el desempeño deseado de los nuevos individuos



3.2 LA HIDROLOGÍA

Para Aparicio (1992) la hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades físicas y químicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos.

La rama de la hidrología que se estudia en ingeniería es comúnmente llamada hidrología aplicada o ingeniería hidrológica, que contempla el diseño y operación de proyectos de ingeniería para el control aprovechamiento del agua.

3.2.1 Área drenada

Se puede definir como la zona de la superficie terrestre en donde el agua precipitada es conducida por un sistema de corrientes generalmente hacia un mismo punto de salida (cuenca hidrológica Aparicio 1992). El valor del área drenada se obtiene de la descripción de estaciones hidrométricas del BANDAS de la CONAGUA por ser la fuente oficial de la nación. En los casos en que no se cuenta con la información, el área drenada (Figura 6) se calcula a partir de una herramienta digital del tipo Arcmap o Arcview, ubicando a la estación hidrométrica con sus coordenadas geográficas y utilizando la extensión GeoHMS. En este estudio se calcularon las áreas drenadas de todas las estaciones consideradas y el resultado se verificó con el que proporciona el BANDAS.

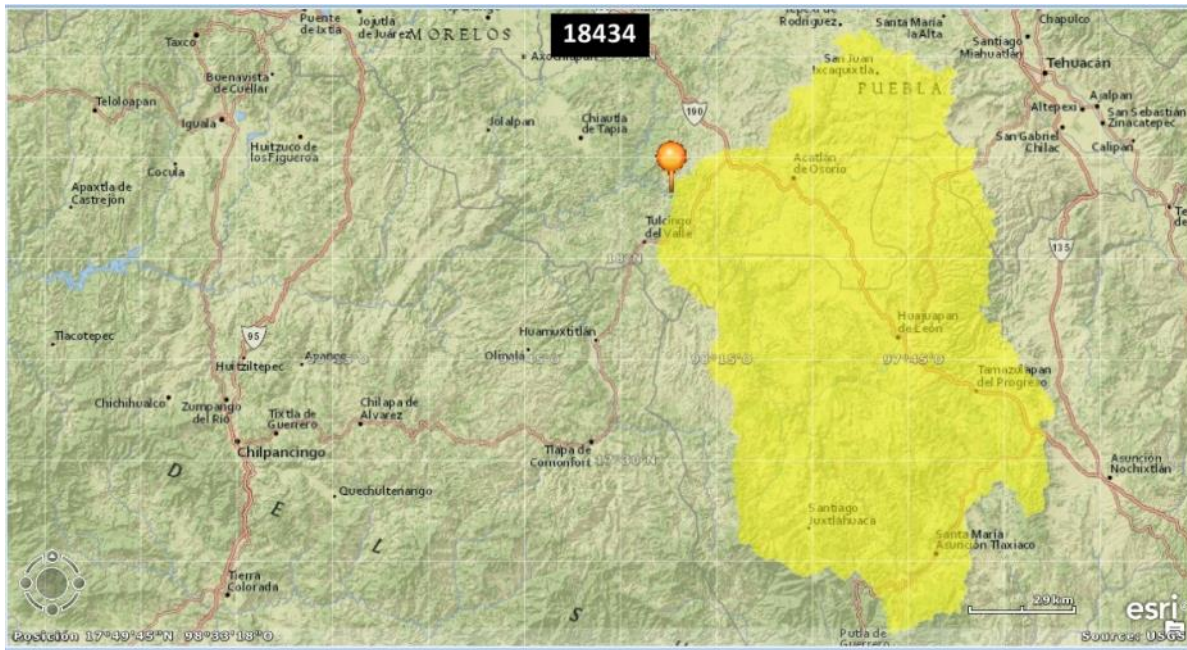


Figura 6.- Área drenada (Ejemplo de la estación hidrométrica 18434)

3.2.2 Tiempo de concentración

El tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio se denomina tiempo de concentración. El tiempo de concentración (t_c) se determina con la longitud (L) y pendiente del cauce principal (S) con la ecuación experimental de Kirpich (Aparicio, 1992):

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (32)$$

Donde:

t_c en h

L en m

S en decimales, determinada con el método de la pendiente media

3.2.3 Precipitación media h_p

Debido a que la altura de lluvia que se registra en un sitio dado es diferente a la registrada en los alrededores, aunque estos sean sitios cercanos, es necesario conocer la lluvia media en una zona dada para fines de cálculo.

En este caso se identifican las estaciones climatológicas ubicadas dentro o cerca de la cuenca asociada a cada estación hidrométrica analizada; para cada estación climatológica se calcula la media de las precipitaciones diarias máximas anuales y se obtiene su promedio espacial.

3.2.4 Número de escurrimiento N y espesor del suelo S

El método de los números de escurrimiento es un método que permite estimar la altura de lluvia efectiva a partir de la lluvia total y las características de la cuenca mediante curvas. El número N se determina con el tipo y uso de suelo a partir de la ecuación del U.S. Soil Conservation Service. Con este número de escurrimiento se obtiene el espesor de suelo S (infiltración potencial máxima) (Domínguez et al., 2008):

$$S = \frac{2540 - (25.4 \times N)}{N} \quad (33)$$

Donde:

N es el número de curva

S es la Infiltración potencial máxima, en cm.

De la ecuación (33) se observa que el número de curva N depende de un solo parámetro y de acuerdo con Paz et al. (2010) esta simplicidad lo hace atractivo para usar a N como un método hidrológico operacional.



CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

De las 1471 estaciones hidrométricas reportadas por la CONAGUA, se seleccionaron 309 que por un lado tuvieran un registro de más de 20 años de gastos máximos instantáneos, y por otro correspondieran a cuencas sin ningún almacenamiento importante, de tal manera que pudieran considerarse cuencas vírgenes (SRH, 1969). Una muestra de la información correspondiente se presenta en la Figura 7, y en Domínguez et al (2013) se muestra la información completa incluyendo: área drenada, longitud, pendiente del cauce principal, tiempo de concentración, número de curva promedio y coordenadas de la estación, además de la información generada durante el estudio. Las áreas de cuenca fueron recalculadas utilizando las facilidades del “Arcview©” y en algunos casos modificadas respecto al archivo de la CONAGUA; en otros casos (más frecuentes) se corrigieron las coordenadas de ubicación de la estación.



A partir de la base de datos Banco Nacional de Aguas Superficiales(BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se obtuvieron los datos de gastos instantáneos máximos anuales para las estaciones hidrométricas seleccionadas de las 37 regiones del país a partir de los archivos con nombre `conceptoregiónclavedeestación.dbf`; debido a que los máximos anuales consignados en el BANDAS sólo incluye los que corresponden a años con información todos los días, se recurrió a considerar también los archivos “DM” en los que se consignan máximos mensuales, de tal manera que cuando en estos archivos se tiene un valor relativamente grande (en comparación con los máximos de otros años) y se observó que se había medido en los meses de lluvias, el valor correspondiente se incluyó como máximo anual, en la Figura 8 se muestra un ejemplo de los valores de los gastos máximos instantáneos considerados finalmente.



De acuerdo con las características geográficas de las regiones hidrológicas, algunas de ellas se agruparon para analizar la relación entre las medias de los gastos máximos instantáneos y las áreas drenadas de las cuencas (Isik y Sing, 2008, Hall y Minns, 1999, Ahmad et al, 2013). Los grupos definidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.- Agrupación de regiones

Grupos	RH
1	1 y 3
2	7 y 8
3	9
4	10
5	11
6	12
7	13-16 y 19
8	18
9	20 y 21
10	22
11	23
12	24
13	25
14	26
15	27
16	28 y 29
17	30
18	36 y 37

Para cada grupo se hizo un resumen de los estadísticos asociados a los gastos máximos anuales de las estaciones hidrométricas, es decir se obtuvo la media, variancia, desviación estándar, coeficiente de variación, además del valor máximo y mínimo del registro de gastos máximos instantáneos, y se obtuvieron las áreas drenadas a partir de la información de la base de datos BANDAS de la página del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, de los boletines de la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos y del resumen de características fisiográficas de la cuenca obtenida con “Arcview©”. En la Tabla 3 se presenta el resumen de los datos estadísticos obtenidos en la Región Hidrológica 1 y 3.

Tabla 3.- Estadísticos Región Hidrológica 1 y 3

Estación	1023	01024	01025	01026	3001	3002	3003
máximo	421	897.273	546.894	199.84	96.4	0.436	1.552
media	51.909	131.975	71.451	23.057	58.102	0.199	0.411
máx/med	8.110	6.799	7.654	8.667	1.659	2.196	3.777
mínimo	34.000	0.315	1.792	0.287	6.200	0.001	0.005
varianza	7905.573	56067.646	17060.963	2186.889	1412.373	0.026	0.237
desvest	88.913	236.786	130.618	46.764	37.582	0.160	0.487
cv	1.713	1.794	1.828	2.028	0.647	0.806	1.185
Nombre	AGUA CALIENTE	SAN VICENTE	SANTO DOMINGO	SAN CARLOS	EL OJO DE AGUA	SAN JACINTO	PIEDRAS COLORADAS
Área, km ²	1577	1100	1230	685	1378	35	120

Adicionalmente se hicieron gráficas del área drenada con respecto a la media de los gastos máximos instantáneos, con dicha información se obtuvo una curva de ajuste que se utilizó para definir subgrupos de estaciones hidrométricas según el comportamiento de los valores de cada estación respecto a la curva de ajuste (Álvarez et al, 2011, Nathan y McMahon, 1990), esta subdivisión de grupos se realizó de la siguiente manera: en el grupo 1 se encuentran todas las estaciones que quedaron ubicadas arriba de la curva de ajuste, el grupo 2 son aquellas estaciones que se encuentren por debajo de la curva, y finalmente el grupo 3 lo conforman las estaciones que se encuentren sobre la curva de ajuste. En la Tabla 4 se presenta la relación entre áreas drenadas y la media registrada en las estaciones que comprenden la Región Hidrológica 1 y 3, la Figura 9 muestra la curva de ajuste obtenida para esta relación, y la Tabla 5 presenta la agrupación de las estaciones de acuerdo al comportamiento que presentan con la curva de ajuste.

Tabla 4. Relación entre área de la cuenca y la media, RH 1 y 3

Estación	Área [km^2]	Media
1023	1 577	51.91
1024	1 100	71.45
1025	1 230	131.98
1026	685	23.06
3001	1 378	58.10
3002	35	0.2
3003	120	0.41

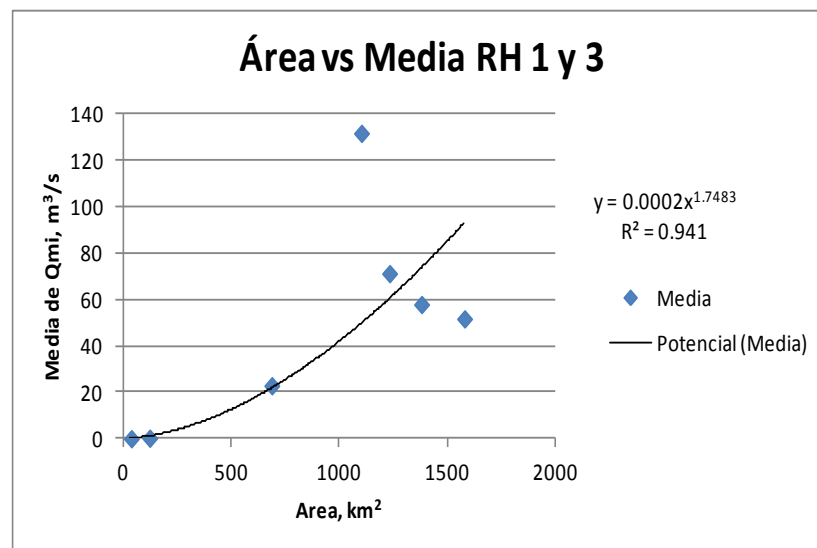


Figura 9.- Relación entre el área y la media de la RH 1 y 3

Tabla 5.- Agrupación de estaciones de acuerdo a la curva de ajuste

Estación	Nombre	Coef var	Área [km²]	Grupo
1023	AGUA CALIENTE	1.71	1 577	2
1024	SANTO DOMINGO	1.83	1 100	1
1025	SAN VICENTE	1.79	1 230	1
1026	SAN CARLOS	2.03	685	3
3001	EL OJO DE AGUA	0.65	1 378	2
3002	SAN JACINTO	0.81	35	3
3003	PIEDRAS COLORADAS	1.19	120	3

También es de utilidad para verificar la agrupación, analizar la ubicación espacial de las estaciones en esquemas topológicos como el de la Figura 10 a los que se les añade el coeficiente de variación para observar la homogeneidad de los grupos, este procedimiento se realizó para todos los grupos de estaciones, las estaciones del grupo 1 corresponden a los ríos principales, las del grupo 2 a los afluentes secundarios y las del grupo 3 a los afluentes terciarios.

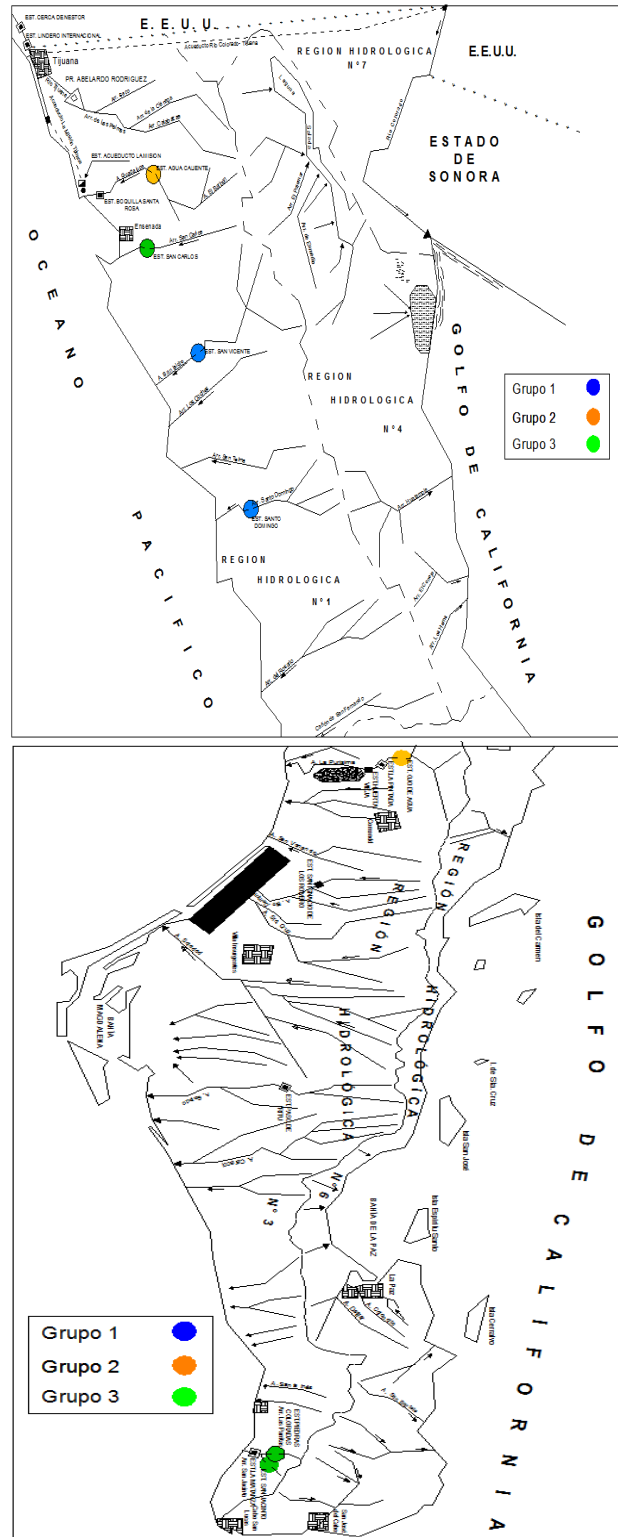


Figura 10.- Esquemas de localización de grupos de estaciones de RH 1 y 3



4.1 ESTIMACIÓN DE LA MEDIA DE LOS GASTOS MÁXIMOS ANUALES COMO FUNCIÓN DEL ÁREA

La ecuación de la curva de ajuste obtenida para cada región es el primer modelo para obtener la media de los gastos máximos y se expresa de la siguiente forma:

$$mediaQ_{instantáneo} = C1A^{C2} \quad (34)$$

Donde:

mediaQ_{instantáneo} es la media de los gastos máximos anuales instantáneos de cada estación hidrométrica de la región o grupo de regiones considerado, en m³/s

A es el área de su cuenca, en km².

De la Figura 9 se tiene que para el grupo de Regiones Hidrológicas 1 y 3 la ecuación de la curva de ajuste es:

$$y = 0.002x^{1.7535} \quad (35)$$

Por lo que la ecuación del primer modelo para este grupo resulta:

$$MediaQ_{inst} = 0.002 * A^{1.7535} \quad (36)$$

Las ecuaciones para cada región obtenidas con este método se muestran en la Tabla 6. Cabe mencionar que faltan algunas regiones debido a que éstas no cuentan con información suficiente para su análisis.

Tabla 6.- Ecuaciones de la media del gasto instantáneo en función del área

RH	Primer modelo
1 y 3	MediaQinst=0.0002*A ^{1.7535}
7 y 8	MediaQinst=142.39*A ^{0.0054}
9	MediaQinst=11.66*A ^{0.4349}
10	MediaQinst=20.745*A ^{0.4412}
11	MediaQinst=5.6048*A ^{0.5886}
12	MediaQinst=0.1459*A ^{0.8966}
13 a 16	MediaQinst=1.3419*A ^{0.7677}
19	MediaQinst=2.0168*A ^{0.8458}
18	MediaQinst=26.475*A ^{0.3794}
20 y 21	MediaQinst=11.974*A ^{0.4763}
22	MediaQinst=27.621*A ^{0.3628}
23	MediaQinst=6.442*A ^{0.6202}
24	MediaQinst=0.256*A ^{0.8301}
25	MediaQinst=115.98*A ^{0.1343}
26 Pánuco	MediaQinst=33.527*A ^{0.3752}
26 Valle de México	MediaQinst=5.1785*A ^{0.3734}
27	MediaQinst=1.6791*A ^{0.7634}
28 y 29	MediaQinst=69.115*A ^{0.3194}
30	MediaQinst=40.932*A ^{0.3921}
36 y 37	MediaQinst=18.941*A ^{0.326}

4.2 ESTIMACIÓN DE LA MEDIA DE LOS GASTOS MÁXIMOS ANUALES COMO FUNCIÓN DEL ÁREA Y DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Se buscó un modelo que de la misma forma que el anterior relacionara además del área, el tiempo de concentración T_c , por lo que se utilizó un algoritmo genético (AG) para obtener los parámetros C_1 , C_2 y C_3 de un modelo de la forma:

$$mediaQ_{instantáneo} = C_1 A^{C_2} T_c^{C_3} \quad (37)$$

Donde:

$mediaQ_{instantáneo}$ es la media de los gastos máximos anuales instantáneos de cada estación hidrométrica de la región o grupo de regiones considerado, en m^3/s

A es el área de su cuenca, en km^2



T_c es el tiempo de concentración, en horas

Para ello se utilizaron los registros de la media de los gastos máximos instantáneos, para las estaciones de cada grupo de regiones; el tiempo de concentración fue obtenido a partir de los datos de longitud y pendiente determinadas con el SIG usando la fórmula de Kirpich (Aparicio 1992).

Se alimentó al algoritmo genético con los datos anteriores y se planteó como función objetivo la minimización del error medio cuadrático entre los valores medidos de la media de los máximos instantáneos y los calculados con el modelo de la ecuación 37. Se consideró una población inicial de 200 individuos (cada individuo en este caso representa un conjunto de parámetros de prueba C_1 , P_1 y P_2) y 5000 generaciones. Así mismo se dieron límites de búsqueda para cada parámetro.

La Figura 11 muestra parte del algoritmo desarrollado en Matlab, donde se indica el nombre del archivo de entrada de datos en formato de texto, se definen las variables área, tiempo de concentración y la media del gasto máximo instantáneo obtenida del análisis estadístico,

La Figura 12 muestra parte del código del Algoritmo Genético (Matlab), donde se puede observar que se define el número de individuos, el número de generaciones, la precisión y los intervalos de los límites para cada parámetro. En la Figura 13 se muestra un ejemplo del archivo de texto de entrada de datos, la primera columna corresponde a el área de cada estación, la segunda columna corresponde a el tiempo de concentración y la tercera columna corresponde a las gasto medio instantáneo. El programa se compila y se estima el valor de la función objetivo correspondiente al mejor individuo (error medio cuadrático para la óptima

solución en cada generación) que el programa indica mediante una gráfica como lo muestra la Figura 14. Finalmente el programa proporciona la solución en un archivo de texto como lo indica la Figura 15, el valor de la primer fila corresponde al parámetro C1, el de la segunda fila al parámetro C2 y el de la tercer fila al parámetro C3.

```
C:\work\Genetic\Forh.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons] Stack: Base
1
2 function ObjVal = Forh(Chrom)
3
4 [Nind,NVAR] = size (Chrom);
5
6 load RHly3.txt
7
8 A = RHly3(:,1);
9 Tc = RHly3(:,2);
10 Qmi=RHly3(:,3);
11 %y = parata(:,3);
12 %Tr=[42,21,14,10.5,8.40,7.00,6.00,5.25,4.6667,4.20,3.8182,3.50,3.2308,3.,2.8,2.62.
13 %Tr=[1.0200, 1.0500, 1.0800, 1.1100, 1.1400, 1.1700, 1.2000, 1.2400, 1.2700, 1
14
15
16 NP = size (A,1);
17 k=1e9;
18
19 for i = 1:Nind
20
21 sum=0;
22
23 %for j=15:28
24 .....
```

Figura 11.- Definición de variables para el AG

```
1 % SgaQhpcvN.m
2 %
3 % This script implements the Simple Genetic Algorithm described
4 % in the examples section of the GA Toolbox manual.
5 %
6 %
7 % Author: Andrew Chipperfield
8 % History: 23-Mar-94 file created
9 % Modificado por Instituto de Ingenieria enero 2004
10 %
11 MIND = 200; % Number of individuals per subpopulations
12 MAXGEN = 5000; %maximum Number of generations
13 %GGAP = .9; % Generation gap, how many new individuals are created
14 GGAP=0.9; % Generation gap, how many new individuals are created3NOV04
15 NVAR = 3; % Generation gap, how many new individuals are created
16 PRECI = 15; % Precision of binary representation
17 %
18 % Build field descriptor
19 FieldD = [rep([PRECI],[1, NVAR]); 0.0001 -10000 -10000 ; 10000 10000 10000;...
20 rep([1; 0; 1 ;1], [1, NVAR])];
21 %load dp.txt
```

Figura 12.- Estructura y límites de búsqueda del AG

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1577	12.30596117			51.90938235
1100	8.793006915			71.45093333
1230	10.74944228			131.9748667
685	8.262375392			23.05744
1378	11.49278545			58.10166667
35	1.370886339			0.1985
120	1.803629494			0.410888889

Figura 13.- Ejemplo de archivo de entrada de datos para el AG

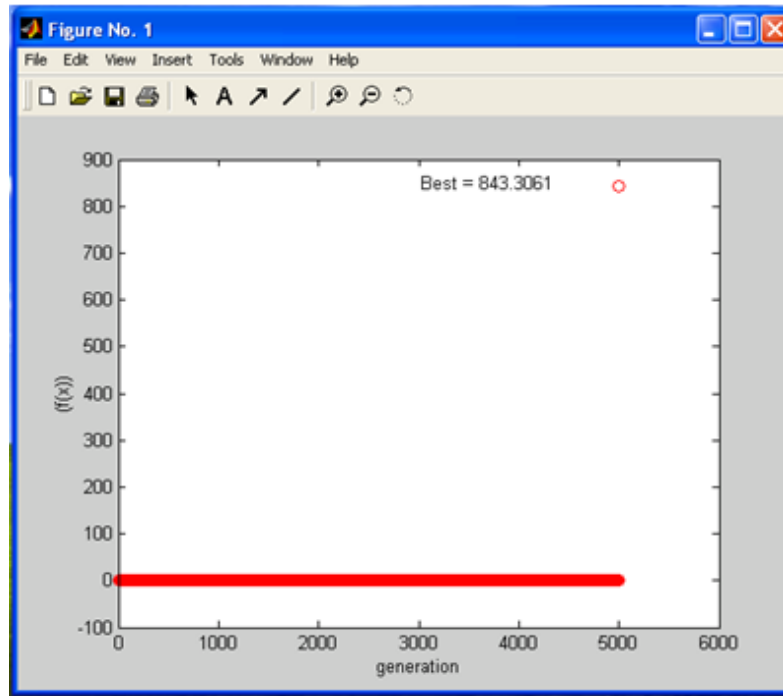


Figura 14.- Valor de la Función objetivo correspondiente al mejor individuo en cada generación

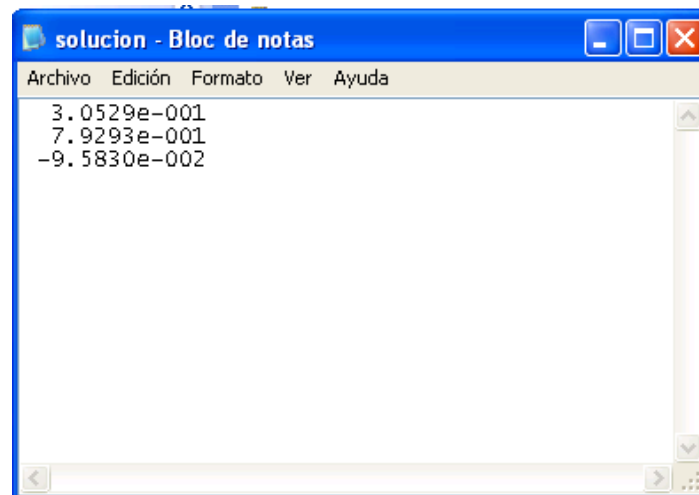


Figura 15.-. Archivo solución que muestra los parámetros obtenidos con el AG

Los datos obtenidos del archivo solución, Figura 15, se sustituyen en el modelo de la ecuación 37 y se obtiene la media del gasto máximo instantáneo para cada



grupo de regiones. De esta forma se puede construir la ecuación de la media del gasto máximo instantáneo para cada grupo de Regiones Hidrológicas.

$$mediaQ_{instantáneo} = 0.3052A^{0.79293}Tc^{-0.09583}$$

La Tabla 7 presenta un resumen de éstas ecuaciones para cada una de las Regiones Hidrológicas.

Tabla 7.- Ecuaciones de la media del Qinstantáneo en función del área y del tiempo de concentración usando AG

RH	Segundo Modelo
1 y 3	$MediaQ_{inst}=0.30529 * A^{0.79293} * tc^{-0.09583}$
7 y 8	$MediaQ_{inst}=0.30529 * A^{1.60802} * tc^{-2.51320}$
9	$MediaQ_{inst}=2.44158 * A^{1.01968} * tc^{-1.03305}$
10	$MediaQ_{inst}=6.71417 * A^{0.73861} * tc^{-0.52889}$
11	$MediaQ_{inst}=0.61047 * A^{1.68572} * tc^{-2.10456}$
12	$MediaQ_{inst}=0.30529 * A^{1.51708} * tc^{-1.73559}$
13 a 16	$MediaQ_{inst}=8.54528 * A^{0.59389} * tc^{-0.18403}$
19	$MediaQ_{inst}=0.30529 * A^{1.23234} * tc^{-0.36103}$
18	$MediaQ_{inst}=0.61047 * A^{1.22654} * tc^{-1.27964}$
20 y 21	$MediaQ_{inst}=36.01194 * A^{0.20478} * tc^{0.52705}$
22	$MediaQ_{inst}=38.45342 * A^{0.44545} * tc^{-0.52248}$
23	$MediaQ_{inst}=18.9216 * A^{0.3977} * tc^{0.1718}$
24	$MediaQ_{inst}=0.30531 * A^{1.5373} * tc^{-1.9288}$
25	$MediaQ_{inst}=107.7304 * A^{0.1473} * tc^0$
26 Pánuco	$MediaQ_{inst}=7.3245 * A^{0.9372} * tc^{-1.0324}$
26 Valle de México	$MediaQ_{inst}=11.2919 * A^{0.0162} * tc^{1.0361}$
27	$MediaQ_{inst}=31.7394 * A^{0.2689} * tc^{0.4324}$
28 y 29	$MediaQ_{inst}=60.73193 * A^{0.34651} * tc^0$
30	$MediaQ_{inst}=0.61047 * A^{0.81301} * tc^{0.13215}$
36 y 37	$MediaQ_{inst}=1.83121 * A^{0.93387} * tc^{-0.72726}$



4.3 MODELOS CON AG RELACIONANDO VOLUMEN, TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y EL ESPESOR DE SUELO

Nuevamente se utilizó un algoritmo genético (AG) para obtener los parámetros C1, C2, C3 y C4 de un modelo de la forma:

$$mediaQ_{instantáneo} = C1V^{C2}Tc^{C3}S^{C4} \quad (38)$$

Donde:

mediaQ_{instantáneo} es la media de los gastos máximos anuales instantáneos de la región o grupo de regiones considerado, en m³/s

V es el volumen de la cuenca, obtenido al multiplicar el área (km²) por la precipitación hp (mm) correspondiente al promedio en la cuenca de la media de las precipitaciones diarias máximas anuales

Tc es el tiempo de concentración en h

S es el índice de infiltración potencial máxima en cm.

De igual forma se utiliza el enfoque anterior, pero ahora se involucra el volumen y el espesor de suelo S como lo muestra la Figura 16, en la Figura 18 se muestra el archivo de texto de los datos de entrada, la primer columna corresponde al volumen de cada estación, la segunda al tiempo de concentración, la tercera al espesor de suelo y finalmente la media de los gastos máximos instantáneos, el programa realiza el mismo procedimiento que el anterior, optimizar los parámetros con base en el mínimo error y finalmente devuelve la solución en un archivo de texto como lo muestra la Figura 20, donde la primer fila corresponde al parámetro C1, la segunda al C2, la tercera al parámetro C3 y la cuarta al parámetro C4.

```
C:\workGenetic\Forh2.m*
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons] Stack: Base X
1
2 function ObjVal = Forh(Chrom)
3
4 [Nind,NVAR]=size(Chrom);
5
6 load RHly3.txt
7
8 Vol = RHly3(:,1);
9 Tc = RHly3(:,2);
10 s = RHly3(:,3);
11 Qmi=RHly3(:,4);
12 %y = parata(:,3);
13 %Tr=[42,21,14,10.5,8.40,7.00,6.00,5.25,4.6667,4.20,3.8182,3.50,3.2308,3.,2.8,2.62;
14 %Tr=[1.0200, 1.0500, 1.0800, 1.1100, 1.1400, 1.1700, 1.2000, 1.2400, 1.2700, 1
15
16
17 NP = size (Ah,1);
18 k=1e9;
19
20 for i = 1:Nind
21
22 sum=0;
23
Ready
```

Figura 16.- Definición de variables para el AG

```
C:\workGenetic\SgaForh2.m
File Edit View Text Debug Breakpoints Web Window Help
[Icons] Stack: Base X
1 % SgaQhpccvN.m
2 %
3 % This script implements the Simple Genetic Algorithm described
4 % in the examples section of the GA Toolbox manual.
5 %
6
7 % Author: Andrew Chipperfield
8 % History: 23-Mar-94 file created
9 % Modificado por Instituto de Ingeniería enero 2004
10
11 NIND = 200; % Number of individuals per subpopulations
12 MAXGEN = 5000; %maximum Number of generations
13 %GGAP = .9; % Generation gap, how many new individuals are created
14 GGAP=0.9; % Generation gap, how many new individuals are created3MOV04
15 NVAR = 4; % Generation gap, how many new individuals are created
16 PRECI = 15; % Precision of binary representation
17
18 % Build field descriptor
19 % FieldD = [rep([PRECI],[1, NVAR]); 0.0001 0. -10 ; 10000 2 0;...
20 % rep([1; 0; 1; 1],[1, NVAR])];
21 FieldD = [rep([PRECI],[1, NVAR]); 0.0001 -10 -10 -10 ; 10000 10 10. 10;...
% rep([1; 0; 1; 1; 1] [1, NVAR]111.
Ready
```

Figura 17.- Estructura y límites de búsqueda del AG

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
55636.56	12.30596117	15.56774194	51.90938235	
31449	8.793006915	16.23934426	71.45093333	
51340.2	10.74944228	19.16140351	131.9748667	
26160.15	8.262375392	14.91746032	23.05744	
57915.9763	9.586229346	16.93333333	91.99573333	
72386.34	11.49278545	13.08484848	58.10166667	
3008.95	1.370886339	17.65084746	0.1985	
11077.2	1.803629494	16.23934426	0.410888889	

Figura 18.- Ejemplo de archivo de entrada de datos para el AG

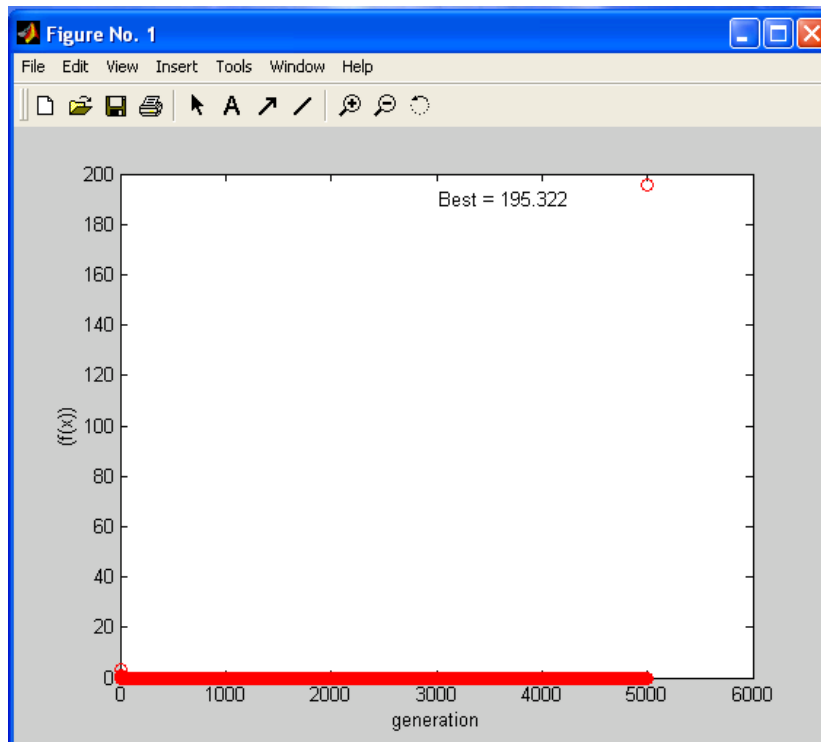


Figura 19.- Valor de la Función objetivo correspondiente al mejor individuo en cada generación

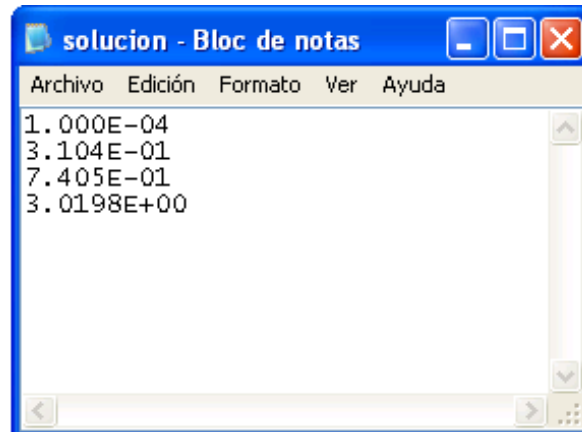


Figura 20.- Archivo solución que muestra los parámetros obtenidos con el AG

Nuevamente a partir de la solución se construye la ecuación para obtener la media del gasto máximo instantáneo sustituyendo los parámetros en la ecuación:

$$mediaQ_{instantáneo} = 0.0001V^{0.3101}Tc^{0.7405}S^{0.0198}$$

Las ecuaciones obtenidas con el modelo de la ecuación 38 se muestran en la Tabla 8 para todas las Regiones Hidrológicas

Tabla 1.- Ecuaciones obtenidas con el tercer modelo

RH	Tercer Modelo
1 y 3	$\text{MediaQinst}=0.0001V^{0.3104}tc^{0.7405}S^{3.0198}$
7 y 8	$\text{MediaQinst}=877.7123V^{1.1838}tc^{-1.3504}S^{-4.4633}$
9	$\text{MediaQinst}=1.2208V^{1.2204}tc^{-0.51}S^{-3.5978}$
10	$\text{MediaQinst}=0.6105V^{0.7187}tc^{-0.3586}S^{-0.4141}$
11	$\text{MediaQinst}=0.3053V^{1.8204}tc^{-1.3797}S^{-4.6715}$
12	$\text{MediaQinst}=0.3053V^{1.5354}tc^{-1.3102}S^{-3.5441}$
13 a 16	$\text{MediaQinst}=0.3053V^{1.5354}tc^{-0.1883}S^{0.1273}$
19	$\text{MediaQinst}=0.0001V^{1.2564}tc^{0.1871}S^{0.4636}$
18	$\text{MediaQinst}=3.3571V^{0.4630}tc^{-0.1022}S^{-0.1999}$
20 y 21	$\text{MediaQinst}=0.001V^{0.9165}tc^{-0.3745}S^{2.551}$
22	$\text{MediaQinst}=0.6105V^{0.5567}tc^{-0.5667}S^{0.4416}$
23	$\text{MediaQinst}=46.083V^{0.0488}tc^{-0.4575}S^{0.1926}$
24	$\text{MediaQinst}=0.3053V^{1.2622}tc^{-1.4725}S^{-1.7765}$
25	$\text{MediaQinst}=9974.3645V^0tc^{0.2414}S^{1.7038}$
26 Pánuco	$\text{MediaQinst}=10.9868V^{0.8591}tc^{-0.7047}S^{-1.8973}$
26 Valle de México	$\text{MediaQinst}=8.2401V^{-0.0394}tc^{0.9861}S^{0.3592}$
27	$\text{MediaQinst}=0.3053V^{0.445}tc^{0.4141}S^{0.5802}$
28 y 29	$\text{MediaQinst}=0.6105V^{0.492}tc^{0.2768}S^{0.1541}$
30	$\text{MediaQinst}=3.6623V^{0.8805}tc^{0.1621}S^{2.9502}$
36 y 37	$\text{MediaQinst}=10000V^{0.5316}tc^{-0.1279}S^{-3.6222}$



Tabla 2.- Resumen de ecuaciones obtenidas por los 3 modelos

RH	Ecuación potencial	Ecuación AG	Ecuación AG con hp y S
1 y 3	MediaQinst=0.0002*A ^{1.7535}	MediaQinst=0.30529*A ^{0.79293} *tc ^{-0.09583}	Media de Qmi=0.0001V ^{0.3104} tc ^{0.7405} S ^{3.0198}
7 y 8	MediaQinst=142.39*A ^{0.0054}	MediaQinst=0.30529*A ^{1.60802} *tc ^{-2.51320}	Media Qinst=877.7123V ^{1.1838} tc ^{-1.3504} S ^{-4.4633}
9	MediaQinst=11.66*A ^{0.4349}	MediaQinst=2.44158*A ^{1.01968} *tc ^{-1.03305}	Media Qinst=1.2208V ^{1.2204} tc ^{-0.51} S ^{-3.5978}
10	MediaQinst=20.745*A ^{0.4412}	MediaQinst=6.71417*A ^{0.73861} *tc ^{-0.52889}	Media Qinst=0.6105V ^{0.7187} tc ^{-0.3586} S ^{-0.4141}
11	MediaQinst=5.6048*A ^{0.5886}	MediaQinst=0.61047*A ^{1.68572} *tc ^{-2.10456}	Media Qinst=0.3053V ^{1.8204} tc ^{-1.3797} S ^{-4.6715}
12	MediaQinst=0.1459*A ^{0.8966}	MediaQinst=0.30529*A ^{1.51708} *tc ^{-1.73559}	Media Qinst=0.3053V ^{1.5354} tc ^{-1.3102} S ^{-3.5441}
13 a 16	MediaQinst=1.3419*A ^{0.7677}	MediaQinst=8.54528*A ^{0.59389} *tc ^{-0.18403}	Media Qinst=0.3053V ^{1.5354} tc ^{-0.1883} S ^{0.1273}
19	MediaQinst=2.0168*A ^{0.8458}	MediaQinst=0.30529*A ^{1.23234} *tc ^{-0.36103}	Media Qinst=0.0001V ^{1.2564} tc ^{0.1871} S ^{0.4636}
18	MediaQinst=26.475*A ^{0.3794}	MediaQinst=0.61047*A ^{1.22654} *tc ^{-1.27964}	Media Qinst=3.3571V ^{0.4630} tc ^{-0.1022} S ^{-0.1999}
20 y 21	MediaQinst=11.974*A ^{0.4763}	MediaQinst=36.01194*A ^{0.20478} *tc ^{0.52705}	Media Qinst=0.001V ^{0.9165} tc ^{-0.3745} S ^{2.551}
22	MediaQinst=27.621*A ^{0.3628}	MediaQinst=38.45342*A ^{0.44545} *tc ^{-0.52248}	Media Qinst=0.6105V ^{0.5567} tc ^{-0.5667} S ^{0.4416}
23	MediaQinst=6.442*A ^{0.6202}	MediaQinst=18.9216*A ^{0.3977} *tc ^{0.1718}	MediaQinst=7756.8896V ^{-0.4715} tc ^{0.6412} S ^{0.2902}
24	MediaQinst=0.256*A ^{0.8301}	MediaQinst=0.30531*A ^{1.5373} *tc ^{-1.9288}	Media Qinst=0.3053V ^{1.2622} tc ^{-1.4725} S ^{-1.7765}
25	MediaQinst=115.98*A ^{0.1343}	MediaQinst=107.7304*A ^{0.1473} *tc ⁰	Media Qinst=9974.3645V ⁰ tc ^{0.2414} S ^{-1.7038}
26 Pánuco	MediaQinst=33.527*A ^{0.3752}	MediaQinst=7.3245*A ^{0.9372} *tc ^{-1.0324}	Media Qinst=10.9868V ^{0.8591} tc ^{-0.7047} S ^{-1.8973}
26 V. de M.	MediaQinst=5.1785*A ^{0.3734}	MediaQinst=11.2919*A ^{0.0162} *tc ^{1.0361}	Media Qinst=7.0194V ⁰ tc ^{0.9488} S ^{0.2963}
27	MediaQinst=1.6791*A ^{0.7634}	MediaQinst=31.7394*A ^{0.2689} *tc ^{0.4324}	Media Qinst=0.3053V ^{0.445} tc ^{0.4141} S ^{0.5802}
28 y 29	MediaQinst=69.115*A ^{0.3194}	MediaQinst=60.73193*A ^{0.34651} *tc ⁰	Media Qinst=0.6105V ^{0.492} tc ^{0.2768} S ^{0.1541}
30	MediaQinst=40.932*A ^{0.3921}	MediaQinst=0.61047*A ^{0.81301} *tc ^{0.13215}	Media Qinst=3.6623V ^{0.8805} tc ^{0.1621} S ^{-2.9502}
36 y 37	MediaQinst=18.941*A ^{0.326}	MediaQinst=1.83121*A ^{0.93387} *tc ^{-0.72726}	Media Qinst=10000V ^{0.5316} tc ^{-0.1279} S ^{-3.6222}

Se obtuvieron los coeficientes de determinación de acuerdo con la ecuación 39, obteniendo la varianza de las medias medidas y calculadas y mediante una hoja de cálculo de Excel, en ambos casos el coeficiente de determinación es similar, a continuación se muestra el procedimiento realizado.

$$R^2 = \frac{\text{var}(\text{MediaQinst}_{\text{medida}}) - \text{var}(\text{MediaQinst}_{\text{medida}} - \text{MediaQinst}_{\text{calculada}})}{\text{var}(\text{MediaQinst}_{\text{medida}})} \quad (39)$$

$$R^2 = \frac{2148.45 - 978.98}{2148.45} = 0.544$$



Tabla 3.- Coeficiente de determinación para el primer modelo

Clave	Estación	MediaQinst medida (m ³ /s)	MediaQinst calculada (m ³ /s)	Media Qmedida-Media Qcalculada (m ³ /s)
01023	AGUA CALIENTE	51.91	80.99	-29.08
01024	SANTO DOMINGO	71.45	43.06	28.39
01025	SAN VICENTE	131.97	52.38	79.59
01026	SAN CARLOS	23.06	18.77	4.29
03001	EL OJO DE AGUA	58.10	63.93	-5.83
03002	SAN JACINTO	0.20	0.10	0.10
03003	PIEDRAS COLORADAS	0.41	0.88	-0.47
	Varianza	2148.45		1198.75
		Coef. deter.	0.442	

Tabla 4.- Coeficiente de determinación para el segundo modelo

Clave	Estación	MediaQinst medida (m ³ /s)	MediaQinst calculada (m ³ /s)	Media Qmedida-Media Qcalculada (m ³ /s)
1023	AGUA CALIENTE	51.91	82.40	-30.49
01024	SANTO DOMINGO	71.45	63.95	7.50
01025	SAN VICENTE	131.97	68.54	63.43
01026	SAN CARLOS	23.06	44.19	-21.13
03001	EL OJO DE AGUA	58.10	74.52	-16.42
03002	SAN JACINTO	0.20	4.96	-4.77
03003	PIEDRAS COLORADAS	0.41	12.85	-12.44
	Varianza	2148.45		978.98
		Coef. deter.	0.544	

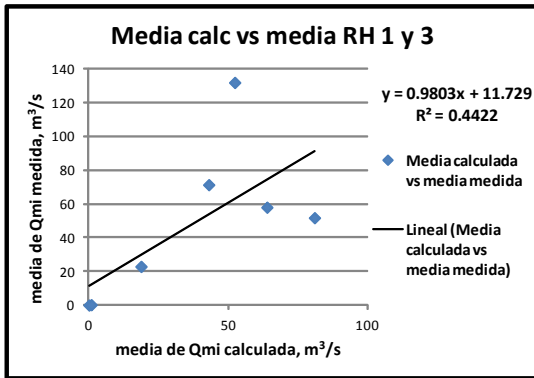
Tabla 5.- Coeficiente de determinación para el tercer modelo

Clave	Estación	MediaQinst medida (m ³ /s)	MediaQinst calculada (m ³ /s)	Media Qmedida-Media Qcalculada (m ³ /s)
1023	AGUA CALIENTE	51.91	76.77	-24.86
01024	SANTO DOMINGO	71.45	56.88	14.57
01025	SAN VICENTE	131.97	126.77	5.20
01026	SAN CARLOS	23.06	39.69	-16.63
01034	EL ALAMAR	92.00	83.19	8.80
03001	EL OJO DE AGUA	58.10	46.85	11.25
03002	SAN JACINTO	0.20	8.84	-8.65
03003	PIEDRAS COLORADAS	0.41	12.64	-12.23
	Varianza	2081.75		214.15
		Coef. deter.	0.897	

Adicionalmente también se compararon los coeficientes de determinación que se obtienen al hacer un ajuste de forma lineal a la gráfica que relaciona las medias de los gastos medidos contra las medias de los gastos calculados en Excel, de acuerdo con la siguiente Figura 21, y en la Tabla 13 se presentan los coeficientes para las Regiones Hidrológicas restantes.

Relacionando con el área

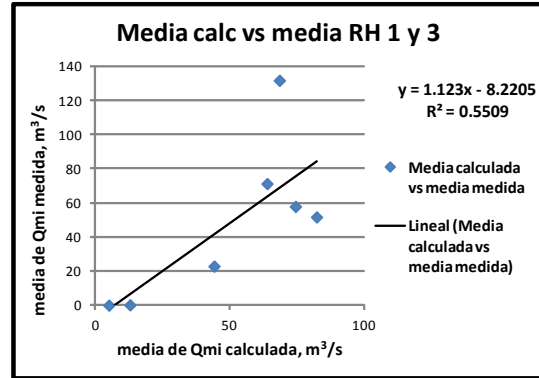
Coef deter 0.442



$MediaQ_{inst} = 0.0002 * A^{1.7535}$

Añadiendo Tc

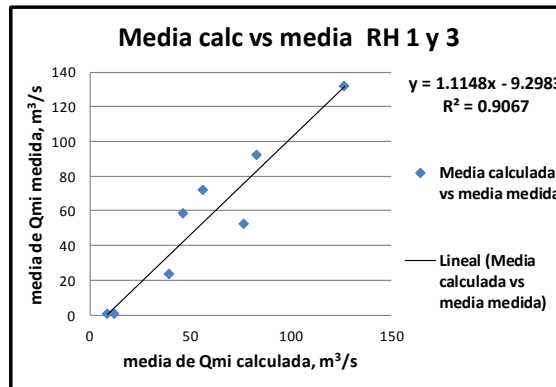
Coef deter 0.544



$MediaQ_{inst} = 0.30529 * A^{0.79293} * t_c^{-0.09583}$

Añadiendo hp y S

Coef deter 0.897



$Media de Q_{mi} = 0.0001V^{0.3104} t_c^{0.7405} S^{-3.0198}$

Figura 21.- Relación entre la media calculada y la media medida de los tres modelos, RH 1 y 3



Tabla 6. Comparación de los coeficientes de determinación obtenidos con los tres procedimientos de AG

RH	Coeficiente de determinación		
	Ec. potencial	Ec. AG	Ec. AG con hp y S
1 y 3	0.442	0.544	0.897
7 y 8	0.003	0.849	0.999
9	0.684	0.749	0.994
10	0.650	0.697	0.690
11	0.172	0.769	0.903
12	0.769	0.928	0.976
13 a 16	0.663	0.703	0.810
19	0.700	0.758	0.818
18	0.411	0.817	0.832
20 y 21	0.390	0.443	0.827
22	0.115	0.402	0.524
23	0.488	0.504	0.513
24	0.436	0.648	0.919
25	0.522	0.528	0.629
26 Pánuco	0.630	0.736	0.870
26 Valle de México	0.364	0.647	0.653
27	0.259	0.365	0.454
28 y 29	0.318	0.325	0.438
30	0.571	0.864	0.940
36 y 37	0.430	0.790	0.984



4.4 OBTENCIÓN DE AJUSTE PARA EVENTOS DE DISEÑO CON ANÁLISIS REGIONAL

Las ecuaciones mostradas en la Tabla 9 permiten estimar los valores de las medias de los gastos máximos anuales en cuencas no aforadas; para complementar estos resultados y estimar avenidas de diseño asociadas a distintos periodos de retorno se realizó un análisis regional de la siguiente forma:

Los gastos máximos instantáneos de todas las estaciones hidrométricas se normalizaron, dividiéndolos entre su media y se guardaron en archivos .aju, tomando en cuenta los sub grupos en que se repartieron las estaciones hidrométricas de cada región (Tabla 2), se construyeron archivos por grupo de hidrométricas normalizadas para realizar un análisis estadístico de dichos datos. En la Figura 28 se presentan los ajustes correspondientes al grupo 1 de la RH 1 y 3, la función de mejor ajuste en la mayoría de los casos fue de tipo doble Gumbel (González, 1970). Finalmente los gastos de diseño (normalizados) para distintos periodos de retorno y los distintos grupos de algunas regiones aparecen en la Tabla 15.

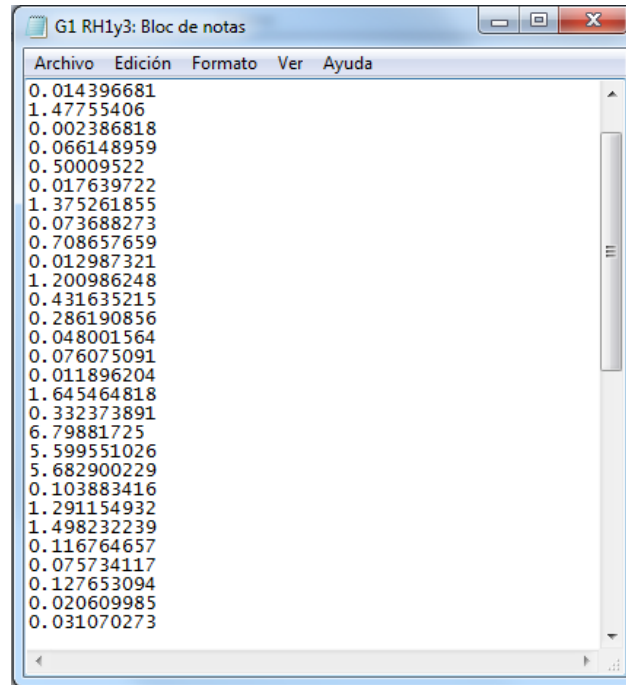


Figura 22.- Ejemplo de archivo de gastos normalizados para el Grupo 1 de la RH 1 y 3, estación 1024 y 1025

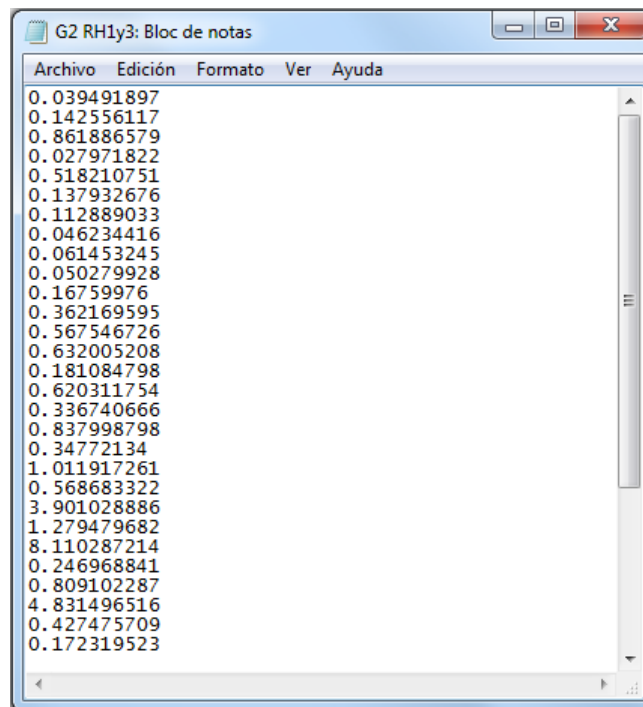


Figura 23.- Ejemplo de archivo de gastos normalizados para el Grupo 2 de la RH 1 y 3, estación 1023 y 3001

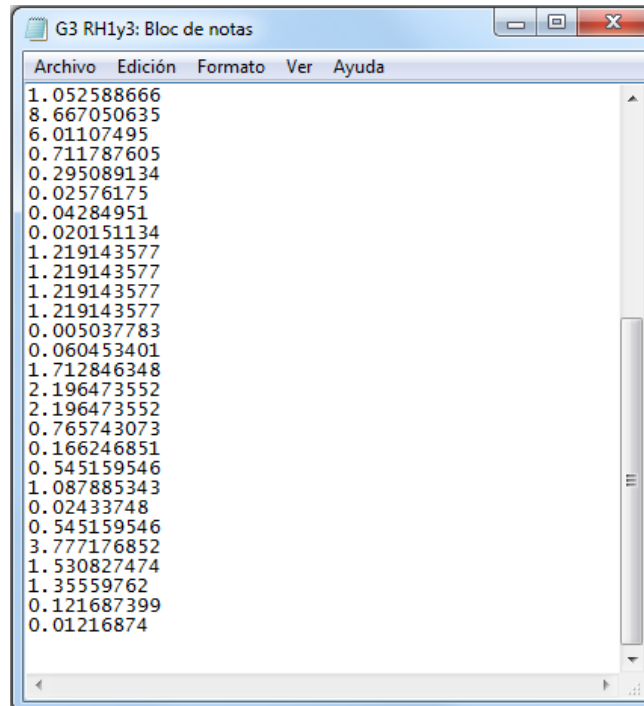


Figura 24.- Ejemplo de archivo de gastos normalizados para el Grupo 3 de la RH 1 y 3, estación 1026,3002 y 3003

Se utilizó el programa Ax para realizar un ajuste global a cada grupo para identificar la función de mejor ajuste como lo muestra la Figura 25 a 34 se muestra la secuencia del procedimiento para la Región Hidrológica 1 y 3.

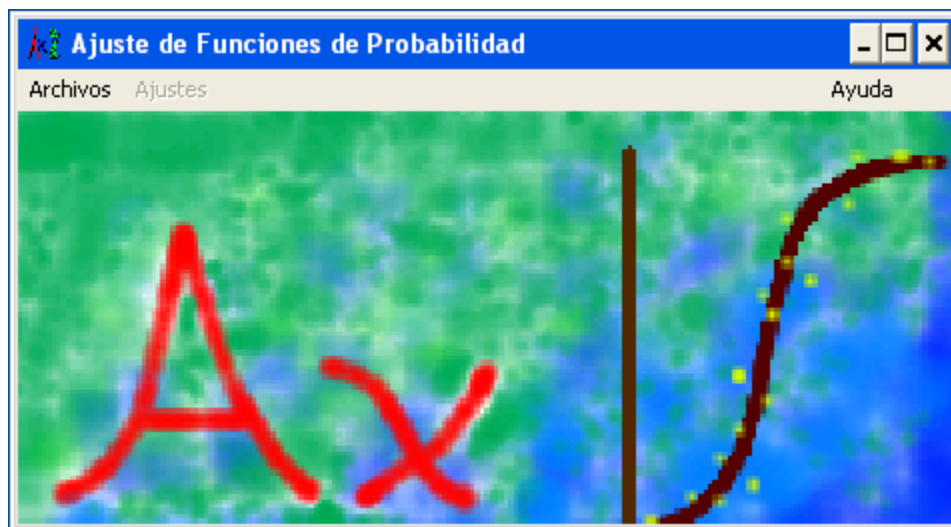


Figura 25.- Interfaz del programa Ax

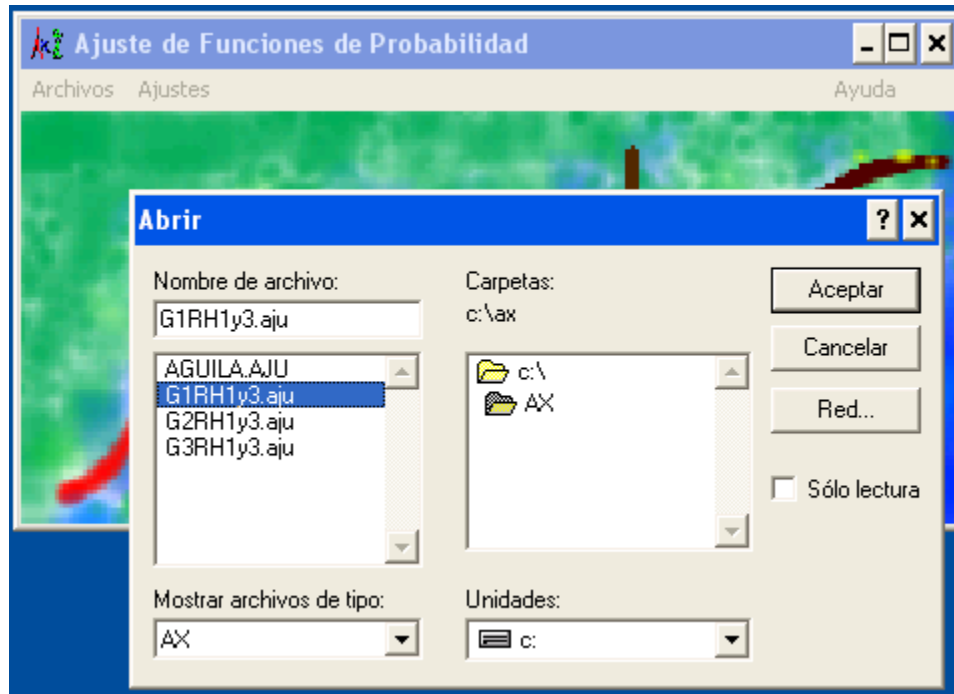


Figura 26.- Selección del archivo de datos normalizados para el Grupo 1



Figura 1.- Ajuste Global para el Grupo 1

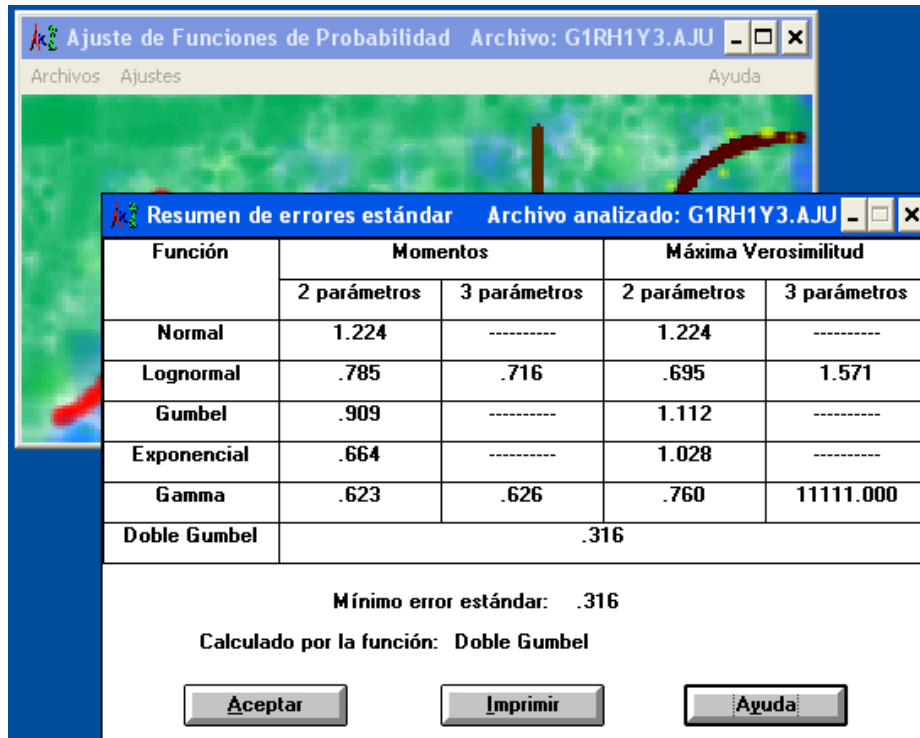


Figura 28.- Ejemplo de ajuste global para el Grupo 1

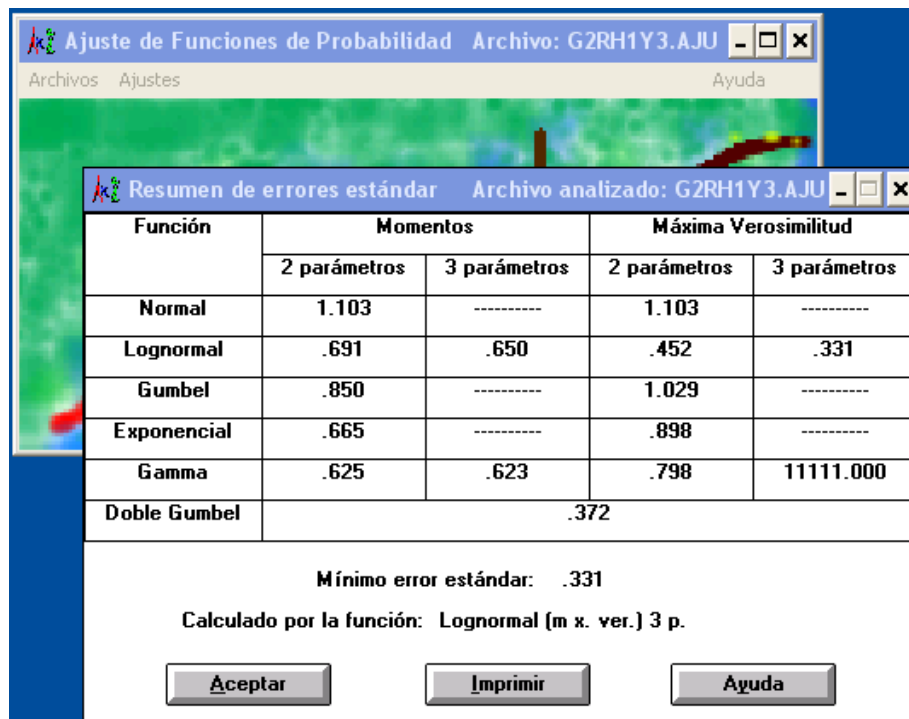


Figura 29.- Ejemplo de ajuste global para el Grupo 2

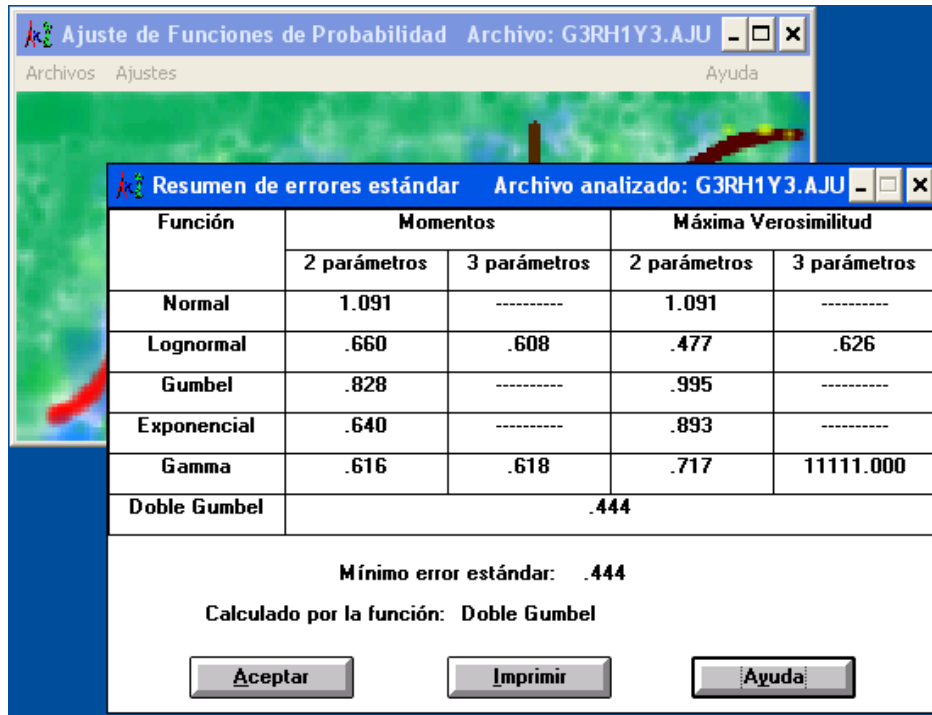


Figura 30.- Ejemplo de ajuste global para el Grupo 3

Como se mencionó anteriormente, en la mayoría de los casos la función de mejor ajuste con el mínimo error estándar fue de tipo doble Gumbel, por lo que se procede a hacer el ajuste con esta función para poder finalmente extrapolar los datos normalizados para distintos periodos de retorno como lo muestra la siguiente secuencia de Figuras.



Errores cuadráticos Archivo: G1RH1Y3.AJU				
i	Tr	Dato	Calculado	Error^2
1	61.	7.65	7.88	.05
2	30.5	6.8	6.7	.01
3	20.33	5.68	5.94	.07
4	15.25	5.62	5.34	.08
5	12.2	5.6	4.8	.64
6	10.17	3.66	4.26	.36
7	8.71	3.2	3.63	.18
8	7.63	3.07	2.48	.35
9	6.78	1.65	1.68	.
10	6.1	1.5	1.41	.01
11	5.55	1.48	1.24	.06
12	5.08	1.38	1.12	.07
13	4.69	1.3	1.02	.08
14	4.36	1.29	.94	.12
15	4.07	1.2	.88	.1
16	3.81	.71	.82	.01
17	3.59	.66	.76	.01
18	3.39	.53	.72	.03
19	3.21	.5	.67	.03
20	3.05	.44	.63	.04
21	2.9	.43	.59	.03
22	2.77	.43	.56	.02
23	2.65	.38	.52	.02
24	2.54	.37	.49	.01
25	2.44	.36	.46	.01
26	2.35	.33	.43	.01
27	2.26	.31	.4	.01
28	2.18	.31	.38	.
29	2.1	.29	.35	.
30	2.03	.27	.33	.
31	1.97	.26	.3	.
32	1.91	.25	.28	.
33	1.85	.23	.25	.
34	1.79	.22	.22	.

Parámetros estadísticos de la muestra:

$\mu = 1.$ $\sigma = 1.795$ $\gamma = 2.424$ $\kappa = 8.146$

Parámetros de la función: Doble Gumbel

Parámetro	Alfa1	Beta1	Alfa2	Beta2	P
Valor	2.40949	.069	.64951	4.794	.87

Error estándar = .212

Figura 31.- Ajuste del tipo Doble Gumbel

No	Tr	Dato cal
1	2.	.31
2	5.	1.1
3	10.	4.21
4	20.	5.91
5	50.	7.55
6	100.	8.68
7	200.	9.78
8	500.	11.21
9	1000.	12.28
10	2000.	13.35
11	5000.	14.77
12	10000.	15.86

Figura 32.- Extrapolación de valores normalizados para el G1

Nombre	Tamaño	Tipo	Fecha de modificación
AGUILA	1 KB	Archivo AJU	20/07/1992 01:21 p...
AGUILA.AJ_	1 KB	Archivo AJ_	20/07/1992 01:21 p...
AJUSTES	1 KB	Archivo PAR	12/11/2014 04:09 p...
AJUSTES.PA_	1 KB	Archivo PA_	06/08/1997 11:20 p...
AX	102 KB	Archivo EX_	07/02/1998 12:54 p...
AX	167 KB	Aplicación	07/02/1998 12:54 p...
AX	672 KB	Archivo de Ayuda	06/08/1997 11:22 a...
AX	1 KB	Archivo LET	24/06/1997 03:01 p...
AX.HL_	142 KB	Archivo HL_	06/08/1997 11:22 a...
AX.LE_	1 KB	Archivo LE_	24/06/1997 03:01 p...
CMDIALOG.VB_	11 KB	Archivo VB_	28/04/1993 01:00 a...
GRID.VB_	28 KB	Archivo VB_	28/04/1993 01:00 a...
Leeme	1 KB	Documento de texto	17/07/2001 01:36 p...
SETUP	15 KB	Aplicación	28/04/1993 01:00 a...
SETUP1	14 KB	Archivo EX_	27/08/1997 03:07 p...
SETUP.LST	1 KB	Archivo LST	27/08/1997 03:11 p...
SETUPKIT	4 KB	Archivo DL_	28/04/1993 01:00 a...
THREED.VB_	33 KB	Archivo VB_	28/04/1993 01:00 a...
VBRUN300	271 KB	Archivo DL_	12/05/1993 01:00 a...
G3RH1y3	1 KB	Archivo AJU	12/11/2014 03:59 p...
G1RH1y3	1 KB	Archivo AJU	12/11/2014 04:23 p...
G2RH1y3	1 KB	Archivo AJU	12/11/2014 03:59 p...
G1RH1Y3	1 KB	Archivo RDG	12/11/2014 04:23 p...
G1RH1Y3	1 KB	Archivo ETP	12/11/2014 04:26 p...
G1RH1Y3	2 KB	Archivo MAX	12/11/2014 04:26 p...

Figura 33.- Archivos MAX de salida del Ax


```
G1RH1Y3 - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
doble Gumbel
10000.00 15.86
5000.00 14.77
2000.00 13.35
1000.00 12.28
500.00 11.21
200.00 9.78
100.00 8.68
50.00 7.55
20.00 5.91
10.00 4.21
5.00 1.10
2.00 .31
61.00 7.88 7.65
30.50 6.70 6.80
20.33 5.94 5.68
15.25 5.34 5.62
12.20 4.80 5.60
10.17 4.26 3.66
8.71 3.63 3.20
7.63 2.48 3.07
6.78 1.68 1.65
6.10 1.41 1.50
5.55 1.24 1.48
5.08 1.12 1.38
4.69 1.02 1.30
4.36 .94 1.29
4.07 .88 1.20
3.81 .82 .71
3.59 .76 .66
3.39 .72 .53
3.21 .67 .50
3.05 .63 .44
2.90 .59 .43
2.77 .56 .43
2.65 .52 .38
2.54 .49 .37
2.44 .46 .36
2.35 .43 .33
2.26 .40 .31
2.18 .38 .31
2.10 .35 .29
2.03 .33 .27
1.97 .30 .26
1.91 .28 .25
1.85 .25 .23
1.79 .23 .23
```

Figura 34.- Ejemplo de archivo MAX de salida del programa Ax

En la Figura 34 se muestra el archivo de salida del programa Ax en formato de texto con los datos normalizados medidos y calculados para diferente periodo de

retorno, en la columna 1 se indica el periodo de retorno (Tr), en la segunda columna se indican los valores normalizados calculados y en la tercera columna se muestran los valores medidos que se ingresaron al programa en los archivos .aju, el procedimiento se repite para los sub-grupos de cada grupo de regiones, los archivos de texto se pueden procesar fácilmente en una hoja de cálculo de Excel para obtener las gráficas correspondientes al comportamiento de estos valores como lo muestra las Figuras siguientes.

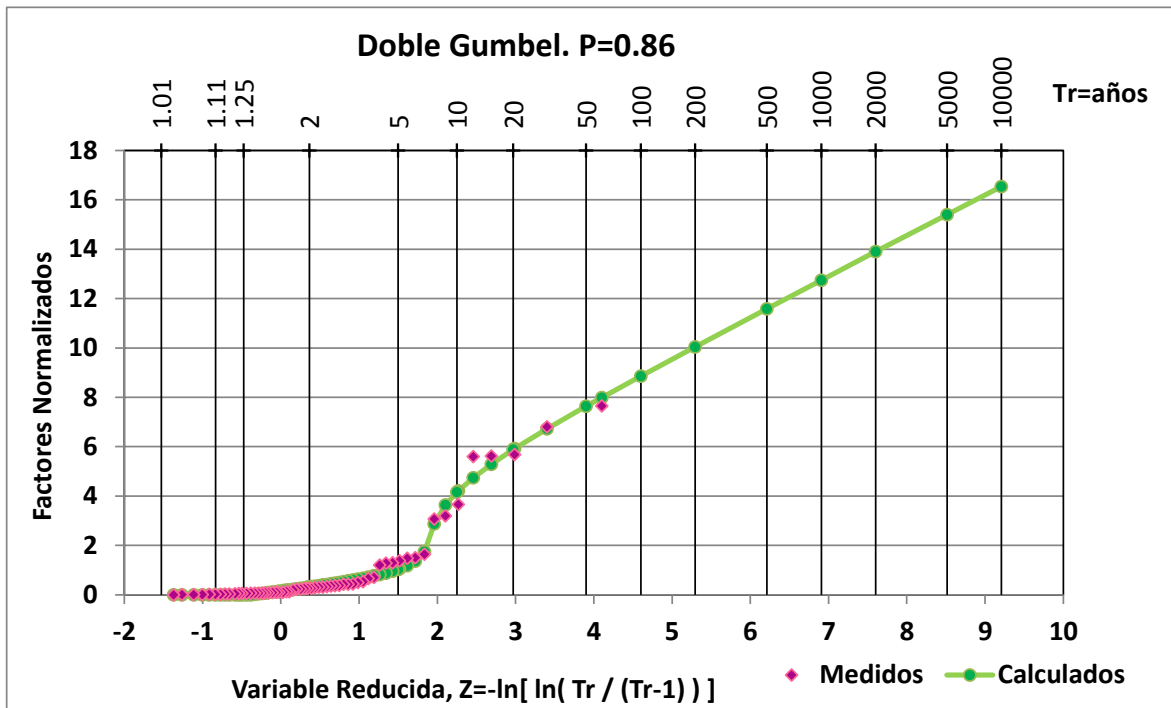


Figura 35.- Valores medidos y calculados para diferentes periodos de retorno del Grupo 1

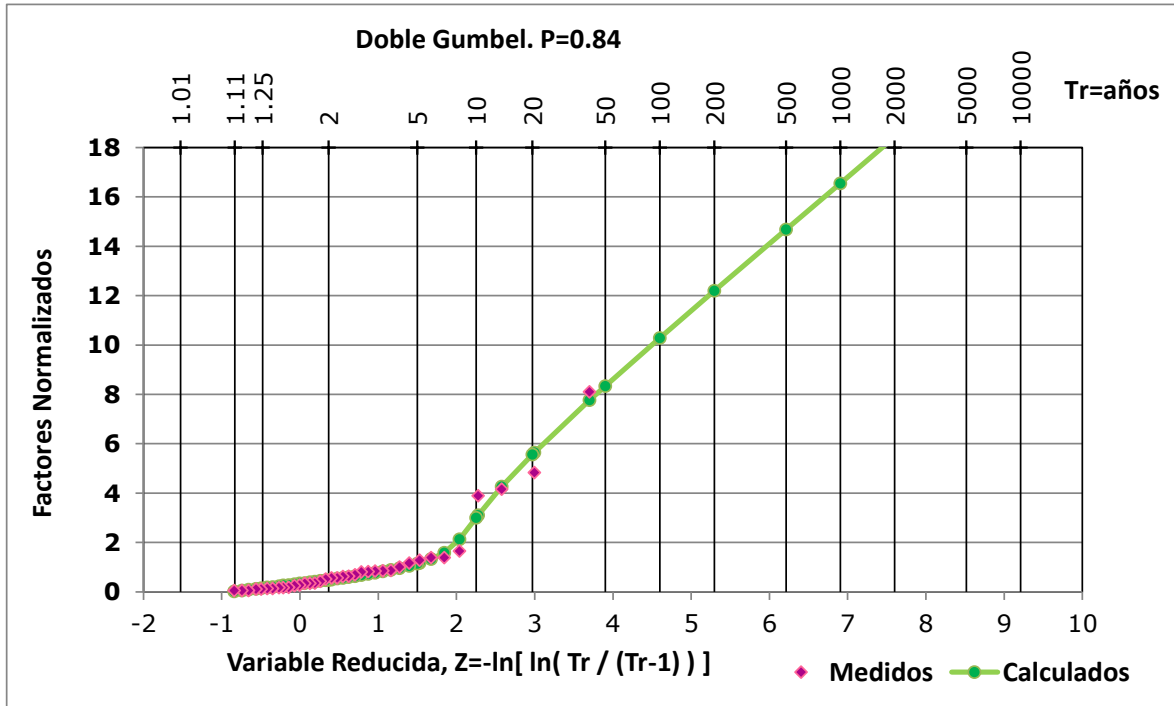


Figura 36.- Valores medidos y calculados para diferentes periodos de retorno del Grupo 2

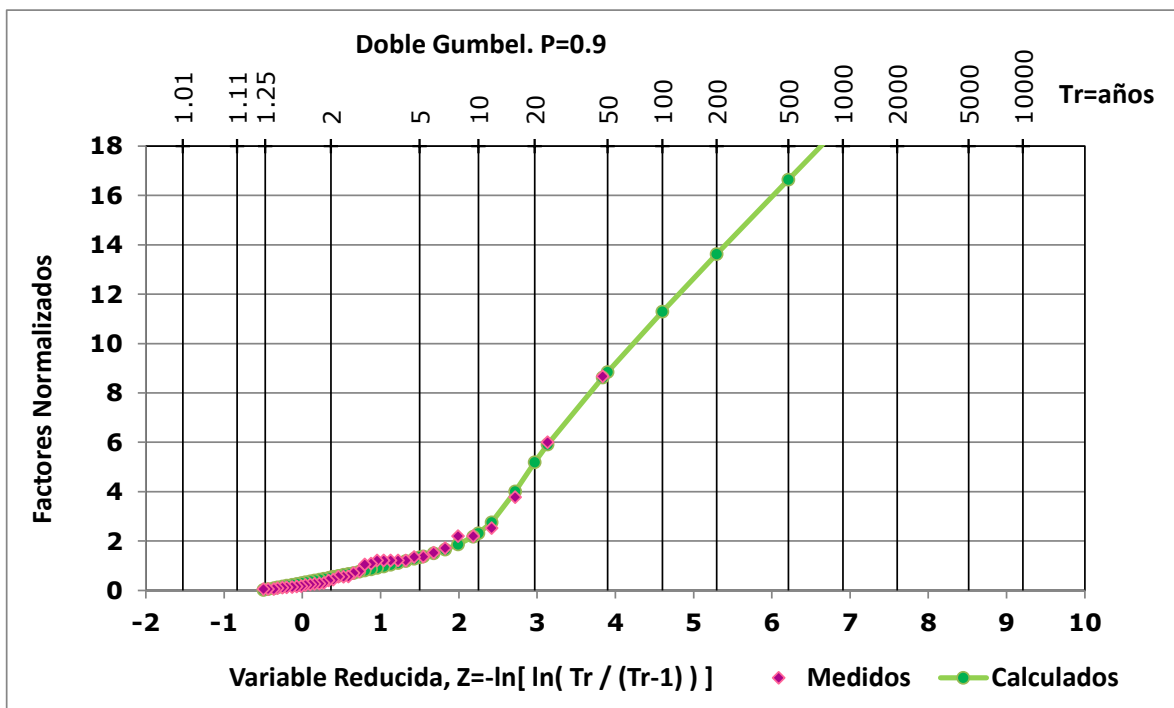


Figura 37. Valores medidos y calculados para diferentes periodos de retorno del Grupo 3



En la Tabla 14 se muestran los eventos de diseño normalizados extrapolados para diferentes periodos de retorno para la Región Hidrológica 1 y 3, y en la Tabla 15 se muestran un resumen de estos eventos para todas las regiones Hidrológicas analizadas.

Tabla 7.- Eventos de diseño normalizados grupos 1, 2 y 3 de la RH 1 y 3

Tr	RH 1Y3		
	G1	G2	G3
años			
2	0.32	0.49	0.54
5	1.03	1.14	1.35
10	4.16	3	2.24
20	5.89	5.57	5.18
50	7.64	8.34	8.95
100	8.86	10.29	11.33
200	10.04	12.2	13.58
500	11.58	14.68	16.47
1000	12.74	16.55	18.64
2000	13.9	18.43	20.77
5000	15.4	20.84	23.69
10000	16.54	22.68	25.67



Tabla 8.- Eventos de diseño normalizados para las Regiones Hidrológicas de la República Mexicana

Tr	RH 1 a 3			RH 1 (sin 3)			RH 7 y 8	RH 9		RH 10	
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G1	G2	G1	G2
años											
2	0.32	0.49	0.53	0.32	0.42	0.33	0.73	0.83	0.77	0.68	0.88
5	1.03	1.14	1.34	1.03	0.92	0.94	1.34	1.34	1.37	1.32	1.51
10	4.16	3	2.32	4.16	3.89	3.85	1.91	1.87	2.03	2.22	1.92
20	5.89	5.57	5.19	5.89	6.12	7.86	3.18	2.45	2.87	3.42	2.32
50	7.64	8.34	8.85	7.64	8.37	11.91	6.07	3.04	3.84	4.72	2.83
100	8.86	10.29	11.29	8.86	9.93	14.73	7.99	3.43	4.51	5.61	3.22
200	10.04	12.2	13.62	10.04	11.45	17.47	9.82	3.82	5.15	6.48	3.6
500	11.58	14.68	16.64	11.58	13.43	21.04	12.16	4.31	5.99	7.6	4.1
1000	12.74	16.55	18.91	12.74	14.93	23.71	13.92	4.68	6.62	8.44	4.49
2000	13.9	18.43	21.13	13.9	16.42	26.43	15.66	5.05	7.25	9.27	4.87
5000	15.4	20.84	24.11	15.4	18.34	29.97	17.91	5.55	8.06	10.39	5.37
10000	16.54	22.68	26.33	16.54	19.89	32.61	19.62	5.92	8.68	11.27	5.75

Tabla 15.- Continuación

Tr	RH 11			RH 12			RH 13 a 16 y 19			RH 18		
	G1	G2	G3	G1	G2	G2	G1	G2	G3	G1	G2	G3
años												
2	0.7	0.68	0.8	0.87	0.75	0.8	0.69	0.72	0.77	0.82	0.89	0.86
5	1.37	1.67	1.5	1.38	1.37	1.39	1.41	1.3	1.4	1.34	1.31	1.27
10	2.27	2.48	2.06	1.83	2.03	2.01	2.49	1.83	1.97	1.83	1.67	1.63
20	3.12	3.17	2.77	2.34	3.15	2.79	3.2	2.88	2.81	2.56	2.02	2.14
50	4.12	4.02	3.97	3	4.43	3.67	3.98	5.55	4.13	3.78	2.45	3.09
100	4.84	4.63	4.95	3.48	5.26	4.26	4.52	7.39	5.08	4.64	2.75	3.82
200	5.54	5.23	5.93	3.95	6.05	4.82	5.06	9.14	6	5.47	3.05	4.54
500	6.46	6.02	7.2	4.56	7.07	5.55	5.76	11.4	7.18	6.54	3.43	5.45
1000	7.16	6.62	8.15	5.02	7.83	6.1	6.28	13.09	8.06	7.34	3.73	6.14
2000	7.86	7.21	9.11	5.47	8.58	6.65	6.81	14.77	8.94	8.12	4.02	6.83
5000	8.75	8.01	10.34	6.07	9.58	7.36	7.5	16.93	10.1	9.18	4.4	7.74
10000	9.48	8.6	11.33	6.55	10.38	7.89	8.02	18.68	10.97	9.96	4.7	8.41



Tabla 15.- Continuación

Tr	RH 20 y 21			RH 22		RH23	RH24			RH 25	
	G1	G2	G3	G1	G1	G1	G1	G2	G3	G1	G2
años											
2	0.79	0.82	0.86	1.43	0.7	0.84	0.65	0.54	0.74	0.81	0.57
5	1.29	1.43	1.34	2.17	1.42	1.41	1.37	1.32	1.34	1.42	1.35
10	1.93	2.06	1.77	3.44	2.18	1.89	2.31	2.05	1.85	2.02	1.99
20	2.92	2.66	2.26	5.53	3.45	2.41	3.73	3.81	2.74	2.76	2.43
50	3.57	3.25	2.9	6.96	4.95	3.09	5.22	8.45	5.45	3.69	2.93
100	3.99	3.65	3.37	8.33	5.94	3.59	6.22	11.51	7.51	4.33	3.29
200	4.38	4.04	3.83	8.6	6.87	4.08	7.18	14.39	9.47	4.95	3.65
500	4.89	4.54	4.43	10.09	8.08	4.73	8.43	18.11	11.99	5.76	4.11
1000	5.28	4.91	4.88	11.41	8.98	5.21	9.35	20.89	13.87	6.36	4.46
2000	5.66	5.28	5.33	12.72	9.88	5.7	10.3	23.68	15.75	6.96	4.81
5000	6.16	5.77	5.93	14.41	11.06	6.35	11.5	27.33	18.23	7.75	5.26
10000	6.54	6.16	6.37	15.77	12	6.83	12.41	30.22	20.07	8.38	5.63

Tabla 15.- Continuación

Tr	RH 26 Pánuco			RH 26 Valle de México					RH 27		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G2	G3	G1	G2	G3
años											
2	0.84	0.79	0.81	0.91	0.81	0.8	0.88	0.86	0.83	0.85	0.77
5	1.37	1.47	1.38	1.42	1.41	1.71	1.51	1.6	1.28	1.4	1.27
10	1.9	2.05	2.01	1.76	2.08	2.22	1.93	2.08	1.78	1.88	1.84
20	2.42	2.79	2.67	2.08	2.6	2.66	2.32	2.54	2.48	2.23	2.91
50	2.96	3.99	3.29	2.5	3.13	3.19	2.84	3.15	3.2	2.61	3.92
100	3.33	4.92	3.7	2.82	3.49	3.58	3.23	3.6	3.67	2.88	4.57
200	3.68	5.84	4.09	3.13	3.84	3.96	3.61	4.04	4.12	3.14	5.18
500	4.14	7.02	4.6	3.54	4.3	4.47	4.12	4.64	4.71	3.49	5.97
1000	4.49	7.92	4.98	3.86	4.64	4.85	4.5	5.08	5.14	3.74	6.56
2000	4.84	8.8	5.37	4.17	4.98	5.23	4.89	5.53	5.58	4	7.15
5000	5.29	9.99	5.86	4.58	5.45	5.73	5.4	6.12	6.15	4.35	7.93
10000	5.63	10.86	6.24	4.9	5.79	6.14	5.78	6.57	6.58	4.59	8.54



Tabla 15.- Continuación

Tr	RH 28			RH 30			RH 36y37		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G2
años									
2	0.89	0.92	0.76	0.9	0.87	0.77	0.72	1.02	1.01
5	1.31	1.37	1.17	1.21	1.27	1.22	1.61	1.75	1.8
10	1.72	1.67	1.45	1.49	1.61	1.6	2.32	2.24	2.32
20	1.96	1.96	1.71	1.84	2.07	2.32	2.88	2.71	2.81
50	2.19	2.33	2.05	2.34	2.85	5.66	3.54	3.32	3.46
100	2.35	2.61	2.31	2.7	3.44	8.18	4.02	3.77	3.94
200	2.51	2.89	2.56	3.04	4.02	10.57	4.5	4.23	4.42
500	2.73	3.26	2.9	3.49	4.77	13.63	5.12	4.83	5.06
1000	2.89	3.53	3.15	3.83	5.33	15.93	5.59	5.28	5.54
2000	3.05	3.81	3.41	4.17	5.89	18.19	6.05	5.73	6.02
5000	3.28	4.18	3.74	4.61	6.63	21.28	6.68	6.33	6.65
10000	3.45	4.45	3.99	4.94	7.22	23.38	7.12	6.78	7.13

Con esta metodología se puede obtener de manera fácil, por una parte, la estimación de la media del gasto máximo instantáneo a partir de características fisiográficas en regiones donde no se cuente con datos históricos para obtenerla de forma estadística, y por otra parte con los factores o eventos de diseño obtenidos a partir de la extrapolación, se puede estimar el gasto máximo instantáneo que se puede presentar para distintos periodos de retorno, como se muestra el siguiente capítulo.



CAPÍTULO 5.- EJEMPLO DE OBTENCIÓN DE GASTOS DE DISEÑO

En la Tabla 9, la ecuación potencial (ecuación 34) se obtuvo usando una hoja de cálculo Excel© al dibujar a la media de los gastos máximos anuales, MQMIA, de las hidrométricas de cada grupo de regiones contra el área de la cuenca correspondiente y proponiendo una línea de tendencia potencial de la que se determinó su ecuación y coeficiente de determinación. El siguiente modelo fue del tipo de la ecuación (37) cuyos parámetros se determinaron usando algoritmos genéticos; dicho modelo además del área de la cuenca, considera el tiempo de concentración en la determinación de la MQMIA. En las ecuaciones del tipo (38) se consideró el volumen medio llovido (al tomar en cuenta el área de la cuenca y a la precipitación promedio en la cuenca calculada con la media de las precipitaciones diarias máximas anuales, además del tiempo de concentración y los efectos de infiltración en la cuenca al añadir al espesor de suelo S).

Cabe destacar que en el tercer modelo se agrupó el área con la precipitación y con ello se logró mejorar los coeficientes de determinación aumentando solo en 1 el número de los parámetros que se requiere calcular.

En el caso de cuencas no aforadas y dependiendo de las características fisiográficas y los datos de precipitación, primero se debe estimar la MQMIA utilizando las ecuaciones indicadas en la Tabla 9 y posteriormente se utilizaría el factor correspondiente a la región y al grupo que corresponde al sitio analizado (Tabla 15).

5.1 EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN REGIONAL PARA LA MQMIA EN LA RH19

Con el fin de comprobar si los modelos obtenidos son confiables, se compararon las estimaciones del gasto máximo instantáneo, obtenido con los tres procedimientos propuestos, con datos de precipitación registrados en la República Mexicana.

En el 2013 se registraron eventos de precipitación extraordinarios en Guerrero; en particular en el río la Sabana, lo cual ocasionó que se presentaran fuertes caudales.

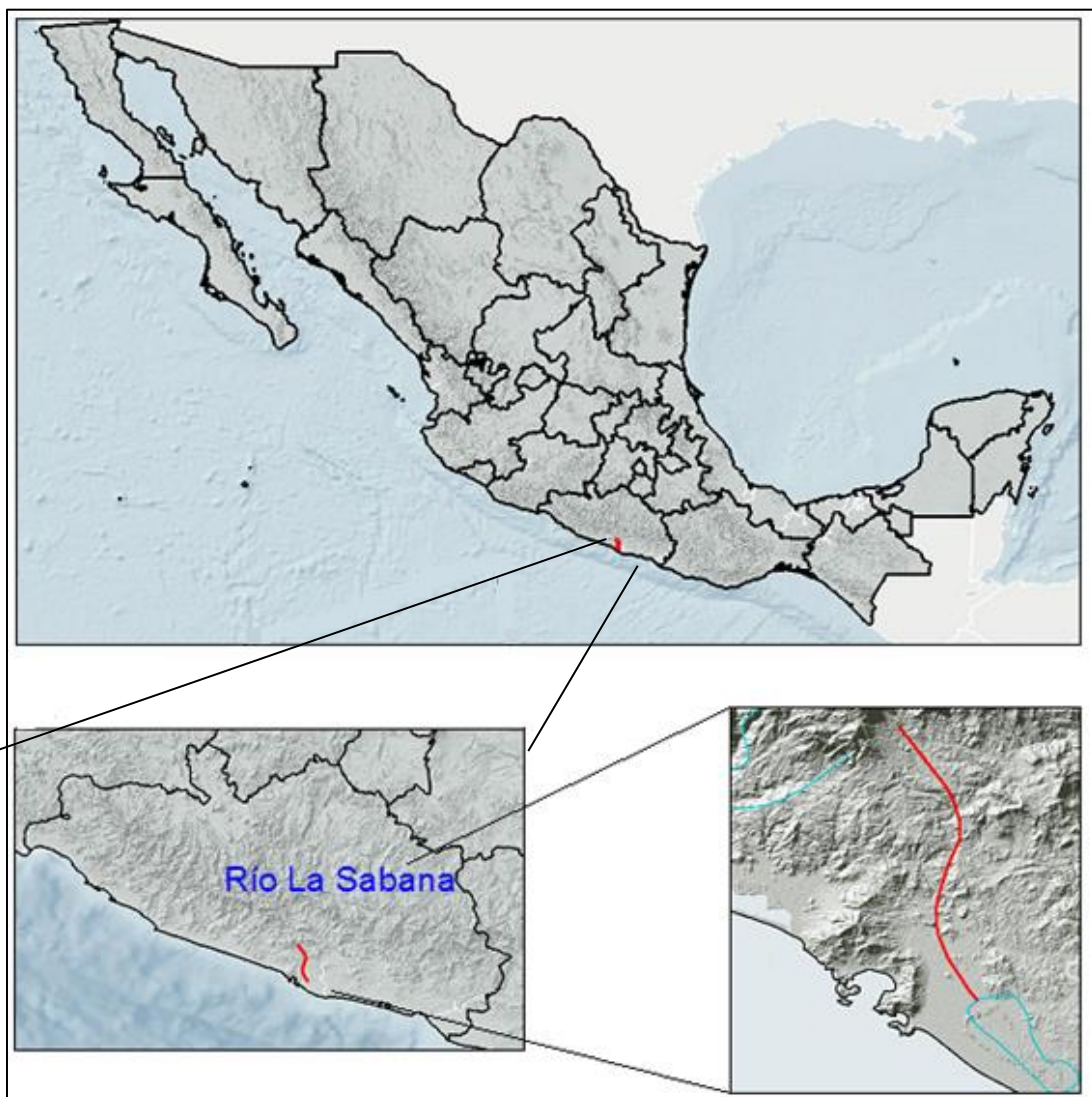




Figura 38.- Ubicación del río La Sabana, Guerrero

Con base en esta información se consideraron las ecuaciones obtenidas con los tres modelos para estimar la media del gasto máximo instantáneo a partir de las características fisiográficas de la cuenca que comprende la estación 19018 Tuncingo, la cual se encuentra en la Región Hidrológica número 19, dichas características se presentan en la Tabla 16.

Tabla 9.- Características fisiográficas de la estación 19018 Tuncingo, Guerrero

Clave	Nombre	Área	hp	V	tc	S	Grupo RH13 a 16 y 19
		km ²	hp mm	km ² . Mm	h	Espesor (cm)	
19018	Tuncingo	399	127.49	50868.51	5.44	10	3

Siguiendo el procedimiento descrito, se calculan las MQMI con las tres ecuaciones propuestas como lo muestra la Tabla 17 a partir de las características fisiográficas de la estación hidrométrica 19018, Tuncingo, las ecuaciones se muestran en la Figura 39.

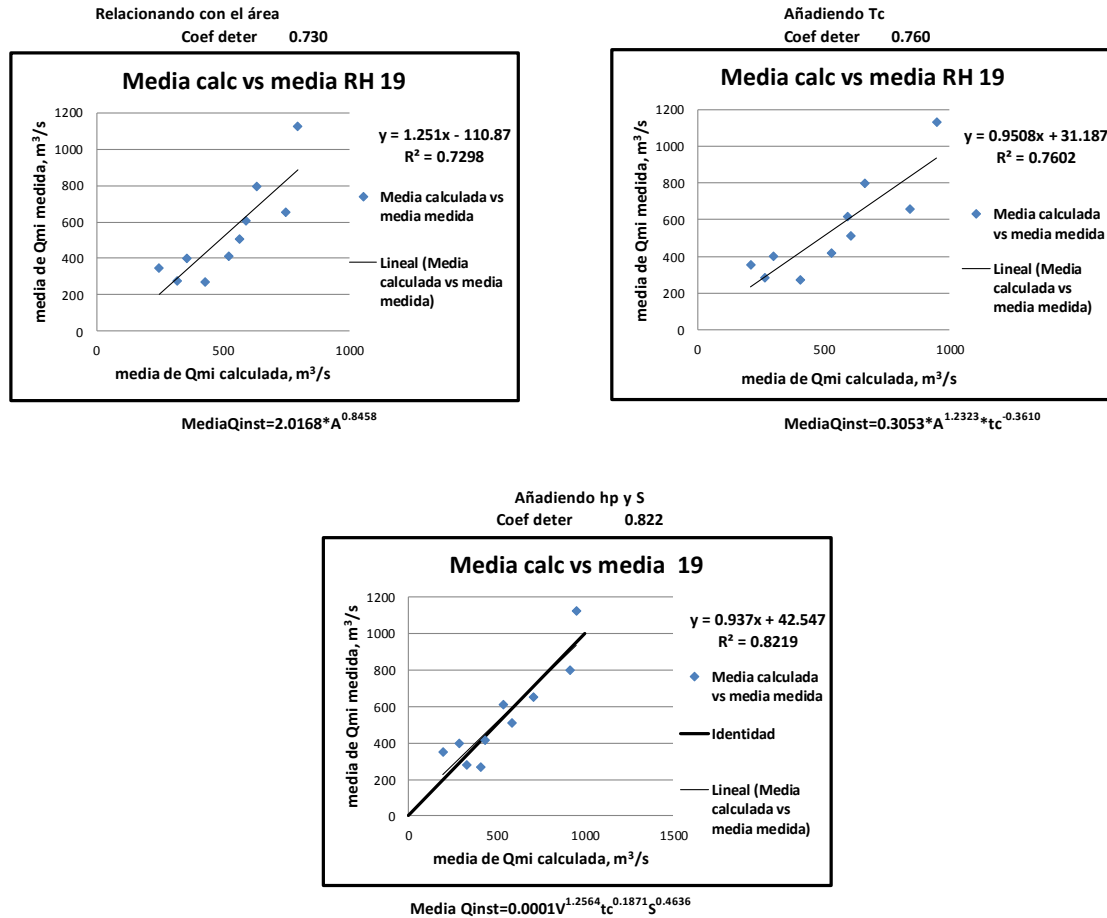


Figura 39.- Ecuaciones y coeficientes de determinación de la RH 19

Tabla 10.- Obtención de los MQMI con los tres modelos

		MQMI [m ³ /s]
Modelo 1	MediaQinst=2.0168*(399) ^{0.8458}	319.57
Modelo 2	MediaQinst=0.30529*(399) ^{1.23234} *(5.44) ^{-0.36103}	265.72

Modelo 3	$MediaQ_{inst} = 0.0001 * (50868.51)^{1.2564} (5.44)^{0.1871} (10)^{0.4636}$	326.90
-----------------	--	--------

De acuerdo con los resultados obtenidos, la MQMI obtenido con el tercer modelo que involucra más parámetros, tendría una magnitud aproximada de 327 m³/s (Tabla 17), dicho valor se calcula al considerar que dicha hidrométrica se encuentre en la Región hidrológica 19, cuya ecuación regional (Figura 39) estima la MQMIA, en m³/s, en función del volumen llovido en km².mm obtenido como el producto del área de la cuenca drenada hasta el sitio de aforo, en km², por la media de las precipitaciones diarias máximas anuales hp en mm, el tiempo de concentración en horas y el espesor del suelo S en cm.

Una vez obtenida la MQMI, se puede obtener el valor del Gasto máximo instantáneo que se puede presentar en la región analizada al multiplicar la MQMI por el factor de diseño normalizado correspondiente al periodo de retorno que se desee conocer, en este caso la comparación se realizó para periodos de retorno de 50 y 100 años, obtenido a partir del análisis regional.

De acuerdo con la Tabla 18 los factores de diseño para la RH 19 correspondientes al periodo de retorno de 50 y 100 años son 4.13 y 5.08 respectivamente, con dichos valores obtenemos un Gasto máximo instantáneo de 1350.09 m³/s y 1660.65 m³/s para el tercer modelo; la Tabla 18 muestra los resultados para los tres modelos.

Tabla 11.- Gastos máximos instantáneos obtenidos con análisis regional para la estación Tuncingo para 50 y 100 años con los tres modelos

Tr [años]	RH 19	QMI [m ³ /s]
--------------	-------	----------------------------

	G3	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
100	5.08	1 623.41	1 349.85	1 660.65
50	4.13	1 319.82	1 097.42	1 350.09

Tabla 12. Resumen de los Gastos de diseño obtenidos para periodos de retorno de 50 y 100, tercer modelo

Clave	Nombre	Ajustes de MQMIA normalizados		Q de diseño m ³ /s	
		Tr		Tr	
		50 años	100 años	50 años	100 años
19018	Tuncingo	4.11	4.99	1350.09	1660.65

Por otra parte, la CONAGUA (2013), utilizando el registro histórico de gastos máximos anuales de 1969 a 2013 (este último dato estimado con la huella del agua registrado por la creciente de septiembre del 2013 ante los eventos del Huracán Manuel e Ingrid), determinaron gastos de diseño de 1207 m³/s para el periodo de retorno de 50 años y de 1389 m³/s para el periodo de retorno de 100 años, es decir, valores ligeramente menores a los calculados en la Tabla 18 con el estudio regional.

Adicionalmente, se realizó una comparación utilizando un modelo de pronóstico de escurrimiento (MPE) (Domínguez *et al.*, 2008) para estimar el gasto máximo en el río La Sabana, a la altura de la Estación Hidrométrica 19018, con el evento de precipitación total de 619.33 mm ocurrido entre el 12 y 18 de septiembre de 2013 (Tabla 20 y Figura 40). Al considerar los parámetros de la Tabla 21, se obtuvo el hidrograma que se muestra en la Figura 41, con un gasto pico de 1419.42 m³/s, el cual corresponde al gasto máximo instantáneo comprendido entre los periodos de retorno de 50 y 100 años.



Tabla 13. Parámetros de calibración

Parámetros de Calibración	Río La Sabana
ΔT (hrs)	6
Λ	0.2
Fs	1
Fo	0.97
tc (hrs)	5
K(hrs)	4



Tabla 14.- Precipitación y gastos obtenidos en el MPE

19018, Río La Sabana		
Fecha	hp (mm)	Q Total(m ³ /s)
12/09/2013 14:00	0	0
12/09/2013 20:00	17.26	0
13/09/2013 02:00	2.63	3.52
13/09/2013 08:00	0.12	5.19
13/09/2013 14:00	4.72	1.91
13/09/2013 20:00	1.16	2.88
14/09/2013 02:00	32.5	3.34
14/09/2013 08:00	35.6	61.82
14/09/2013 14:00	35.75	200.43
14/09/2013 20:00	81.1	331.45
15/09/2013 02:00	32.59	714.29
15/09/2013 08:00	87.72	776.19
15/09/2013 14:00	101.15	882.25
15/09/2013 20:00	49.7	1419.42
16/09/2013 02:00	40.69	1202.35
16/09/2013 08:00	20.18	688.91
16/09/2013 14:00	24.62	366.67
16/09/2013 20:00	38.55	190.39
17/09/2013 02:00	3.59	312.03
17/09/2013 08:00	9.5	240.62
17/09/2013 14:00	0.2	34.37

17/09/2013 20:00	0	4.91
18/09/2013 02:00	0	0.7

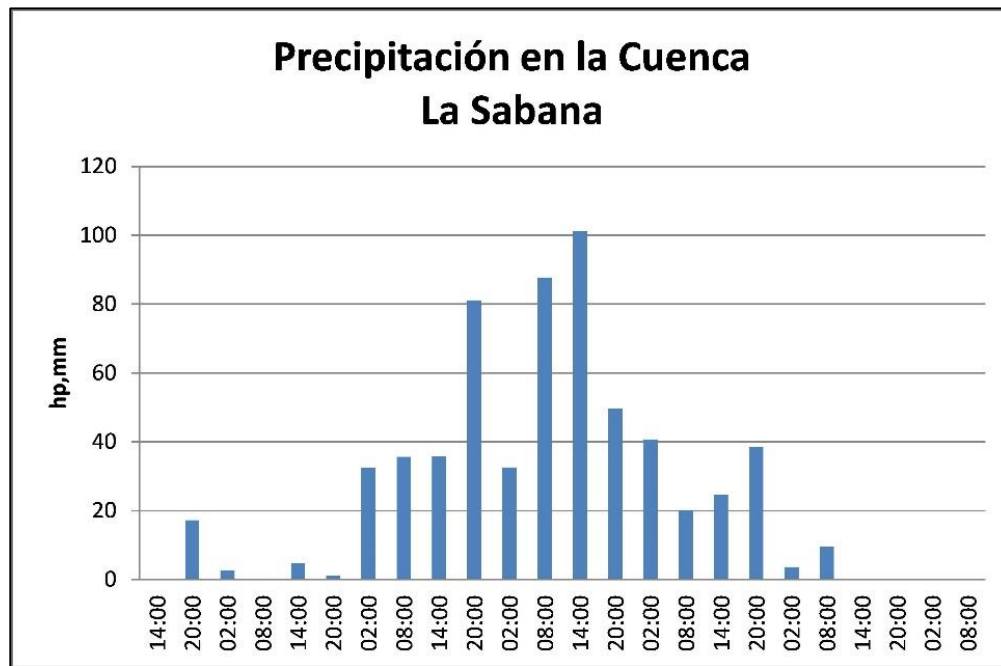


Figura 40.- Precipitación en la Cuenca La Sabana

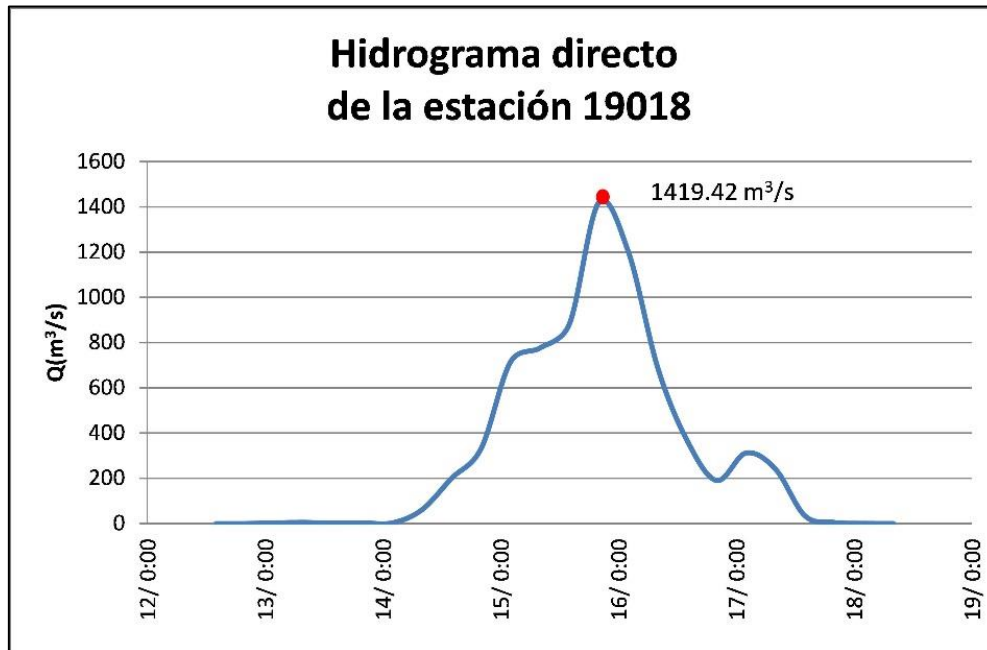


Figura 41.- Hidrograma obtenido a partir de la precipitación

Como se puede observar, el gasto pico que se obtuvo con el modelo de pronóstico de escurrimiento es de $1419.42 \text{ m}^3/\text{s}$, valor que se encuentra entre el obtenido para un periodo de retorno de 50 y 100 años con la metodología descrita, por lo que se puede concluir que la Regionalización que se plantea en este estudio es confiable para poder estimar gastos de diseño, los cuales son de gran importancia para la construcción de obras civiles para la prevención o control de inundaciones derivadas de eventos extraordinarios de precipitación en Regiones Hidrológicas donde no se cuente con datos estadísticos suficientes o confiables.

Tabla 15.- Comparación

Clave	Nombre	Tr	Q de diseño m^3/s , Regionalización	Q de diseño m^3/s , CONAGUA	Q de diseño m^3/s , MPE
		100 años	1660.65	1389	1419.42



19018	Tuncingo	50 años	1350.09	1207	
-------	----------	---------	---------	------	--

CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se propuso un procedimiento que permite estimar avenidas de diseño en sitios con escasa o nula información hidrométrica, a partir de relacionar las características fisiográficas e hidrológicas de regiones homogéneas, observándose que mientras más datos sean conocidos de la región a estudiar, más confiable será el resultado.

La regionalización de datos de escurrimiento en el país permite caracterizar cuencas con comportamiento estadístico similar; la metodología utilizada es simple en su estructura y también se ha visto la utilidad práctica del uso de cómputo evolutivo en la obtención de ecuaciones regionales para estimar los gastos medios



instantáneos en función de las características fisiográficas de las cuencas, como su área, de datos cinemáticos como el tiempo de concentración así como de datos que involucran a la precipitación y la capacidad de infiltración.

En general los coeficientes de determinación que se obtienen considerando estos cuatro aspectos son claramente mayores que cuando sólo se involucra al área y el tiempo de concentración, de tal forma que este incremento justifica el involucrar más parámetros

En este trabajo se utilizó la media de los gastos máximos anuales (MQMIA) como concepto eje, de tal manera que al relacionarlo con características físicas y geográficas medibles en cualquier cuenca (área, tiempo de concentración, promedio espacial de la media de las precipitaciones máximas anuales, espesor de la zona no saturada del suelo) se hace posible estimarlo de forma sencilla, aún para cuencas no aforadas y, por otro lado, al multiplicarlo por los factores o eventos de diseño obtenidos (Tabla 15), se obtiene una estimación de los gastos máximos instantáneos asociados a distintos periodos de retorno.

Por supuesto, los resultados que se obtienen son estimaciones sujetas a cierto grado de imprecisión, como lo muestran, por ejemplo, los coeficientes de determinación indicados en la Tabla 13.

Se recomienda actualizar el estudio periódicamente (por ejemplo cada 5 años, como se sugiere para la revisión de avenidas de diseño).

En esta etapa se compararon los coeficientes de variación en los planos topográficos para determinar la homogeneidad de los subgrupos formados para cada región, se pudo observar que no siempre guardan la relación de ser mayores en los afluentes más alejados e ir disminuyendo conforme se avanza a los cauces



principales, por lo que es conveniente, en una segunda etapa, contemplar la subdivisión de grupos con base solamente en estos coeficientes y por otra revisar si existió algún evento extraordinario que haya afectado la variación de los coeficientes en esta primera etapa.

Como desarrollos futuros se deben buscar modelos regionales más lógicos (por ejemplo en algunos grupos de regiones se obtuvieron exponentes positivos asociados al espesor de la capa no saturada, lo cual no parece lógico) y tratar de simplificar las ecuaciones aprovechando que generalmente el área de la cuenca y el tiempo de concentración están muy correlacionados.

Adicionalmente se pueden obtener coeficientes de escurrimiento, aprovechando que gracias al trabajo de depuración de la información realizada, se cuenta con bases de datos para las más de 300 cuencas analizadas que contienen valores depurados de los gastos máximos anuales instantáneos y para duraciones de 1 a 60 días, así como sus áreas (también depuradas), tiempos de concentración, número de curva, longitud, pendiente y coordenadas geográficas. También se cuenta con valores de lluvia máximos anuales para duraciones de 1 a 60 días depurados para más de dos mil estaciones y las extrapolaciones correspondientes a diversos periodos de retorno y duración.



CAPÍTULO 7.- BIBLIOGRAFÍA

Abreu O. F., Jacobini L. & FALCO P. F. (2008). Comparative Analysis of the Performance OF two Hydrologic Regionalization Methods. International Conference of Agricultural Engineering. XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola.

Allasia, D. & Avruch, G.J. (2000). Regionalización de caudales en la región del Alto Uruguay Río Grande do Sul – Brasil. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.

Ahmad N. H., Othman I. R. & Deni S. M. (2013). Hierarchical Cluster Approach for Regionalization of Peninsular Malaysia based on the Precipitation Amount. Journal of Physics: Conference Series 423, doi:10.1088/1742-6596/423/1/012018

Aparicio M. F. J., (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa, S. A. de C.V. Grupo Noriega Editores. México D.F., 239-270, 13, 19, ISBN 968-183014-8,.

Azevedo, M. F., Demetrius, D. D. & Reis, C. (2008). Stream, Flows Regionalization in watersheds on the right margin of river Araguaia and left margin of the river Tocantins. XXXVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Brazil.



- Byzedi, M., Saghafian, B., Mohammadi, K., & Siosemarde, M. (2014). Regional analysis of streamflow drought: a case study in southwestern Iran. *Environ Earth Sci*, (71), 2955-2972, doi: 10.1007/s 12665-013-2674-7.
- Cabrera, J., Guardado, R., Peláez, R., & González, N. (2004). Regionalización hidrogeológica de la provincia Pinar del río en un SIG. *Minería y Geología*, (1,2).
- Domínguez, M.R. (1981). Análisis Regional de tormentas y avenidas de diseño. Aplicación a la cuenca del Papaloapan. México. Tesis M.I., Universidad Autónoma de México, Fac. de Ingeniería, Posgrado. DEPFI.
- Domínguez, M.R., (1983). Design floods for mixed urban/ rural catchments. *Hydraulics Research Station Wallingford*, (221).
- Domínguez, M. R., Carrizosa, E. E., Fuentes, M. G., & Galván, T. A. (2010). Actualización de mapas de precipitaciones para diferentes periodos de retorno y diferentes duraciones, Elaborado para Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- Domínguez, M.R., Arganis, J.M., González, V.F., Carrizosa, E.E., & Guzmán, G.H. (2013). Regionalización de datos de escurrimientos de las regiones hidrológicas de México para la estimación de avenidas de diseño. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Domínguez, M. R., Esquivel, G.G., Baldemar, M.A., Méndez, A.B., Mendoza, R. A., Arganis, J.M.L., & Carrizosa, E.E. (2008). Manual del Modelo Pronóstico de Escurrimiento MPE. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, UNAM. ISBN 978-607-2-00316-3.
- Domínguez, M.R., Arganis. J. M. L., Capella, V. A., Luna, V.J.A., Fuentes, M.O.A., Carrizosa, E. E., Peña, D. F., Carabela, H. J.C. & Reyes M.H. (2012). Análisis Estadístico. Manual de Diseño de Obras Civiles, Comisión Federal de Electricidad. Hidrotécnica. Hidrología, (A.1.6.).
- Erazo, C.A. (2004). Regionalización de caudales máximos y medios en el Salvador. Servicio Hidrológico Nacional del Salvador. El Salvador.
- Ganancias, M.F. (2010). Evaluación de metodologías de regionalización hidráulica: aplicación a los caudales máximos de cuencas representadas de la región suroeste de la provincia de Córdoba. Argentina. Tesis M.I., Universidad Nacional de Córdoba. 370pp.
- Ghumman A. R., Ahmad M. M., Hashmi H. N. & Kamal M. A. (2011). Regionalization of Hydrologic Parameters of Nash Mode. *Water Resources and the Regime of Water Bodies*. 38(6), 735-744.



González, V. Fernando (1970). Contribución Al Análisis e Frecuencias De Valores Extremos De Los Gastos Máximos En Un Río. Serie Azul, Instituto de Ingeniería, UNAM, 24 pp.

Gottschalk, L. (1985). Hydrological regionalization of Sweden. Hydrological Sciences- Journal-des Sciences Hydrologiques, 30(1).

Hall M. J. & Minns A. W. (1999) The classification of hydrologically homogeneous regions. Hydrological Sciences Journal. 44(5), 693-704.
doi:10.1080/02626669909492268

Heuvelmans G., Muys B. & Feyen J. (2006) Regionalisation of the parameters of a hydrological model: Comparison of linear regression models with artificial neural nets. Journal of Hydrology. 319, 245–265.

Hosking, J. R., Wallis, M. J. R. & Wood, E. F. (1985). An appraisal of the regional flood frequency procedure in the UK Flood Studies Report, Hydrological Sciences Journal, 30 (1), 85-109, doi: 10.1080/02626668509490973.

Isik, S. & Singh, V. (2008). Hydrologic regionalization of watersheds in Turkey. Journal of Hydrologic Engineering, (13), 824-834.

Luna, V. J. A. & Dominguez, M. R. (2013). Un método para el análisis de frecuencia regional de lluvias máximas diarias: aplicación en los Andes bolivianos. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 21(1), 111-124.

Malekinezhad H., Nachtnebe H. P. & Klik A. (2011). Regionalization Approach for Extreme Flood Analysis Using L –moments. Journal of Agricultural Science and Technology. 13,1183-1196.

Moreno P. & Roldán J. (1999) Regionalization of Daily Precipitation Stochastic Model Parameters. Application to the Guadalquivir Valley in Southern Spain. Physics and Chemistry of the Earth. 24(1-2), 65-71.

Nathan, R.J. & McMahon, T.A. (1990). Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalization. Journal of Hydrology, (121), 217-238.

Olguín, G., Rivera, F. & Salas, N. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. Ingeniería Investigación y Tecnología, 12(3).

Jiménez, E. M. (1996). Programa Ax. Área De Riesgos Hidrometeorológicos. Centro Nacional De Prevención De Desastres. México.



Razavi T. & Coulibaly P. (2013). Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*. 18, 958-975.

Sattar Chavoshi, Wan Nor Azmin Sulaiman, Bahram Saghafian, Md. Nasir Bin Sulaiman, Latifah Abd Manaf (2013). Regionalization by fuzzy expert system based approach optimized by genetic algorithm. *Journal of Hydrology*. 486, 271–280.

SRH (1969). *Boletines Hidrológicos*. Tomos diversos.

Zamanillo, E. (2008). *Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos*. Universidad Tecnológica Nacional, Grupo de Investigación en Hidrología e Hidráulica Aplicada (GIHHA), Facultad Regional Concordia Buenos Aires, Argentina.