



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

NUEVOS MODELOS PARA EL CÁLCULO DE LOS ESCURRIMIENTOS
EN LA REPÚBLICA MEXICANA

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A:

ERICK GÓMEZ AGUILAR

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA



Ciudad Universitaria, México, 2014

A Dios, por todas las bendiciones recibidas

A mis papás y hermanas que son el faro que ilumina mi camino y la alegría de mi vida.

A mis maestros que he tenido a lo largo de 18 años, y que hoy se ven representados por el Dr. Ramón Domínguez a quien agradezco su apoyo y guía.

ÍNDICE GENERAL

Introducción	5
Capítulo I. Regionalización	6
1.1 La regionalización en diversas partes del mundo.....	7
1.1.1 Aportaciones del Flood Studies Report.....	13
1.2 Regionalización en la República Mexicana.....	17
1.2.1 Investigaciones previas realizadas en México.....	21
Capítulo II. Conceptos Básicos sobre la Regionalización Hidráulica	27
Capítulo III. Ecuaciones de Regionalización	34
3.1 Ecuación del Instituto de Ingeniería UNAM.....	34
3.2 Cálculo de los Coeficientes involucrados.....	36
en la ecuación de Regionalización	
3.2.1 Regresión Múltiple.....	36
3.2.2 Algoritmos Genéticos.....	38
3.3 Nuevo modelo para el cálculo de los escurrimientos en México.....	39
Capítulo IV. Regionalización en México	42
4.1 Elección de las Regiones Hidrológicas.....	42
4.2 Aplicación de las ecuaciones de regionalización.....	51
Capítulo V. Análisis de las ecuaciones de Regionalización en México	80
5.1 Análisis particular de cada Región Hidrológica.....	80
5.2 Análisis en conjunto de las Regiones Hidrológicas.....	89
Conclusiones	93
Bibliografía	97

Índice de Tablas

Tabla 1.1	Regiones Hidrológicas en México.....	18
Tabla 1.2	Regiones Hidrológico – administrativas de México.....	20
Tabla 2.1	Clasificación del tamaño de una cuenca.....	27
Tabla 4.1	Extensión territorial de la RH 1 – 3.....	42
Tabla 4.2	Extensión territorial de la RH 20 – 21.....	43
Tabla 4.3	Regiones Hidrológicas Seleccionadas.....	44
Tabla 4.4	Región Hidrológica 1 – 3.....	46
Tabla 4.5	Región Hidrológica 9.....	46
Tabla 4.6	Región Hidrológica 10.....	47
Tabla 4.7	Región Hidrológica 20 – 21.....	49
Tabla 4.8	Región Hidrológica 30.....	50
Tabla 4.9	Regresión Múltiple en la RH 1-3.....	52
Tabla 4.10	Coeficientes de la Regresión Múltiple RH 1-3.....	52
Tabla 4.11	Regresión Múltiple RH 1-3.....	53
Tabla 4.12	Límites de los Algoritmos Genéticos RH 1-3.....	54
Tabla 4.13	Algoritmos Genéticos RH 1-3.....	55
Tabla 4.14	Regresión Múltiple en la RH 9.....	57
Tabla 4.15	Coeficientes de la Regresión Múltiple RH 9.....	57
Tabla 4.16	Regresión Múltiple RH 9.....	58
Tabla 4.17	Límites de los Algoritmos Genéticos RH 9.....	59
Tabla 4.18	Algoritmos Genéticos RH 9.....	60
Tabla 4.19	Regresión Múltiple en la RH 10.....	61
Tabla 4.20	Coeficientes de la Regresión Múltiple RH 10.....	63
Tabla 4.21	Regresión Múltiple RH 10.....	63

Tabla 4.22	Límites de los Algoritmos Genéticos RH 10.....	66
Tabla 4.23	Algoritmos Genéticos RH 10.....	66
Tabla 4.24	Regresión Múltiple en la RH 20-21.....	69
Tabla 4.25	Coeficientes de la Regresión Múltiple RH 20-21.....	70
Tabla 4.26	Regresión Múltiple RH 20-21.....	71
Tabla 4.27	Límites de los Algoritmos Genéticos RH 20-21.....	72
Tabla 4.28	Algoritmos Genéticos RH 20-21.....	73
Tabla 4.29	Regresión Múltiple en la RH 30.....	75
Tabla 4.30	Coeficientes de la Regresión Múltiple RH 30.....	76
Tabla 4.31	Regresión Múltiple RH 30.....	76
Tabla 4.32	Límites de los Algoritmos Genéticos RH 30.....	77
Tabla 4.33	Algoritmos Genéticos RH 30.....	78
Tabla 5.1	Resumen de la RH 1 -3.....	80
Tabla 5.2	Resumen de la RH 9.....	82
Tabla 5.3	Resumen de la RH 10.....	84
Tabla 5.4	Resumen de la RH 20-21.....	86
Tabla 5.5	Resumen de la RH 30.....	87
Tabla 5.6	Comparación de ecuaciones generadas para cada Región.....	89
Tabla 5.7	Ecuaciones generadas por Algoritmos Genéticos..... para las Regiones Hidrológicas	90
Tabla 5.8	Coeficiente de determinación de las Regiones Hidrológicas.....	91
Tabla 5.9	Parámetros fisiográficos de las Regiones Hidrológicas.....	92

INTRODUCCIÓN

Esta tesis aborda uno de los problemas más usuales durante la planeación o diseño de obras hidráulicas, que es la falta de información hidrológica en el sitio donde se desea construir el proyecto.

El concepto de Regionalización hidrológica pretende brindar las herramientas para obtener la información de precipitaciones o de gastos que se pueden llegar a presentar en la zona del proyecto, lo anterior con base en una búsqueda exhaustiva de información hidrológica en una cuenca externa a la zona de estudio, pero con similitudes en su orografía y características hidrológicas.

En el primer capítulo de esta tesis se plantea el concepto de Regionalización, cómo surge el concepto y cómo ha evolucionado con el paso de los años, además se explica la forma en que la regionalización ha sido utilizada en diferentes partes del mundo y para diferentes fines; lo anterior se comprueba con los numerosos artículos publicados en revistas especializadas.

De igual forma se retoma la problemática actual en México en materia de registros hidrológicos y la necesidad de realizar un estudio de regionalización para cada una de las Regiones Hidrológicas con las que cuenta el país; para profundizar en el tema se incluyen investigaciones realizadas en México en esta materia.

En el capítulo 2, se explican los aspectos que afectan la regionalización, como la homogeneidad en las cuentas en aspectos fisiográficos o hídricos, y los cambios que se generan en las ecuaciones.

El capítulo tercero tiene como objetivo el desarrollo de las ecuaciones propuestas para el estudio de regionalización, los elementos que las componen y las diferencian, además de retomar las diversas herramientas de análisis para obtener los resultados.

En el siguiente capítulo “Regionalización en México”, se explica la forma de agrupar las zonas de estudio, se desarrolla una ecuación para cada región hidrológica que se analizará y se comparan los resultados de las dos ecuaciones previamente propuestas.

Finalmente en el capítulo 5, se presentan los resultados de la aplicación de las ecuaciones de regionalización en las zonas de estudio, las diferencias en las ecuaciones y los beneficios y limitantes que pueden tener cada una.

Para concluir, esta tesis presenta los resultados finales de la investigación, así como posibles recomendaciones para futuras ecuaciones de regionalización.

Capítulo I Regionalización

Durante años la construcción de obras hidráulicas y en particular la determinación de la avenida máxima de diseño estuvieron fundamentados en criterios históricos, diseñando para la máxima avenida registrada, lo anterior suponía unos periodos de retorno muy cortos. Estos periodos probablemente no excedían los 500 años y en consecuencia las obras hidráulicas eran de menor dimensión y con factores de seguridad no tan elevados.

Actualmente es imprescindible para cualquier obra hidráulica que se pretenda construir, determinar con la mayor exactitud posible la máxima avenida que se pudiera presentar, para bajo esas condiciones tan desfavorables iniciar el proceso de dimensionamiento. Ejemplo de ello son las presas, en las cuales para el diseño de las obras de excedencias son usuales los periodos de retorno de 10 000 años como base para su análisis.¹

Lo expuesto anteriormente fundamenta la importancia de tener registros hidrológicos confiables y abundantes, que permitan realizar las mejores estimaciones para el diseño.

Pese a los esfuerzos que se realizan aún sigue siendo persistente la falta de información hidrológica en abundantes sitios, o bien puede existir dicha información pero ser relativamente nueva y por lo tanto no contar con registros hidrológicos extensos o como ocurre en abundantes casos, la información presentada puede llegar a tener errores o no tener registros completos.

Y es precisamente bajo estas condiciones que surge el concepto de regionalización hidrológica, la cual pretende completar o en su caso brindar todos los registros hidrológicos necesarios para la construcción de una obra hidráulica en un sitio donde no se cuente con información.

La regionalización está fundamentada en dos regiones de estudio, una que es la que no tiene información hidrológica, es escasa o deficiente y en general es la situación del lugar donde se pretende construir, a la cual denominaremos zona de estudio A. Y una segunda zona de estudio, que cuenta que registros hidrológicos suficientes para poder generar una ecuación que la represente, esta zona la llamaremos B.

Para poder transponer la ecuación generada en la zona B a la zona A, es necesario que se cumplan con ciertas similitudes hidráulicas como de precipitaciones o de

¹ Sotelo, A.G., (1994) "*Apuntes de Hidráulica II. Capítulo VIII. Diseño Hidráulico de Obras*". Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

gastos, al igual que características similares en su fisiografía como el área, la pendiente, tiempo de concentración entre otros factores.

Una vez validada la homogeneidad de las zonas de estudio, se podrá transponer la ecuación generada en la zona B, a la zona A, con lo cual se podrá completar los registros históricos o en su caso, tomar como base la ecuación generada y en función de esta poder diseñar.

Con el enfoque regional que se propone se trata de incorporar los datos de las varias estaciones hidrométricas en una sola muestra y se pretende contar con mayor cantidad de información y como consecuencia de esto, estimar el gasto esperado en un sitio donde la información hidrométrica es escasa o inexistente, el resultado logrado es en general más confiable que el que obtendría estudiando cada estación por separado.

La metodología más usual para la determinación de estos caudales máximo, es en función de la estadística, la cual ajusta los datos registrados en una estación hidrométrica a una función de distribución y determina los valores para diferentes periodos de retorno.

1.1 La regionalización en diversas partes del mundo

La regionalización ha sido utilizada en diferentes latitudes del orbe y para muy variados fines, prueba de ello son los numerosos artículos publicados en revistas especializadas.

Pese a que cada investigación está enfocada a objetivos diferentes, todos comparten como punto de partida, la falta de información hidrológica.

A continuación se presentan algunas de las investigaciones realizadas:

En Turquía una serie de proyectos hidroeléctricos que se pretenden construir se enfrentan a un serio obstáculo, que es la falta o las escasas estaciones de aforo en los ríos donde se desean construir los proyectos. Lo anterior da origen a múltiples estudios, entre los cuales está el artículo titulado “La Regionalización hidrológica en cuencas hidrográficas en Turquía”.²

• ² Isik, S. and Singh, V., (2008), “*Hydrologic regionalization of watersheds in Turkey*”. Journal of Hydrologic Engineering.13:824-834.

Esta investigación tiene como objetivo presentar un enfoque que combine tres técnicas de regionalización para obtener regiones homogéneas y calcular los caudales en sitios no aforados. Estas técnicas incluyen un algoritmo de agrupamiento jerárquico de aglomeración, un método de partición k-means y un método de curva de caudales. La investigación se basó en 26 cuencas hidrológicas con 1410 sitios de aforo.

El estudio parte de la premisa que la respuesta hidrológica de una cuenca es función de numerosos factores, como pudieran ser: la precipitación, el tamaño y topografía de la cuenca, el suelo y la litografía además de la vegetación entre otros.

Con el fin de estimar los caudales en sitios no aforados, se desarrollaron una serie de ecuaciones que relacionan las cuencas y sus características hídricas con coeficientes empíricos. Ejemplo de lo anterior es la siguiente ecuación:

$$Q = kW_1^{a_1}W_2^{a_2}W_3^{a_3} \dots W_n^{a_n}$$

Dónde:

Q; Gasto

W; características hidrológicas de la cuenca

a; coeficientes empíricos

Como se puede observar entre más parámetros se involucren en la ecuación mayor complejidad adquiere, pero también los resultados arrojados son más certeros.

El resultado de la investigación realizada en las diferentes cuencas hidrológicas de Turquía concluye que cada grupo homogéneo es proporcional a sus características fisiográficas, al clima y al patrón de uso de suelo. También recomienda para estudios más detallados, realizar una división de los grupos homogéneos, para crear subgrupos con menor área de análisis, lo que llevaría a obtener gastos mucho más específicos.

En el artículo "Análisis Regional de los caudales sequía: un estudio del caso en el sureste de Irán".³ Se retoma el concepto de regionalización bajo un enfoque diferente, su uso es para estimar algunos elementos de las sequías.

• ³ Byzedi, M., Saghafian, B., Mohammadi, K. and Siosemarde, M. **"Regional analysis of streamflow drought: a case study in southwestern Iran"**. Environ Earth Sci (2014) 71:2955-2972. DOI 10.1007/s12665-013-2674-7.

Las sequías afectan más gravemente las regiones áridas y semiáridas, tal es el caso de Irán, donde la mayor parte de su territorio presenta estas condiciones climáticas, y donde los recursos hídricos no pueden satisfacer las demandas aún en condiciones normales, por lo que se agravan los efectos con una sequía.

Irán experimenta con frecuencia sequías de diversas magnitudes y duraciones, lo que genera una competencia del recurso hídrico en diferentes sectores, generando un estrés social.

Por lo anterior el estudio de las sequías y en particular conocer la información hidrológica y su comportamiento con el tiempo, son necesarios para una planificación de los recursos hidráulicos y una adecuada gestión que ayude a reducir los efectos nocivos de la escasez del agua.

Para ayudar a mitigar los efectos de las sequias en Irán, fue necesario hacer una serie de proyectos de transferencia de agua, junto con una planificación de uso en conjunto de las aguas superficiales y subterráneas.

La regionalización en este caso particular fue utilizada para estimar los posibles índices de una sequía en zonas que no contaban con información hidrológica suficiente.

Para poder transponer los efectos de las sequías de un lugar con que contaba con información a otro donde no existía, fue necesario realizar una homogenización de las cuencas en estudio, donde factores como el área de la cuenca, la precipitación total registrada, la densidad de drenaje y condiciones climáticas fueron los que rigieron la clasificación. El estudio se realizó a través de una serie de modelos de análisis de multivariado.

El resultado de las investigaciones fue el surgimiento de un índice de sequías, el cual aumenta desde cuencas en altitudes elevadas hasta cuencas con elevaciones menores.

En muchas regiones de América Latina es común la falta de mediciones sistemáticas de variables hidrológicas, lo anterior conlleva a aplicar fórmulas y procedimientos que permitan “completar” series temporales de esos datos.

Como se explicó anteriormente el fundamento de la regionalización consiste en utilizar los parámetros generales de una región para estimar los datos de otra, tomando como hipótesis que existe correlación entre los parámetros macro y las variables a menor escala.

Todo lo anterior se ve reflejado en el artículo "Regionalización de caudales en la Región del Alto Uruguay, Río Grande do Sul – Brasil."⁴ En este se detalla cómo se efectuó la regionalización de datos hidrológicos a través de regresión lineal, tomando como variables independientes el área, la precipitación media anual, y el número de confluencias, y como variable independiente los caudales medios anuales.

Se inició ajustando a una distribución estadística los datos hidrológicos de una región analizada, obteniendo parámetros genéricos, mismos que fueron relacionados a características físicas y meteorológicas de las cuencas.

Además se regionalizaron los caudales utilizando ecuaciones de tipo potencial como la siguiente:

$$Q = a \times A^b \times P^c \times L^d \times S^e \times D^f$$

Donde a,b,c,d,e, y f son parámetros, mientras que A,P,L,S y D representan características físicas.

El ajuste de los parámetros fue hecho con base en el método "Forward" (regresión lineal de pasos adelantada), donde se supone que la línea recta es un modelo adecuado para representar la relación entre las variables. En la regresión múltiple se va incrementando sucesivamente el número de variables independientes y se verifica cómo mejora el ajuste. Por lo tanto entre mayor sean las variables a considerar aumenta el grado de complejidad del análisis, pero a su vez genera mejores resultados.

La investigación concluye que el modelo que mejor explicó el gasto es aquella que incluye como variable independiente al área de la cuenca y la precipitación media anual quedando como ecuación la siguiente:

$$Q = 2.67 \times 10^{-6} \times A^{1.01} \times P^{1.228}$$

Donde A representa al área en km² y P a la precipitación en mm.

• ⁴ 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.

Otro ejemplo de la utilización de la regionalización es la investigación titulada “Regionalización de los gastos de la cuenca entre la margen derecha del río Araguaia y la margen izquierda del río Tocantins”⁵ de igual manera en ubicado en Brasil.

En esta ocasión la extensa extensión territorial del estado Tocantins se alió a la escasez de información hidrométrica, situaciones que fueron el punto de partida de esta información la cual tiene como objetivo brindar herramientas que ayuden a las dependencias gubernamentales a tener una mejor gestión de los recursos hidráulicos, y generar un atlas hidrológico.

El estudio parte de la premisa que el conocimiento de la disponibilidad del agua es parte fundamental de los estudios hidrológicos, y que la regionalización de los gastos, es un proceso que optimiza la información existente, donde se extrapolan las similitudes de la dinámica hidráulica de sitios aforados a sitios sin información.

La información del área en la zona de estudio que es de 138 000 km², fue el punto de partida de la investigación, en donde además se obtuvieron las características físicas de la zona como el área de drenaje, la longitud del cauce principal, la densidad de drenaje además de la precipitación media anual.

Se utilizó una metodología aplicando ecuaciones de regresión para áreas hídricamente homogéneas, donde se consideró un periodo de seis meses, además del periodo anual en la obtención de las caudales mínimos.

Como resultado de la investigación se obtuvieron ecuaciones regionales para estimar los flujos anuales y semestrales de gasto mínimo.

Finalmente se presenta el estudio “Regionalización de caudales máximos y medios en el Salvador”⁶ donde se retoma la problemática de las estimaciones de los gastos en cuencas que no poseen mediciones hidrométricas. La investigación presenta una

-
- ⁵ 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 Congreso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Brazil.
 - ⁶ Erazo, C.A., (2004), **“Regionalización de caudales máximos y medios en el Salvador”**. Servicio Hidrológico Nacional del Salvador, El Salvador, Salvador.

metodología y los resultados de la regionalización de caudales máximos y medios, llevada a cabo en base en registros hidrométricos históricos.

Esta investigación aborda la regionalización de los caudales máximos, que permite la estimación de los gastos máximos para cualquier parte del Salvador para periodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 50 y 100 años, además de conocer los gastos medios anuales y mensuales en diferentes cuencas.

Para establecer las ecuaciones de regionalización y sus factores de ajuste, se inició con un análisis de la información hidrométrica para establecer la confiabilidad de la información de los caudales máximos registrados en las estaciones analizadas.

Después se delimitaron las regiones hidrológicamente homogéneas, las cuales se establecieron con base en los mapas de uso de suelo, geología, y respuesta hidráulica de las cuencas.

Una vez obtenidos los resultados anteriores se buscó la función de distribución que mejor ajustara a la serie de datos de gastos máximos de cada región y se determinaron los factores para el cálculo de los caudales para cada periodo de retorno.

Finalmente se determinaron las relaciones entre las características fisiográficas de las cuencas y los gastos máximos.

Los resultados de las investigaciones permitieron tener al Salvador un atlas hidrológico, y con ello poder estimar futuras avenidas y tomar las precauciones necesarias. De igual manera brindarán certidumbre a futuros proyectos en materia hídrica y son un apoyo para su gestión.

1.1.1 Flood Studies Report

El Flood Studies Report fue el resultado de una exhaustiva investigación realizada en el Reino Unido en el año de 1975, y que tuvo como objeto generar nuevas técnicas para la predicción de flujos que se pueden presentar en una determinada zona de estudio.

La investigación está conformada por un total de cinco volúmenes, en donde se explica detalladamente las técnicas para la estimación de flujos, además de estar presentes los argumentos y análisis que condujeron a ellas.

Es necesario destacar que esta investigación es pionera a nivel internacional en lo relativo al cálculo de los flujos que se pudieran llegar a presentar, a través de concepto de regionalización y sentó las bases para futuros trabajos que fueron modificando los resultados originales, y con ello perfeccionando los modelos de regionalización.

Esta investigación deja muy en claro que se limita a proporcionar una nueva forma para estimación hidrológica, en donde aspectos estadísticos y resultados de análisis de hidrogramas pueden llegar a proporcionar cierta certidumbre de las futuras respuestas ante ciertos periodos de retorno; pero deja al criterio de los ingenieros la supervisión del riesgo en cada obra y en su caso se sujeta a la legislación vigente en cada lugar.

El ingeniero tendrá que determinar las especificaciones de diseño de acuerdo a políticas o códigos vigentes, y considerar un análisis económico. Tomando en cuenta un periodo de retorno para cada obra en particular, lo cual implica que se acepta un riesgo, que la avenida que se pueda presentar exceda al generado por dicho periodo de retorno durante la vida del proyecto.

Para la estimación de futuras avenidas, el Flood Studies Report propone dos caminos a seguir, por medio de un método estadístico y por el método del hidrograma unitario.

El primero que se desarrolla es a través de un enfoque estadístico, el cual lo recomienda cuando el proyecto no requiera el flujo máximo ni la forma del hidrograma que puede tomar, pero si sus magnitudes para diferentes periodos de retorno.

Y son estos periodos de retorno los que originan diversas maneras de hacer el cálculo, la investigación citada hace referencia a cuatro diferentes periodos con sus respectivas particularidades, mismas que a continuación se desarrollan:

Para periodos de retorno de 1 a 3 años, se recomienda que la estimación del gasto medio sea a través de las características fisiográficas de la zona en estudio, y una vez obtenidos se compararán con los gastos medios registrado.

Para periodos de retorno que comprenden lapsos de 3 a 10 años, existen tres maneras del calcular el gasto medio, uno es utilizado la técnica anterior, en donde las características de la cuenca juegan un papel preponderante.

La segunda opción es la estimación de los gastos medios en función de los gastos máximos mensuales, y nuevamente se comparan con los registrados.

Y finalmente la última forma planteada para el cálculo es la estimación del gasto medio a través de los picos registrados en años anteriores.

Para periodos de retorno de 10 a 25 años, se exhorta para que el cálculo del gasto medio se por medio de los registros máximo anuales.

Para concluir, se presentan los periodos de retorno mayores a 25 años donde se tendría que adaptar a la distribución general de los valores extremos para los máximos anuales y con ello estimar el gasto para el periodo de retorno solicitado.

Sin excepción del periodo de retorno que se analice, el método estadístico especifica que si se necesita el volumen del flujo para una cierta duración se deberá calcular el gasto medio para dicha duración o en su caso tomar en cuenta una curva de reducción del gasto medio para varias duraciones.

El segundo método que se desarrolla es a través de un Hidrograma Unitario, en donde se parte de una incógnita. ¿Existen registros hidrométricos?, si la respuesta es sí, se deberá generar un hidrograma unitario en función de los valores de precipitación y escurrimiento.

Por el contrario, si no se cuenta con información se tendrá que generar un hidrograma unitario sintético.

Y en ambos casos se tendrá que determinar la duración de la tormenta, la precipitación registrada para un periodo de retorno, generar en su caso un factor de reducción de área y de amplificación de tormenta, además de deducir las pérdidas por las características de la cuenca, el índice de humedad entre otras.

Retomando el cálculo de futuros escurrimiento a través de las características de la cuenca en estudio, es necesario profundizar en el tema y destacar que es recomendable cuando no existan registros o son deficientes, y al ser esta la situación de una gran parte de los proyectos se convierte en una herramienta útil.

El Flood Studies Report propone el cálculo de los gastos en función de nuevos parámetros pertenecientes a la zona en estudios, los cuales se presenta a continuación seguida de su abreviatura y en su caso las unidades en las que se miden:

Factor	Abreviatura	Unidad
• Área	Á	km ²
• Longitud del cauce	L	km
• Pendiente del cauce	S	m /km
• Frecuencia de corriente	FC	uniones /km ²
• Índice de sólidos	IS	
• Índice de lagos	IL	
• Desarrollo Urbano	DU	
• Precipitación media anual	hp media	mm
• Precipitación neta de 1 día para un periodo de retorno de 5 años	hpn	mm

El Flood Studies Report, proporciona la ecuación siguiente:

$$Q_{medio} = 0.0201 \times A^{0.94} \times FC^{0.27} \times S^{0.16} \times IS^{1.23} \times hpn^{1.03} \times (1 + IL)^{-0.85}$$

Cabe mencionar que cada parámetro aquí establecido puede tener cambios en sus respectivos exponentes de acuerdo a clasificaciones subsecuentes que se proporcionan.

De igual manera la investigación presenta diversas ecuaciones para fines muy específicos, como por ejemplo una ecuación para el cálculo del flujo si se cuenta con la información de los registros máximos anuales, y otra para el cálculo de los gastos si se necesitan diferentes duraciones.

Diseño de inundaciones para cuencas urbanas, rurales y mixtas

Esta investigación fue realizada por el Dr. Ramón Domínguez Mora en el Febrero de 1983, representa un importante aporte para la Regionalización ya que establece algunos cambios a las ecuaciones del Flood Studies Report.⁷

La investigación deja claro que existen dos antecedentes fundamentales para entender a la Regionalización, el Flood Studies Report y una investigación para el diseño y análisis de predicción de tormentas enfocadas al drenaje.

Adicionalmente tuvo como propósito generar un método para la estimación de los gastos para cualquier periodo de retorno, y en cualquier cuenca (urbana, rural o mixta), donde no existe información de los gastos.

El procedimiento de cálculo inicia con la obtención del gasto medio anual y posteriormente se estima el gasto a presentarse para un periodo de retorno, esto tomando en cuenta una relación entre el gasto a un periodo de retorno y el gasto medio.

Se tiene que destacar que el Flood Studies Report tomó en cuenta para su análisis 533 cuencas cuyas áreas variaban de 0.048 a 9868 km², y con ello tomar prácticamente todas las posibles cuencas, y genera una ecuación para la estimación del gasto medio anual en función de las características físicas de las cuencas.

Además la magnitud del gasto a diferentes periodos de retorno es obtenido en términos del gasto medio anual, usando un factor de amplificación que se proporciona en unas tablas.

La investigación propone cambios a las formulas previamente establecidas, como lo son coeficientes para el cálculo de los gastos medios anuales en cuencas rurales, en donde aspectos como la precipitación media de un día para un periodo de retorno de 5 años tienen modificaciones, esto al igual que el exponente del área al pasar de 0.94 a 0.8 para cuencas rurales.

De igual manera hay modificaciones según el tipo de urbanización de las cuencas, ya que el gasto medio anual se ve directamente afectado al haber cambios en los coeficientes de escurrimientos presentados en estas cuencas. Lo anterior implica un aumento en el pico del hidrograma esperado.

Vale la pena destacar que el incremento en el coeficiente de escurrimiento se genera por una reducción en el área de infiltración, situación que es recurrente en

• ⁷ Dominguez, M.R., (1983), "*Design floods for mixed urban/ rural catchments*". Universidad Nacional Autónoma de México. Report No. IT 221.

zonas urbanas. De igual manera también hay cambios en el tiempo de concentración, ya que se ve reducido.

De igual manera la investigación propone ajustes al método del hidrograma unitario.

Pero sin lugar a duda la aportación más importante hecha por el autor, es demostrar que se pueden generar cambios a las ecuaciones de regionalización y que éstas se encuentran en función de muy diversos factores, mismos que cambian en cada zona y generan una nueva ecuación.

1.2 Regionalización en la República Mexicana

Riesgos asociados a sequía e inundaciones se podrían ver intensificados en su magnitud, duración y frecuencia en años venideros como consecuencia del cambio climático. Aunado a lo anterior el territorio mexicano está expuesto a eventos hidrometeorológicos extremos, riesgos que en combinación con la vulnerabilidad de la infraestructura y la operación de sistemas hidráulicos pueden llegar a ser un gran problema para el país.

Para hacer frente a los retos en materia hidráulica se ha implementado el Programa Nacional de Seguridad de Infraestructura para el Control de Inundaciones (INFRASEGURA)⁸, mismo que pretende brindar certidumbre a las acciones que se deberán ejecutar en materia hidráulica.

En México están operando alrededor de 5000 presas, de las cuales 600 están catalogadas como grandes presas, de acuerdo con la ICOLD (International Commission on Large Dams, por su siglas en inglés) y el resto chicas o medianas y para las cuales no se cuenta con un registro de escurrimientos históricos que permita hacer un análisis estadístico confiable para revisar sus avenidas de diseño.

Por otra parte, al ser presas relativamente chicas, en muchos casos la estimación de dichas avenidas para periodos de retorno no muy grandes (hasta los 200 años) es útil para estudiar la confiabilidad de sus obras de excedencias y estimar los gastos de descarga correspondientes y sus efectos en zonas afectables aguas abajo.

Todo lo anterior hace imprescindible contar un estudio que permita disponer de modelos regionales para estimar de manera confiable avenidas de diseño para periodos de retorno menores a 200 años, basados en parámetros característicos de

⁸ Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

las diversas regiones que están presentes en México, como lo son su fisiografía, la infiltración, las precipitaciones registradas y por su puesto el área de las regiones, entre otros más.

Actualmente, 2014, y 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 y/o subdividido en cuencas hidrológicas.

Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas, misma que se presentan en la tabla 1.1

Tabla 1. 1 Regiones Hidrológicas en México

Nombre de región hidrológica	Extensión territorial continental (km ²)	Número de cuencas hidrológicas
1. B.C. Noroeste	28 492	16
2. B.C. Centro-Oeste	44 314	16
3. B.C. Suroeste	29 722	15
4. B.C. Noreste	14 418	8
5. B.C. Centro-Este	13 626	15
6. B.C. Sureste	11 558	14
7. Río Colorado	6 911	4
8. Sonora Norte	61 429	5
9. Sonora Sur	139 370	16
10. Sinaloa	103 483	23
11. Presidio-San Pedro	51 717	23
12. Lerma-Santiago	132 916	58
13. Río Huicicila	5 225	6
14. Río Ameca	12 255	9
15. Costa de Jalisco	12 967	11
16. Armería-Coahuayana	17 628	10
17. Costa de Michoacán	9 205	6
18. Balsas	118 268	15
19. Costa Grande de Guerrero	12 132	28
20. Costa Chica de Guerrero	39 936	32
21. Costa de Oaxaca	10 514	19
22. Tehuantepec	16 363	15
23. Costa de Chiapas	12 293	25
24. Bravo-Conchos	229 740	37
25. San Fernando-Soto La Marina	54 961	45
26. Pánuco	96 989	77

27. Norte de Veracruz	26 592	12
28. Papaloapan	57 355	18
29. Coatzacoalcos	30 217	15
30. Grijalva-Usumacinta	102 465	83
31. Yucatán Oeste	25 443	2
32. Yucatán Norte	58 135	0
33. Yucatán Este	38 308	1
34. Cuencas Cerradas del Norte	90 829	22
35. Mapimí	62 639	6
36. Nazas-Aguanaval	93 032	16
37. El Salado	87 801	8

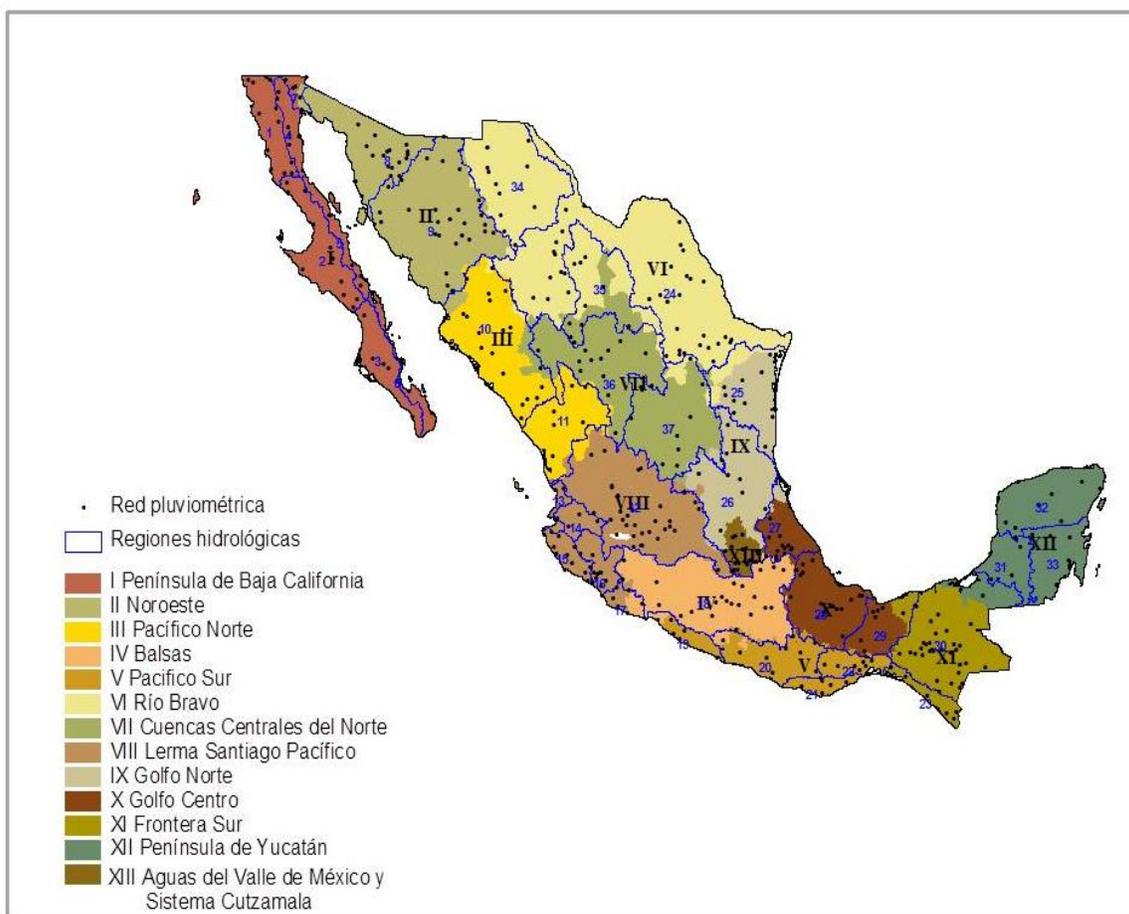


Figura 1.1 Regiones Hidrológico Administrativas de México

A su vez el país se ha dividido en 13 regiones hidrológico-administrativas, las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas las unidades básicas de gestión de los recursos hídricos, sus límites respetan los municipales, para facilitar la administración e integración de la información socioeconómica.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es el órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México, desempeña sus funciones a través de estos 13 organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son las regiones hidrológico-administrativas.

Tabla 1.2 Regiones Hidrológico- administrativas de México

No.	Región hidrológico-administrativa	Superficie continental (km ²)
1	Península de Baja California	156 500
2	Noroeste	197 523
3	Pacífico Norte	150 524
4	Balsas	116 104
5	Pacífico Sur	82 844
6	Río Bravo	388 750
7	Cuencas Centrales del Norte	185 813
8	Lerma Santiago Pacífico	191 374
9	Golfo Norte	125 778
10	Golfo Centro	102 225
11	Frontera Sur	99 328
12	Península de Yucatán	141 367
13	Valle de México	18 110
	Total	1 956 239

Para el año 2010, CONAGUA reportaba que contaba con 1471 estaciones hidrométricas repartidas en todo el territorio nacional, sin embargo en las regiones hidrológico administrativas IV, VIII, X, y XI concentran la mayor parte de las estaciones, en contraste las regiones I,VI,VII,IX y XII presentan un importante déficit de estaciones hidrométricas.

Del total de las estaciones hidrométricas sólo 309 reportaron tener un registro continuo de más de 20 años de gasto máximos instantáneos, además de estar ubicadas en cuencas vírgenes, lo anterior hace referencia a que no existan almacenamientos importantes que pudieran distorsionar la información; consideraciones que son el fundamento para la selecciones de estaciones hidrométricas.

Por todo lo antes mencionado, un estudio de regionalización hidrológica en México es indispensable, ya que pese a los esfuerzos realizados en años recientes para ampliar la base de información de los escurrimientos, las estaciones hidrométricas con un registro histórico detallado son escasas, además que el país cuenta numerosas obras hidráulicas que necesitan revisar el funcionamiento, y con este estudio, se podrán conocer con mayor precisión las zonas de inundación, o las áreas vulnerables ante eventos hidrológicos extremos.

La regionalización hidráulica que propone esta tesis, está sustentada en ecuaciones que permiten estimar posibles gastos que se pudieran presentar en zonas donde no existe información hidrológica o es insuficiente, en función de parámetros fisiográficos e hidrológicos representativos de cada zona de análisis.

1.2.1 Investigaciones previas realizadas en México

a) Análisis Regional de Tormentas y Avenidas de diseño

Aplicación a la cuenca del Papaloapan

Este trabajo fue realizado por el Dr. Ramón Domínguez Mora y es sin lugar a duda uno de los principales pilares en los que se apoya esta tesis. Vale la pena mencionar que fue desarrollado en el año de 1981 y es uno de los pioneros en la regionalización en México.⁹

La investigación tuvo como objeto desarrollar los estudios de tormentas y avenidas para el diseño con una base regional, evitando con ello la falta de uniformidad y las incongruencias a las que es propenso un estudio de problemas aislados.

• ⁹ Domínguez, M.R., (1981), "*Análisis Regional de tormentas y avenidas de diseño. Aplicación a la cuenca del Papaloapan*". México.

En esos años como hoy existen tres principales formas para obtener avenidas de diseño: mediante la regionalización de las características estadísticas de los gastos máximos, mediante métodos hidrometeorológicos y mediante métodos empíricos.

El procedimiento planteado pretende lograr que los resultados correspondientes a los diversos sitios de una región en estudio fueran congruentes entre sí, lo cual no excluye que los resultados arrojados por la regionalización no sean complementados de acuerdo a las especificaciones particulares en cada caso.

Para iniciar el proceso de regionalización es indispensable conocer la información disponible, para que en base a ella sea posible elegir el método más apropiado para cada caso.

La información con la que se puede disponer, se clasifica en cuatro áreas:

1. Climatológica: conformada por datos de precipitación, vientos, temperatura, humedad, entre otros.
2. Hidrométrica: basados en la información de los aforos realizados en las estaciones hidrométricas.
3. Datos fisiográficos: los planos topográficos, el área de las cuencas y subcuencas, además de las longitudes y pendientes de los causes, entre otras muy variadas características se aglutinan en esta clasificación.
4. Datos Generales: principalmente hace referencia a la información que se pueda obtener de las avenidas históricas, así como zonas de inundación.

La obtención de los gastos de diseño se puede obtener a partir de tres principales formas:

- a través de fórmulas empíricas
- mediante el uso de métodos hidrometeorológicos
- utilizando métodos estadísticos y de regionalización

Mismos que son descritos de forma general.

Métodos basados en Fórmulas Empíricas: utilizan fórmulas obtenidas en cualquier otra región, que relacionen las características fisiográficas y de precipitación con los valores de gastos de diseño. Son útiles cuando la información hidrométrica de la zona no es confiable.

Métodos hidrometeorológicos: este método se basa en caracterizar las tormentas más importantes y determinar la forma en que la precipitación es modificada por la

cuenca hasta producir las avenidas. Lo anterior a través de un procesamiento de información hidrométrica y meteorológica.

Métodos estadísticos y de regionalización: es común que para un proyecto específico se tomen como referencia los análisis de frecuencia de los gastos máximos anuales registrados en una estación hidrométrica como herramienta para obtener los gastos de diseño asociados a proyectos específicos. Sin embargo, el análisis aislado de casa estación puede conducir a resultados poco consistentes y únicamente ser aplicado en estaciones con muchos años de registros.

El autor define la regionalización de gastos máximos como: la expresión de los gastos máximos o sus características estadísticas de una zona en estudios, en términos de los parámetros fisiográficos y de precipitación de las subcuencas, con lo cual equivale a obtener fórmulas empíricas válidas para la región de estudio.

El estudio de regionalización propuesto plantea expresar como variable dependiente a las características fisiográficas y de precipitación y no a los gastos máximos con lo cual se obtienen varias ventajas como las siguientes:

Si las diferencias entre los parámetros estadísticos pueden ser explicadas en términos de las características fisiográficas y de precipitación, es posible transformar los valores de los gastos máximos para establecer una muestra homogénea, compuesta por tantos valores como estaciones se tengan, y estimar con ella el gasto de diseño en la estación que se requiera.

Este procedimiento permite estimaciones más estables y los resultados obtenidos para las diferentes estaciones serán congruentes entre sí.

Además que será posible estimar los gastos de diseño para diferentes periodos de retorno, en estaciones en las que no se tiene un registro suficientemente largo de los gastos máximo ocurridos.

Este estudio aborda diferentes temas, uno de los cuales es el Análisis Meteorológico, mismo que se realizó a la cuenca del Papaloapan con el objetivo de caracterizar estadísticamente las precipitaciones observadas en la región y definir un modelo de tormentas más importantes. En donde teóricamente maximizando los parámetros del modelo sería posible determinar la tormenta máxima que podría presentarse en la cuenca.

Para llevar a cabo el anterior análisis se identificaron las principales tormentas, tanto en magnitud como en temporalidad, tomando en muchas ocasiones como base informes de inundaciones.

Además se utilizaron las alturas de lluvia máxima anuales con periodos de retorno de 10 años y duración de 24 horas como indicadores regionales.

No se podría entender los estudios de regionalización sin el concepto de la Precipitación Máxima Probable, la cual se puede definir como La máxima tormenta meteorológicamente posible, para una cuenca y duración dadas, sin tomar en cuenta cambios climatológicos a largo plazo. La definición anterior es complementada al considerar que ocurrieran cambios en los valores máximos de factores que afectan la precipitación, y todos simultáneamente.

La precipitación máxima probable en una cuenca se utiliza para determinar la avenida de diseño de la obra de excedencias de grandes presas.

Para el cálculo de la precipitación máxima probable existen dos maneras de lograrlo:

La primera consiste en buscar un modelo que pueda explicar satisfactoriamente la formación de las mayores tormentas registradas en el pasado, calibrar los parámetros que definen al modelo y obtener la precipitación máxima probable maximizando dichos parámetros.

El segundo método consiste en transponer tormentas máximas registradas en otras cuencas, haciendo ajustes por situación geográfica, altitud, barreras montañosas y temperaturas del rocío.

Finalmente este trabajo deja en claro que la regionalización de los gastos máximos anuales consiste en relacionar dichos gastos, o los parámetros que definen a su función de distribución, con características fisiográficas y de precipitación típicas de la región.

b) Regionalización de Gastos Máximos en la Cuenca de la Vertiente del Pacífico
Centro de la República Mexicana

Este trabajo fue presentado por el M.I Eliseo Carrizosa en el año de 1997 y junto con la investigación del Dr. Ramón Domínguez representan unos de los principales estudios enfocados a la Regionalización en México.¹⁰

Se inicia con un enfoque a las formas más comunes de estimar la avenida de diseño de las obras hidráulicas la cual consiste en observar la tendencia que se define al

• ¹⁰ Carrizosa, E.E., (1997), *“Regionalización de Gatos Máximos en la Cuenca de la Vertiente del Pacífico Centro de la República Mexicana”*. México.

contrastar los gastos máximos anuales registrados en una determinada cuenca contra sus respectivos periodos de retorno.

Para lo anterior, a los gastos máximos anuales se les ajustan distintas distribuciones de probabilidad de las cuales se escogen la que presenta una mejor tendencia con respecto a los gastos máximo anuales medidos en la cuenca, para determinar el gasto pico de un periodo de retorno, el cual puede ser utilizado como el gasto de diseño para revisión o construcción de alguna obra hidráulica.

El Maestro Eliseo Carrizosa denomina regionalización al proceso que se utiliza para que, con varias muestras de gatos máximos tomados de distintos sitios, se forme una nueva muestra, representativa de toda la región, con mayor número de datos, a partir de la cual se hacen inferencias estadísticas más confiables, que después pueden aplicarse en cada sitio que integra la región.

Esta investigación llevó a cabo la regionalización de la siguiente manera:

- Se localizaba geográficamente un grupo de cuencas con algunas características comunes, destacando que para este caso en particular la principal característica era la incidencia de ciclones.
- Después se buscaba lograr una muestra de datos homogéneos con mayor información; al hacer esto se pretende lograr tener un mayor número de datos que cada cuenca por separado. Para que lo anterior fuera posible se utilizaron funciones de transformación mediante las cuales se busca preservar las características comunes y eliminar el efecto de parámetros diferentes.
- Con el objeto de comprobar que las muestras transformadas pertenecen a una misma población, y para este estudio en particular se busca que conserve la influencia ciclónica y no que no contenga características atípicas, se hacen pruebas estadísticas que permitan en un inicio seleccionar las funciones de transformación más adecuadas y eliminar las cuencas que no tienen una marcada influencia ciclónica, o que su comportamiento se vea afectado por preses ubicadas aguas arriba.
- Con la muestra homogénea se hacen inferencias estadísticas, como el ajuste a la función de distribución de probabilidades y se estima la magnitud de los gastos transformados para periodos de retorno grandes.
- Finalmente los resultados del paso anterior se aplican a cada cuenca por separado utilizando la transformación inversa.

Todos los pasos anteriores comprenden el proceso de regionalización, mismo que tiene el objetivo principal, para este estudio específico, el dotar una muestra con mayor número de datos que permita conseguir una curva de ajuste más confiable y que sea representativa de toda la región.

Para poder profundizar un poco más en el concepto de regionalización es necesario constatar que generalmente, es necesario hacer extrapolaciones a partir de los gastos máximos registrados, pues en pocas ocasiones el periodo de retorno del gasto de diseño de la obra en construcción es menor al periodo de registro de los datos, por lo cual se debe buscar entre las distintas funciones de distribución de probabilidad la que se ajuste mejor a los datos medidos y usarla para la extrapolación, para la investigación que se presentó se utilizaron los gastos medios diarios máximos anuales.

Debido a la localización geográfica de las estaciones en estudio se sabe que existe incidencia de ciclones, por lo que se tienen dos tipos de datos, los originados por precipitaciones relacionadas con los fenómenos meteorológicos dominantes en la región y las precipitaciones originadas por los eventos ciclónicos que provocan usualmente las avenidas extraordinarias. Por lo anterior es posible diferenciar dos poblaciones marcadamente y ello dar pie a la utilización de la función Doble Gumbel.

Capítulo II

Conceptos Básicos sobre la Regionalización Hidráulica

Para poder entender mejor la regionalización hidráulica, a continuación se presentan algunos de los conceptos fundamentales¹¹.

Cuenca Hidrológica:

Es una porción de la superficie terrestre que al considerarla impermeable, establece que todas las gotas de lluvia que caen dentro de ella llegan a la superficie y son drenadas a través de un sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. Los límites de una cuenca hidrológica están definidos por una línea poligonal llamada parteaguas, la cual aglutina los puntos de mayor elevación, y sirve para diferenciar a una cuenca de otra.

- Clasificaciones de las cuencas hidrológicas:

Existen varias maneras de clasificar a las cuencas hidrológicas, a continuación se presentan dos:

a) Respecto al área de la cuenca:

**Tabla 2.1 Clasificación del tamaño de una cuenca en función de su magnitud.
(Eslava, M 1997)**

Tamaño de la cuenca [km ²]	Descripción
< 25	muy pequeña
25 - 250	Pequeña
250 - 500	intermedia pequeña
500 - 2500	intermedia grande
2500 - 5000	Grande
> 5000	muy grande

b) Respecto al punto de salida del escurrimiento:

¹¹ Aparicio, M.F., (2012), "*Fundamentos de Hidrología de Superficie*". Editorial LIMUSA. México.

Es posible distinguir dos tipos de cuencas, las endorreicas y las exorreicas, en la primera la descarga del escurrimiento de una cuenca se realiza hacia un cuerpo de agua dentro de la cuenca, por ejemplo un lago; mientras que en las cuencas exorreicas, las descargas de los escurrimientos salen fuera del parteaguas de la cuenca hidrológica y se pueden alojar en otra corriente o en el mar.

Región Hidrológica:

Es el área territorial conformada en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos. Normalmente una región hidrológica está integrada por una o varias cuencas hidrológicas por lo que; los límites de la región hidrológica difieren con la división política.

Área de una cuenca hidrológica:

Es la superficie en proyección horizontal, que queda delimitada por el parteaguas.

El área de una cuenca puede calcularse al superponer su forma cartográfica sobre una cuadrícula milimétrica, para después contabiliza el número de cuadrados que se ubican en su interior. Otra manera de obtener el área es mediante el uso del planímetro y en años más recientes el uso de softwares como los Sistemas de Información Geográfica.

Precipitación:

La precipitación puede analizarse como el estímulo que provoca una respuesta en una cuenca, la cual consiste en un flujo de agua conocido como escurrimiento.

En general la altura de lluvia que cae en un sitio específico, difiere de la que cae a los alrededores, por lo mismo es necesario calcular la precipitación media que se puede presentar en una cuenca hidrológica, en general existen tres formas para el cálculo de esta precipitación: por medio del método aritmético, por Polígonos de Thiessen y finalmente por Isoyetas.

El área donde ocurre la precipitación, el tipo de suelo y el grado de urbanización condicionan el volumen de escurrimiento, mientras que la pendiente y la superficie del suelo influyen en la velocidad de la respuesta.

Escurrecimiento:

Se define al escurrimiento como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

El escurrimiento se puede clasificar en tres tipos:

El escurrimiento superficial, el cual es objeto de estudio en este trabajo, mismo que es el conformado por el flujo sobre el terreno, junto con el escurrimiento de las corrientes. Y que en una tormenta es considerado como el escurrimiento directo.

El escurrimiento subsuperficial, en donde una parte de la precipitación se infiltra y escurre cerca de la superficie del terreno y en general paralelo a él. Usualmente se considera parte del escurrimiento superficial.

El escurrimiento subterráneo, que es la precipitación que se infiltra hasta niveles inferiores al freático, y que en un hidrograma representará el gasto base.

Factores que afectan el escurrimiento¹²:

El escurrimiento se puede caracterizar respecto a dos parámetros su volumen y su distribución en el tiempo.

Los factores que afectan el volumen del escurrimiento son:

- Factores climáticos. Determinantes en el balance hídrico entre la precipitación y la evapotranspiración.
- Factores fisiográficos. Las características más importantes son el área, la pendiente y el tipo de suelo, que afectan a la infiltración y evapotranspiración. La altitud de la cuenca produce un efecto orográfico en la precipitación.

Los factores que afectan el escurrimiento respecto a su distribución en el tiempo son:

Factores meteorológicos.

• ¹² Fuentes, M.O., Sáncghez, C.J., Domínguez, M.R., Lorenzo, M.H., Esquivel, G.G., (2012), **“Manual de Diseño de Obras Civiles”**, Comisión Federal de Electricidad, Sección A. Hidrotecnia, México.

Intensidad y duración de lluvia. En función de la capacidad de infiltración del suelo y la duración de la tormenta, el escurrimiento puede ser mínimo o nulo si la intensidad es pequeña.

Distribución de la precipitación. Para un mismo volumen de lluvia, el escurrimiento es diferente si la precipitación se distribuye de manera uniforme sobre la cuenca o si únicamente cae sobre una superficie reducida.

Trayectoria de la tormenta. Se ha observado que el escurrimiento es mayor cuando la tormenta se desplaza dentro de los límites de la cuenca, y menor si únicamente la atraviesa. Además, el escurrimiento es más uniforme si la precipitación se mueve en sentido opuesto al del drenaje, y más rápido cuando avanza en el sentido del flujo.

- Factores fisiográficos.

Topografía. Se incluyen las características geomorfológicas como son el área, la forma, pendiente, altitud y orientación de la cuenca.

Geología. El escurrimiento se ve afectado por la permeabilidad de las estructuras que forman el terreno.

Suelo. Influencia en la capacidad de infiltración.

Cubierta vegetal del terreno. Efectos en la intercepción, evapotranspiración, infiltración y humedad del suelo.

Red de drenaje. Efecto en la capacidad de respuesta de la cuenca.

- Factores humanos.

Estructuras hidráulicas. Sea con fines de aprovechamiento o regulación de avenidas, los embalses modifican el régimen de escurrimiento de los cauces, además de provocar la modificación del nivel freático y la reducción del transporte de sólidos.

Prácticas agrícolas. Se incluyen las actividades de deforestación, reforestación, técnicas de conservación y obras de drenaje.

Urbanización. Se reduce la capacidad de infiltración y se acelera el escurrimiento. Como consecuencia, los gastos máximos y volúmenes de escurrimiento directo se incrementan.

Respuesta Hidrológica:

En una cuenca pequeña el escurrimiento es más sensible a las precipitaciones de alta intensidad y de corta duración, y por lo tanto predominan las características físicas del suelo respecto a las del cauce.

Pero al analizar una cuenca grande, es necesario el análisis del cauce ya que de ello depende la rapidez con la que se desplaza el agua.

Existe una relación entre la magnitud del área de una cuenca y su régimen hidrológico, se ha observado que los gastos promedio, máximo y mínimo se incrementan conforme el área también aumenta.

En caso que el aumento no sea evidente, será necesario analizar las condiciones particulares de cada cuenca, por ejemplo la permeabilidad y como se explicó anteriormente el tamaño de la cuenca influye como medio de atenuación respecto al crecimiento de los gastos máximos instantáneos.

Tiempo de concentración:

Es el tiempo que tarda el agua de pasar del punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida de la misma.

El tiempo de concentración depende de la longitud máxima que deberá recorrer el agua hasta el punto de salida y de la de velocidad que adquiere, misma que está en función de la pendiente del terreno y de la rugosidad del mismo. El tiempo de concentración se puede calcular a través de la siguiente ecuación¹³:

$$T_c = 0.0050 \times \left[\frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0.64}$$

Ecuación 2.1

La ecuación 2.1 es la fórmula de Chow, donde:

S; es la pendiente del cauce principal

L; es la longitud del cauce en metros

Tc; es el tiempo de concentración en horas

• ¹³ Aparicio, M.F., (2012), "*Fundamentos de Hidrología de Superficie*". Editorial LIMUSA. México.

Infiltración:

La infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo.

La diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida recibe el nombre de pérdidas, y en general se cuantifican con la infiltración.

La medición de la infiltración se realiza a través de infiltrómetros, y dado que los valores de infiltración pueden diferir fuertemente de un lugar a otro, aun en un espacio cercano, la medición de la infiltración sólo es representativa de un área muy pequeña.

Algunos aspectos que afectan la capacidad de infiltración son:

- La textura del suelo
- El contenido de agua inicial
- Contenido de humedad de saturación
- Cobertura vegetal
- Uso del suelo
- Aire atrapado
- Compactación

Como se detalló la medición con infiltrómetros arrojaría un dato puntal, para considerar un valor representativo de las pérdidas para toda la cuenca es necesario comprender que las diferencias entre las precipitación total registrada en la cuenca y una lámina efectiva de precipitación (que es el cociente de dividir el volumen de escurrimiento directo de una tormenta, por el área de la misma), esta diferencia serán las pérdidas y en la práctica se les considerará como representativas de la infiltración.

El cálculo de la infiltración en este estudio se realizó con base en el método de número de curva del Soil Conservation Service, del mismo se desprende la siguiente ecuación:

$$S = \frac{2540 - (25.4 \times NC)}{NC}$$

Ecuación 2.2

Donde:

S; Infiltración potencial máxima en cm.

NC; Número de curva

Se tiene que destacar que el NC, se obtiene a partir del tipo y uso del suelo

Otra ecuación que se ve involucrada es la que relaciona la altura de lluvia total P con la altura de lluvia efectiva Pe mediante el número de curva N, ecuación que a continuación se muestra:

$$Pe = \frac{\left[P - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32}$$

Ecuación 2.3

Periodo de Retorno:

Usualmente denotado bajo la siguiente simbología $Tr(x)$, se define como el tiempo promedio en años que se requiere para que la variable en cuestión sea igualada o exceda un determinado valor de x.

La forma más usual para representar el periodo de retorno es:

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

Donde:

m representa el número de orden en una lista de mayor a menor de los datos

n; número de datos

Mientras que la probabilidad que el evento no ocurra en un año cualquiera es:

$$P = 1 - \frac{1}{T}$$

Donde:

T representa al periodo de retorno analizado en años.

Capítulo III

Ecuaciones de Regionalización

Como se ha planteado en los capítulos precedentes, la regionalización hidráulica se encuentra en función de diferentes factores, a continuación se citaran algunos: los factores fisiográficos de la zona, como la orografía, la geología, el comportamiento hidrológico de la región; y también factores humanos, como la construcción de obras hidráulicas que afecten el natural escurrimiento de la zona, o la falta de información histórica en materia hidráulica, que si bien no afecta los escurrimiento, sí será un factor a considerar en el momento de plantear ecuaciones de regionalización.

3.1 Ecuación del Instituto de Ingeniería UNAM

A nivel mundial existen ciertos estudios de Regionalización que son utilizados para muy variados fines, pero todos tienen una característica en común: la utilización de una ecuación en forma potencial en donde se establece el cálculo de una variable dependiente a través de coeficientes que afectan ciertas características de la zona, que constituyen las variables independientes. Para comprender mejor el planteamiento anterior, se presenta la ecuación 3.1

$$Y = C_0 \times X_1^{C_1} \times X_2^{C_2} \times X_3^{C_3} \dots$$

Ecuación 3.1

Es precisamente bajo este planteamiento que en el año 2012, el Instituto de Ingeniería UNAM inició estudios para generar un nuevo modelo de regionalización hidráulica, mismo que permitirá calcular los gastos en las diferentes Regiones Hidrológicas de México.

Para que se pueda aplicar el modelo generado, es imprescindible contar con la siguiente información:

- Los gastos de las Regiones Hidrológicas, obtenidos a través de las mediciones realizadas por las estaciones hidrométricas ubicadas en cada zona de estudio.
- Que se contara con el registro pluviométrico de las zonas y el área de la misma, para con ello poder calcular el volumen de escurrimiento generado.
- Contar con la información del espesor de infiltración de los suelos, calculado a partir del número de curva N

- Era necesario conocer el tiempo de concentración de la región a analizar, la forma de calcularlo fue con base a la ecuación del tiempo de concentración de Chow, ecuación 2.1

Una vez recabada la información anterior se procedió a elaborar una ecuación que calculara el gasto en función de los parámetros antes descritos, en general la ecuación quedó de la siguiente manera:

$$Q = C_0 \times V^{C_1} \times S^{C_2} \times tc^{C_3}$$

Ecuación 3.2

Donde:

Q = Gasto en m³/ s

V = Volumen en m³, recordando que el volumen es el resultado de la multiplicación del área de la cuenca por la precipitación en estudio.

S = Espesor de Infiltración en m

Tc = Tiempo de concentración en horas

Al observar la ecuación anterior, se plantea la siguiente incógnita. ¿Cuál será el procedimiento para el cálculo y la obtención de los exponentes antes descritos? Sin duda existirán varias maneras para resolverlo, pero en esta tesis sólo se abordarán dos: a través de una regresión múltiple de los complementos de una hoja de cálculo de Excel y por medio un programa Algoritmos Genéticos.

3.2 Cálculo de los Coeficientes involucrados en la ecuación de Regionalización

3.2.1 Regresión Múltiple

En la mayor parte de los problemas de investigación donde se requiere aplicar un análisis de regresión, usualmente se requiere más de una variable independiente problema del cual la regionalización hidráulica no está exenta.

El modelo de regresión que involucra más de una variable regresiva se llama modelos de regresión múltiple, el cual se podría representar de la siguiente manera:

$$Q = a X_1^{c_1} x X_2^{c_2} x X_3^{c_3}$$

Ecuación 3.3

La ecuación 3.3 representa a una ecuación múltiple no lineal, misma que aplicándole logaritmos resulta:

$$\ln Q = a + C_1 \ln X_1 + C_2 \ln X_2 + C_3 \ln X_3$$

Ecuación 3.4

La ecuación 3.4 ya es una ecuación lineal múltiple; de forma general se puede representar con la ecuación 3.5

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \dots + \varepsilon$$

Ecuación 3.5

Donde:

y = variable dependiente

x₁, x₂, ... = variables independientes

La ecuación anterior sería el un modelo de regresión lineal múltiple similar a la ecuación que planteó el Instituto de Ingeniería UNAM en sus primeras investigaciones. El término lineal es por la función lineal de los parámetros desconocidos β_0 , β_1 y β_2 . Obsérvese que el modelo en el caso de una función de dos variables describe un plano en el espacio bidimensional x_1, x_2 . Donde el parámetro β_0 define la ordenada al origen del plano. Y donde, β_1 y β_2 pueden ser llamados coeficientes de regresión parciales, lo anterior porque β_1 mide el cambio esperado en Y por cambio unitario de X_1 cuando X_2 se mantiene constante, y β_2 mide el cambio esperado en Y por cambio unitario de X_2 cuando X_1 se mantiene constante.

Y en general, la variable dependiente o respuesta Y puede relacionarse con k variables independientes.

En ocasiones resulta confuso hablar de un modelo polinomial como un modelo lineal. Sin embargo, los estadísticos generalmente se refieren a un modelo lineal como a aquel en el cual los parámetros ocurren linealmente, sin importar cómo entran las variables independientes en un modelo.

Varianza

El método de Mínimos Cuadrados, ha sido el que se ha utilizado para estimar los coeficientes de regresión en la ecuación 3.3

La varianza de una variable aleatoria es una medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media.

Por tanto queda definida de la siguiente manera:

$$Var y = \frac{1}{n} \sum (y - y_{media})^2$$

Ecuación 3.6

Se tendrá que destacar que los valores originales del modelo, por sí solos presentaran una varianza; la cual denominaremos “varianza de los datos”, mismos que toman la forma de la ecuación anterior.

De la misma manera se presenta una varianza en los datos generados por el modelo presentado; y que para este estudio en específico serán los gastos calculados, misma que se presenta a continuación

$$Var Q = \frac{1}{n} \sum (Q - Q_{media})^2$$

Ecuación 3.7

Coefficiente de Determinación

Otro elemento a ser tomado en cuenta es el coeficiente de determinación múltiple, R^2 , el cual es una medida del grado de reducción de la variabilidad de Y obtenida mediante el empleo de variables regresivas $X_1, X_2, X_3, \dots X_k$.

Sin lugar a duda el principal propósito del R^2 es ser un referente para la predicción de resultados, ya que su coeficiente dictamina la calidad del modelo para la réplica

de resultados, además de explicar la variación de los resultados que se pueden explicar por el modelo generado.

Para este estudio en particular el coeficiente de determinación se calculó de la siguiente manera:

$$R^2 = \frac{Var Q - Var datos}{Var Q}$$

Como en el caso de la regresión lineal simple, debemos tener $0 \leq R^2 \leq 1$.

Sin embargo, un valor grande de R^2 no implica necesariamente que el modelo de regresión es bueno. Añadir una variable al modelo siempre aumentará R^2 , independientemente de si la variable adicional es estadísticamente significativa o no. Por lo tanto es posible que modelos con grandes valores de R^2 produzcan predicciones pobres de nuevas observaciones o estimaciones de la respuesta media.

3.2.2 Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos, que tiene como primicia los postulados de la teoría de la evolución y la selección natural de Darwin, pero que enfocados a la ingeniería, pueden ser útiles para la resolución de problemas de búsqueda y optimización.

El método fue desarrollado entre 1960 y 1970 por el autor Holland, inicialmente su investigación tenía como objeto desarrollar los medios para que los mecanismos de adaptación natural pudieran ser utilizados en sistemas computacionales, fueron utilizados para resolver problemas muy específicos.

Los algoritmos genéticos presentados bajo este tenor, son una abstracción de la evolución biológica, pero que presentan la virtud de moverse de una población de caracteres de ceros y unos, los cuales asemejarían a los cromosomas, hacia una nueva población utilizando un tipo de selección natural, que junto con operadores, los cuales harían referencia a aspectos como la selección natural, cruza y mutación, los cuales son parámetros que están involucrados en la selección natural.

El fundamento de algoritmos genéticos es que un operador de selección escoge de la población a aquellos que son más aptos para reproducirse y en general, los más aptos producen más descendientes.

El proceso a seguir por los algoritmos genéticos es el siguiente:

Se genera aleatoriamente una población inicial, que consiste en una familia de parámetros, y se evaluará cada conjunto de parámetros en la función objetivo.

Se inicia un proceso de selección de miembros, en el cual se seleccionarían a aquellos que presenten una mejor solución para ser los procreados de futuros valores, en donde intervendrán conceptos como la cruce y la mutación; estos nuevos descendientes forman una nueva población que nuevamente es evaluada. Seleccionando a los conjuntos de parámetros de mayor desempeño que darán origen a la nueva generación, el proceso termina hasta que se alcanza el número de generaciones planteadas y la solución al problema será el conjunto de parámetros que dio la mejor respuesta a la función objetivo

3.3 Nuevo modelo para el cálculo de los escurrimientos en México

Los resultados de la ecuación 3.2, ecuación del Instituto de Ingeniería UNAM, en donde el gasto se calcula a través de tres parámetros – volumen, infiltración y tiempo de concentración-, y en donde a los coeficientes de estas variables no se les asigna ningún tipo de restricción generan en muchas ocasiones resultados ilógicos.

Se ha de entender entonces, el significado de cada una de las variables y los coeficientes que en ella se plantean.

Exponente de que afecta al parámetro del volumen:

Debería tomar un número inferior a 1, ha de comprenderse que esta unidad está asociada a la máxima tormenta que se puede registrar.

También se tendrá que considerar que en una cuenca hidrológica, se encuentra conformada por diferentes estaciones hidrológicas, distribuidas en toda la zona de estudio, y que al presentarse una tormenta, todas registrarán precipitaciones diferentes, correspondiendo a la ubicación de la estación e intensidad de la tormenta.

Se esta manera, si el resultado que arrojaran las diferentes metodológicas de cálculo, el coeficiente correspondiente al volumen es igual a 1, se estaría suponiendo que una cuenca hidrológica, para una tormenta dada, todas las estaciones hidrológicas sin excepción registrarían la máxima precipitación y al mismo tiempo.

Lo anterior es poco probable, ya que como se ha indicado, la ubicación de las estaciones en la cuenca hidrológica y la intensidad en la precipitación, difieren unas de otras en la cuenca hidrológica. Y este proceso se ve aún más diferenciado al aumentarse el área de la cuenca hidrológica¹⁴.

En investigaciones previas, se ha encontrado que el exponente del volumen toma valores de 0.5 a 1

Exponente que afecta a la Infiltración:

Otro exponente que deberá tener restricciones es el relacionado con la infiltración, se tiende que entender que este coeficiente necesariamente tendrá que ser negativo, porque de lo contrario se estaría suponiendo que entre mayor sea la infiltración mayor es el gasto registrado; y claramente es un error.

De ahí que aun cuando bajo un proceso de cálculo se obtenga un valor positivo y esto contribuya a tener mejores coeficientes de determinación, no se deberá tomar como válido, pues se está cometiendo una falta de criterio en la estimación de este valor, y su relación con el gasto.

Exponente que afecta al tiempo de concentración:

Considérese un hidrograma cualquiera, del que se calcula el gasto pico . Para este gasto fijo se hará cambiar el tiempo de concentración y se observarán los cambios que registra el gasto.

Se ha de concluir que para un volumen dado, si el tiempo de concentración se ve disminuido, se registrarán gastos superiores que si se ampliara el tiempo de concentración.

Y es bajo el anterior argumento que el coeficiente del tiempo de concentración deberá ser negativo.

Pero también se ha de hacer notar la estrecha relación que existen entre el área de una cuenca hidrológica y su tiempo de concentración, así pues a mayor área mayor será el tiempo de concentración de la misma, y viceversa.

De ahí que existan argumentos razonables de que si se considera el tiempo de concentración, como un factor que afecta el cálculo de los escurrimientos,

• ¹⁴ Domínguez, M.R., (1981), “*Análisis Regional de tormentas y avenidas de diseño. Aplicación a la cuenca del Papaloapan*”. México.

se estaría sobre estimando el parámetro del área, mismo que se involucra para el cálculo del volumen.

En esta tesis se parte de investigaciones hechas por el Instituto de Ingeniería UNAM, en donde como se planteó anteriormente se calcula el gasto a partir del volumen, la infiltración y el tiempo de concentración. Una vez obtenidos los gastos calculados, se comparan con los gastos registrados en las estaciones hidrométricas y se obtiene un coeficiente de determinación.

Pero estas investigaciones elaboradas, no presentan ningún tipo de restricción en sus coeficientes de cálculo, además de considerar el tiempo de concentración.

Estos argumentos dan pie para la generación de un nuevo modelo para el cálculo de los escurrimientos, en el cual el gasto sólo se calcule a partir del volumen y la infiltración, excluyendo al tiempo de concentración. Y en donde el coeficiente el volumen se encuentre limitado por un rango de 0 a 1, mientras que el de la infiltración no podrá tomar valores positivos.

Una vez calculado el gasto bajo estas nuevas condiciones, se comparará con los gastos registrados en las estaciones hidrométricas, y se obtendrá un coeficiente de determinación.

En los capítulos subsecuentes, se compararán las ecuaciones y condiciones de 5 Regiones Hidrológicas, se harán los análisis pertinentes y se concluirá acerca de las diferencias y beneficios de cada una de las diferentes herramientas de cálculo, así como de los dos modelos estudiados.

Capítulo IV

Regionalización en México

4.1 Elección de las Regiones Hidrológicas

Como se ha mencionado con anterioridad, México presenta una deficiencia de estaciones hidrométricas, lo cual afecta un certero cálculo de los escurrimientos y con ello la estimación de las avenidas de diseño en obras hidráulicas.

Las ecuaciones de regionalización que se plantearon en el capítulo anterior, pretenden brindar nuevas herramientas para la estimación de los escurrimientos que se pueden presentar en diversas zonas del territorio nacional.

En esta tesis se decidió elegir al azar cinco Regiones Hidrológicas (RH), generar una ecuación de regionalización para cada una de ellas, y con ello poder estimar futuros gastos, en función de parámetros físicos e hídricos.

A continuación se presentan las características más importantes de cada una de las regiones a analizar:

Región Hidrológica 1 - 3

Las regiones hidrológicas 1 y 3 se encuentran situadas en los estados de Baja California y Baja California Sur respectivamente, por lo anterior pertenecen a la región 1, en la clasificación hidrológico administrativa de CONAGUA, juntas tienen una extensión territorial de 58 214 km² y un total de 31 cuencas hidrológicas con más de 20 años de registros.

Tabla 4.1 Extensión territorial de la RH 1 - 3

Nombre de la región hidrológica	Extensión territorial (km ²)	Número de cuencas hidrológicas
1. B.C. Noroeste	28 492	16
3. B.C. Suroeste	29 722	15
Total	58 214	31

Región Hidrológica 9

La Región Hidrológica 9 denominada Sonora Sur, abarca parte de los estados de Sonora y de Chihuahua, tiene una extensión territorial de 139 370 km² y se encuentra integrada por 16 cuencas hidrológicas. Forma parte de la región hidrológica 2 “Noroeste” de la clasificación hidrológico administrativa.

Región Hidrológica 10

Esta Región Hidrológica se encuentra clasificada como “Sinaloa” por estar ubicada prácticamente en su totalidad en este estado, aunque algunos territorios de los estados de Chihuahua y de Durango, también integran esta región. La extensión de esta región es de 103 483 km² y cuenta con 23 cuencas hidrológicas.

En la clasificación hidrológico administrativa forma parte de la región 3, denominada Pacífico Norte.

Región Hidrológica 20 - 21

La Región hidrológica 20 comprende los estados de Guerrero y Oaxaca, se encuentra clasificada bajo el nombre de “Costa Chica de Guerrero” y tiene un área de 39 936 km² y alberga en su interior 32 cuencas hidrológicas.

Mientras que le Región hidrológica 21, se encuentra ubicada en la Costa de Oaxaca y tiene una extensión territorial de 10 514 km² y cuenta con 19 cuencas hidrológicas.

En total las dos regiones hidrológicas tienen una extensión territorial de 50 450 km² y un total de 51 cuencas hidrológicas.

Tabla 4.2 Extensión territorial de la RH 20 - 21

Nombre de la región hidrológica	Extensión territorial (km ²)	Número de cuencas hidrológicas
20. Costa Chica de Guerrero	39 936	32
21. Costa de Oaxaca	10 514	19
Total	50 450	51

Región Hidrológica 30

Los estados de Chiapas y Tabasco albergan esta región hidrológica denominada “Grijalva – Usumacinta”, está integrada por 83 cuencas hidrológicas repartidas a lo largo de 102 465 km².

La CONAGUA indica que esta región se encuentra dentro del ámbito de competencia de la región “Frontera Sur” en su clasificación hidrológico administrativa.

Con base en los criterios de selección de las estaciones hidrométricas, los cuales se mencionan en el capítulo I de esta tesis, se presenta la información más relevante en aspectos fisiográficos e hidrológicos de cada una de las regiones de estudio.

Tabla 4.3 Regiones Hidrológicas Seleccionadas

Nombre de región hidrológica	Extensión territorial continental (km ²)	Número de cuencas hidrológicas
1 - 3 Península de Baja California	58 214	31
9. Sonora Sur	139 370	16
10. Sinaloa	103 483	23
20. Costa Chica de Guerrero	39 936	32
30. Grijalva-Usumacinta	102 465	83

En la figura 4.1 es posible identificar las distintas regiones hidrológicas de México, y como se mencionó anteriormente estas no siguen las delimitaciones políticas sino que sus límites corresponden a características hidrológicas.



Figura 4.1 Regiones Hidrológicas de México¹⁵

Las tablas 4.4 a 4.7 están compuestas de 7 columnas, en donde es posible identificar cada estación con su clave del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales.

La segunda columna la compone el Número de Curva (N), característico de la zona, recordando que éste se encuentra en función del tipo y uso de suelo.

Posterior a esta, se encuentra la información perteneciente a la precipitación media medida en mm, y es de destacar que dicha precipitación corresponde a la promedio en la cuenca de la media de las precipitaciones máximas anuales registradas.

También es posible encontrar en las anteriores tablas, la información del área drenada de la cuenca medida en km², posterior a ella se encuentra el volumen de la zona en estudio que es el resultado de la multiplicación del área por la precipitación.

También es posible encontrar la información relativa al espesor de infiltración, medido en m y calculado por medio de la ecuación 2.2, misma que se relaciona con el Número de Curva.

Finalmente se indican los valores de los gastos medios registrados para las zonas de estudio.

¹⁵ Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

Tabla 4.4 Región Hidrológica 1 y 3

RH1 -RH3						
Clave	Número de Curva promedio	Precipitación media (hp) [mm]	Área drenada [km ²]	Volumen [m ³]	Espesor de Infiltración (S) [m]	Q media [m ³ /s]
1023	62	35.28	1577	55 636 560	0.156	51.9094
1024	61	28.59	1100	31 449 000	0.162	71.4509
1025	57	41.74	1230	51 340 200	0.192	131.9749
1026	63	38.19	685	26 160 150	0.149	23.0574
3001	66	52.53	1378	72 386 340	0.131	58.1017
3002	59	85.97	35	3 008 950	0.177	0.1985
3003	61	92.31	120	11 077 200	0.162	0.4109

Tabla 4.5 Región Hidrológica 9

RH 9						
Clave	Número de Curva promedio	Precipitación media (hp) [mm]	Área drenada [km ²]	Volumen [m3]	Espesor de Infiltración (S) [m]	Q media [m ³ /s]
9008	69	52.24	66878	3493706720	0.114	1659.100
9011	72	44.05	8713	383764085	0.099	334.592
9017	69	55.96	11606	649471760	0.114	412.773
9067	76	66.3	7510	497913000	0.080	1265.438
9068	79	72.63	901	65439630	0.068	319.047
9080	73	44.26	10598	469067480	0.094	489.309
9082	70	46.84	45624	2137028160	0.109	1303.901

9083	74	45.24	15270	690814800	0.089	802.147
9084	74	48.22	21675	1045168500	0.089	1168.529
9089	77	77.15	1208	93197200	0.076	197.346

Tabla 4.6 Región Hidrológica 10

RH 10						
Clave	Número de Curva promedio	Precipitación media (hp) [mm]	Área drenada [km ²]	Volumen [m ³]	Espesor de Infiltración (S) [m]	Q media [m ³ /s]
10018	70	83.84	15731	1318887040	0.109	1711.997
10027	70	87.97	371	32636870	0.109	288.877
10029	69	81.52	2064	168257280	0.114	646.361
10031	66	87.72	1645	144299400	0.131	634.128
10033	69	81.05	11409	924699450	0.114	1445.321
10034	75	92.9	666	61871400	0.085	362.778
10036	71	77.7	8179	635508300	0.104	1024.042
10037	71	59.69	26057	1555342330	0.104	3304.437
10040	68	82.32	8919	734212080	0.120	1410.232

Nuevos modelos para el cálculo de los escurrimientos en la República Mexicana

10041	70	91.73	3657	335456610	0.109	496.841
10051	70	61.35	29529	1811604150	0.109	2177.713
10053	70	74.54	2270	169205800	0.109	284.520
10063	72	54.04	2033	109863320	0.099	527.963
10064	71	60.63	5098	309091740	0.104	948.067
10066	69	72.17	1403	101254510	0.114	336.522
10070	69	102.46	1884	193034640	0.114	849.201
10079	68	104.39	1018	106269020	0.120	1058.173
10083	69	100.6	835	84001000	0.114	479.063
10086	76	94.67	270	25560900	0.080	250.718
10087	74	92.98	2241	208368180	0.089	615.016
10098	73	74.45	1813	134977850	0.094	454.109
10100	71	53.21	4000	212840000	0.104	332.404
10110	72	69.22	5281	365550820	0.099	1090.091
10111	70	75.08	5307	398449560	0.109	1285.190
10112	73	75.1	8252	619725200	0.094	1577.423
10113	73	71.07	6149	437009430	0.094	903.517
10120	71	80.76	9245	746626200	0.104	946.992
10122	70	61.39	29646	1819967940	0.109	1115.597

Tabla 4.7 Región Hidrológica 20 y 21

RH 20						
Clave	Número de Curva promedio	Precipitación media (hp) [mm]	Área drenada [km²]	Volumen [m³]	Espesor de Infiltración (S) [m]	Q media [m³/s]
20016	72	104.82	1995	209115900	0.099	1233.754
20017	76	66.25	17617	1167126250	0.080	1805.464
20018	73	124.2	1103	136992600	0.094	986.178
20019	76	116.24	1113	129375120	0.080	656.787
20021	75	67.08	7631	511887480	0.085	996.959
20022	76	88.9	233	20713700	0.080	120.455
20023	78	55.15	2662.8	146853420	0.072	137.081
20025	70	91.81	2514	230810340	0.109	726.312
20026	78	55.59	3259	181167810	0.072	117.762
20027	79	56	1196.7	67015200	0.068	115.959
20031	73	91.43	7067	646135810	0.094	2596.587
20036	77	57.97	6091	353095270	0.076	318.416
20037	73	86.96	4016	349231360	0.094	664.919
20045	74	55.63	170.043	9459492.09	0.089	337.759

Tabla 4.8 Región Hidrológica 30

RH 30						
Clave	Número de Curva promedio	Precipitación media (hp) [mm]	Área drenada [km ²]	Volumen [m ³]	Espesor de Infiltración (S) [m]	Q media [m ³ /s]
30019	74	82.24	47697	3922601280	0.089	5420.845
30020	73	79.88	1870	149375600	0.094	268.947
30030	72	89.49	15894	1422354060	0.099	1725.773
30031	82	192.94	169	32606860	0.056	358.890
30032	76	190.19	476	90530440	0.080	955.108
30041	73	95.4	1808	172483200	0.094	347.453
30042	79	104.67	2876	301030920	0.068	1351.765
30057	79	203.72	411	83728920	0.068	592.664
30066	76	170.38	200	34076000	0.080	489.781
30070	77	166.73	410	68359300	0.076	1542.649
30088	68	98.09	10138	994436420	0.120	262.668
30093	80	96	3219	309024000	0.064	1572.229
30094	80	173.77	216	37534320	0.064	218.910
30095	74	81.97	41852	3430608440	0.089	6244.490
30096	84	165.39	330	54578700	0.048	198.531
30135	79	80.06	2443	195586580	0.068	1036.733
30212	73	96.98	1069	103671620	0.094	341.800

4.2 Aplicación de las ecuaciones de Regionalización

En este trabajo el cálculo de los escurrimientos se realiza a través de dos parámetros, el volumen y el espesor de infiltración correspondiente a cada una de las estaciones hidrométricas en estudio, para cada región hidrológica. La obtención de estos valores, volumen e infiltración, se ha detallado en el capítulo tercero de esta investigación.

Una vez realizado el análisis de los datos se elabora una ecuación que obtenga los gastos, a los cuales denominaremos gastos calculados, y se compararan con los gastos medios que proporcionan las estaciones hidrométricas; realizado lo anterior se obtiene el coeficiente de determinación, el cual nos brindará un panorama general de la eficiencia de la ecuación realizada.

Como se detalló en el capítulo anterior, el análisis de los datos se realizó por dos maneras diferentes, por regresión múltiple y por algoritmos genéticos, además de comparar con los resultados de investigaciones pasadas del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Y es precisamente bajo ese esquema que a continuación se presentan los resultados del análisis para cada una de las regiones hidrológicas seleccionadas.

En las páginas subsecuentes se observan los resultados y análisis que se obtienen a partir de la aplicación de las ecuaciones antes descritas, con una metodología específica donde se tomaran en cuenta restricciones a diferentes exponentes y se ven conglomeradas todas las informaciones previas como el volumen, la infiltración y los gastos medios.

Una vez realizado el procedimiento anterior se procedió a comparar el gasto calculado con el gasto medio, lo anterior para cada una de las ecuaciones formuladas.

En total cada Región Hidrológica estuvo sujeta a tres análisis diferentes, mismos que se compararon para con ello poder concluir cuál modelo aporta los mejores resultados.

Región Hidrológica 1-3

a) Regresión Múltiple

Tabla 4.9 Regresión Múltiple en la RH 1- 3

Clave	V [m3]	S [m]	Q media [m³/s]	Q calculado [m³/s]
01023	55 636 560	0.156	51.909	77.502
01024	31 449 000	0.162	71.451	23.840
01025	51 340 200	0.192	131.975	155.113
01026	26 160 150	0.149	23.057	10.706
03001	72 386 340	0.131	58.102	69.177
03002	3 008 950	0.177	0.199	0.127
03003	11 077 200	0.162	0.411	1.985

Al realizar la regresión múltiple se obtuvieron los siguientes coeficientes:

Tabla 4.10 Coeficientes de la Regresión Múltiple RH 1-3

Variables	Coeficientes
Variable X 1	2.38221855
Variable X 2	4.26242902
Intercepción	0.00000000000000761

Los resultados anteriores se ven reflejados en la siguiente ecuación de regionalización:

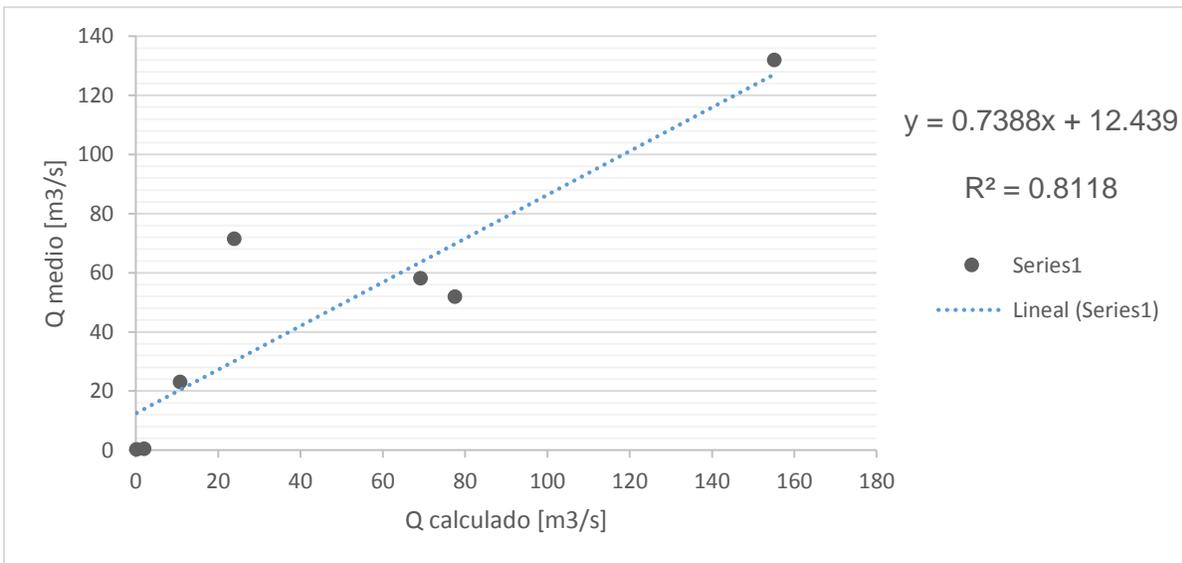
$$Q = 7.61 \times 10^{-14} \times V^{2.382} \times S^{4.262}$$

Ecuación 4.2.1

Aplicando la ecuación 4.2.1 resultan los siguientes gastos, mismos que son comparados y graficados.

Tabla 4.11 Regresión Múltiple RH 1 - 3

Q calculado [m ³ /s]	Q media [m ³ /s]
77.502	51.909
23.840	71.451
155.113	131.975
10.706	23.057
69.177	58.102
0.127	0.199
1.985	0.411



Gráfica 4.2.1 Regresión Múltiple RH 1 - 3

b) Algoritmos Genéticos

Como previamente se ha explicado, los coeficientes reportados por la regresión múltiple son el punto de partida para definir los límites de los algoritmos genéticos, buscando que el valor arrojado quede en los valores centrales respecto a los límites fijados, si el valor resultante tomara el valor de un límite, éste tendría que ampliarse; excepto el límite referente a la infiltración ya que se busca que sea negativo y por lo tanto el valor máximo que podrá tomar será un número cercano al cero.

Denotaremos con las siguientes abreviaturas a los límites:

Co, coeficiente independiente

C1, coeficiente que afectará al volumen

C2, coeficiente que afectará a la infiltración

A continuación se presenta la información resultante para la región hidrológica 1-3, bajo el análisis de algoritmos genéticos.

Tabla 4.12 Límites de los Algoritmos Genéticos RH 1- 3

0.00	< C0 <	5	=	0.00030519
0.01	< c1 <	2	=	0.69384045
-2	< c2 <	-0.001	=	-0.001

De la cual se obtuvo la siguiente ecuación:

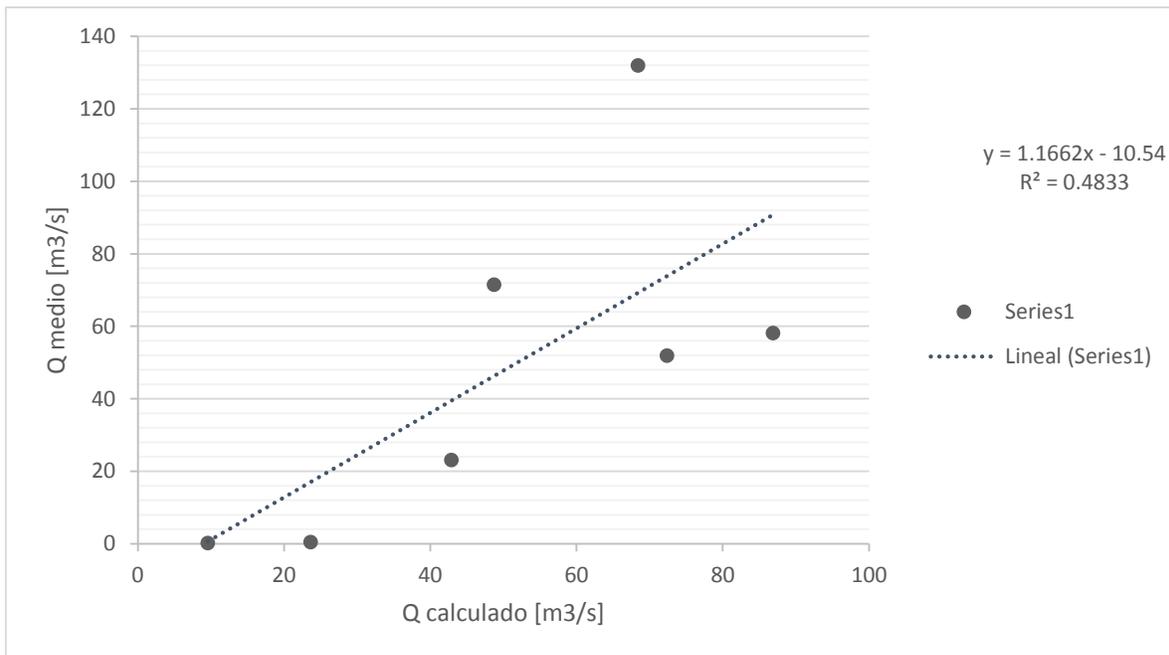
$$Q = 0.0003 \times V^{0.694} \times S^{-0.001}$$

Ecuación 4.2.2

De dicha ecuación resultaron los siguientes gastos al igual que la gráfica que relaciona los gastos calculados con los gastos medios:

Tabla 4.13 Algoritmos Genéticos RH 1 - 3

Estadísticos	V [m3]	S [m]	Q calculado [m³/s]	Q medio [m³/s]
	55636560	0.156	72.346	51.909
	31449000	0.162	48.696	71.451
	51340200	0.192	68.408	131.975
	26160150	0.149	42.860	23.057
	72386340	0.131	86.855	58.102
	3008950	0.177	9.557	0.199
	11077200	0.162	23.608	0.411
media	35865485.7	0.161	50.333	48.158
DS	25072710.6	0.019	27.630	46.351
CV	0.69907629	0.120	0.549	0.962



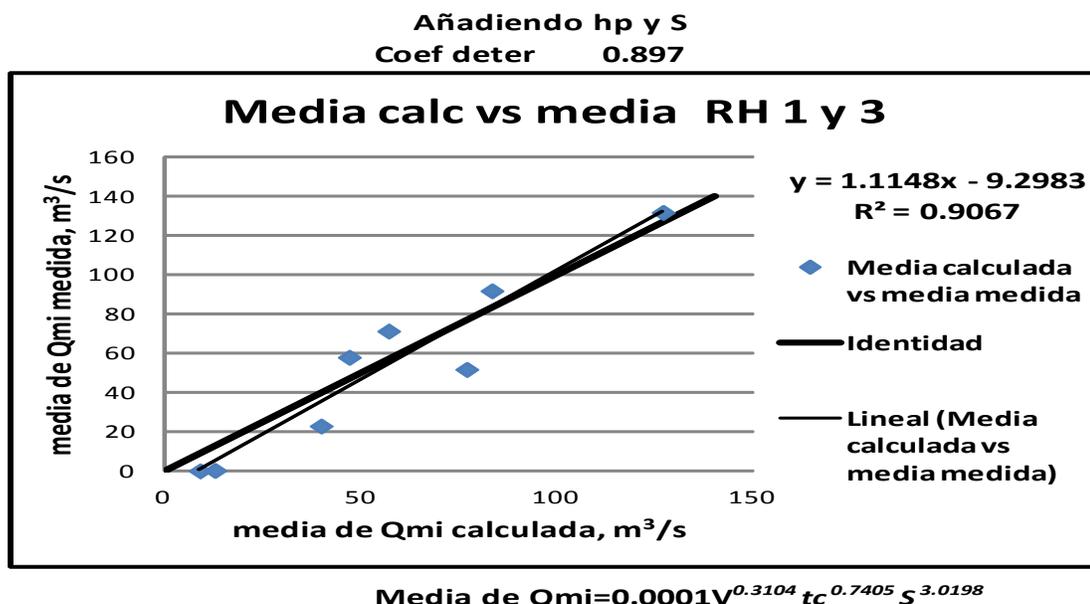
Gráfica 4.2.2 Algoritmos Genéticos RH 1 - 3

c) Ecuación del Instituto de Ingeniería

A continuación se presenta la ecuación y la gráfica de investigaciones pasadas realizadas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en dicha ecuación el gasto se calcula en función de la Infiltración, el Tiempo de concentración y el Volumen, en donde la infiltración no presenta ninguna restricción. De igual manera se utilizó un programa de algoritmos genéticos.

$$Q = 0.0001 \times V^{0.3104} \times tc^{0.7405} \times S^{3.0198}$$

Ecuación 4.2.3



Gráfica 4.2.3 Instituto de Ingeniería UNAM

Región Hidrológica 9

a) Regresión Múltiple

Tabla 4.14 Regresión Múltiple en la RH 9

Clave	V [m ³]	S [m]	Q media [m ³ /s]	Q calculado [m ³ /s]	Q media [m ³ /s]
09008	3493706720	0.114	1659.100	1689.413	1659.100
09011	383764085	0.099	334.592	357.938	334.592
09017	649471760	0.114	412.773	346.528	412.773
09067	497913000	0.080	1265.438	979.308	1265.438
09068	65439630	0.068	319.047	272.053	319.047
09080	469067480	0.094	489.309	519.438	489.309
09082	2137028160	0.109	1303.901	1263.742	1303.901
09083	690814800	0.089	802.147	902.325	802.147
09084	1045168500	0.089	1168.529	1332.516	1168.529
09089	93197200	0.076	197.346	247.778	197.346

Al realizar la regresión múltiple se obtuvieron los siguientes coeficientes:

Tabla 4.15 Coeficientes de la Regresión Múltiple RH 9

Variables	Coeficientes
Variable X 1	0.941525907
Variable X 2	-3.656334752
Intercepción	0.0000000006249

Los resultados anteriores se ven reflejados en la siguiente ecuación de regionalización:

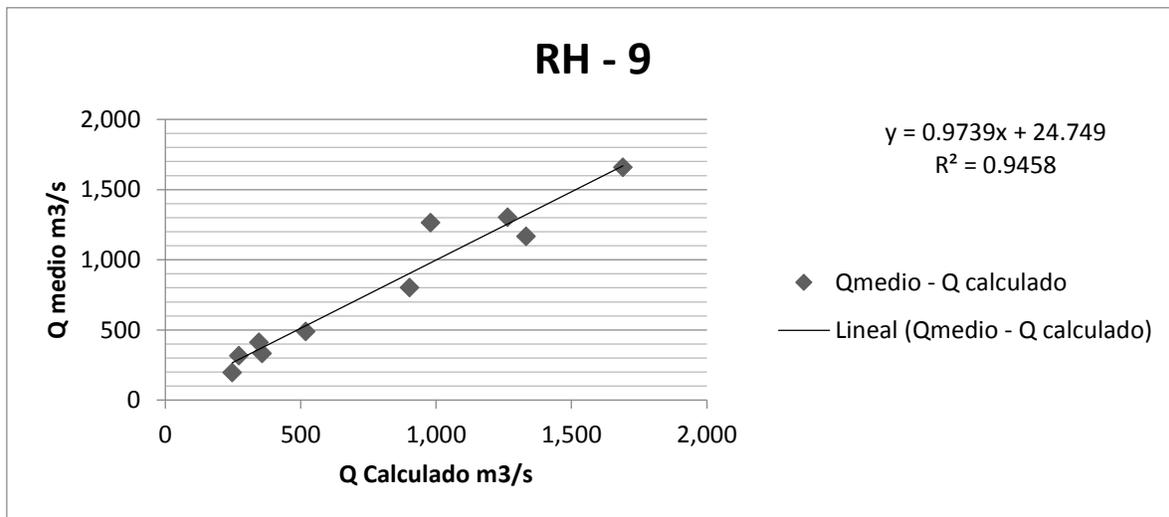
$$Q = 6.249 \times 10^{-10} x V^{0.9415} x S^{-3.6563}$$

Ecuación 4.2.4

Aplicando la ecuación 4.2.1 resultan los siguientes gastos, mismos que son comparados y graficados.

Tabla 4.16 Regresión Múltiple RH 9

Q calculado [m ³ /s]	Q media [m ³ /s]
1689.413	1659.100
357.938	334.592
346.528	412.773
979.308	1265.438
272.053	319.047
519.438	489.309
1263.742	1303.901
902.325	802.147
1332.516	1168.529
247.778	197.346



Gráfica 4.2.4 Regresión Múltiple RH 9

b) Algoritmos Genéticos

A continuación se presenta la información resultante para la región hidrológica 9, bajo el análisis de algoritmos genéticos.

Tabla 4.17 Límites de los Algoritmos Genéticos RH 9

0.000000000550	< C0 <	0.00000000090	=	0.00000000072
0.9	< c1 <	1	=	0.92
-4	< c2 <	-3	=	-3.75

De la cual se obtuvo la siguiente ecuación:

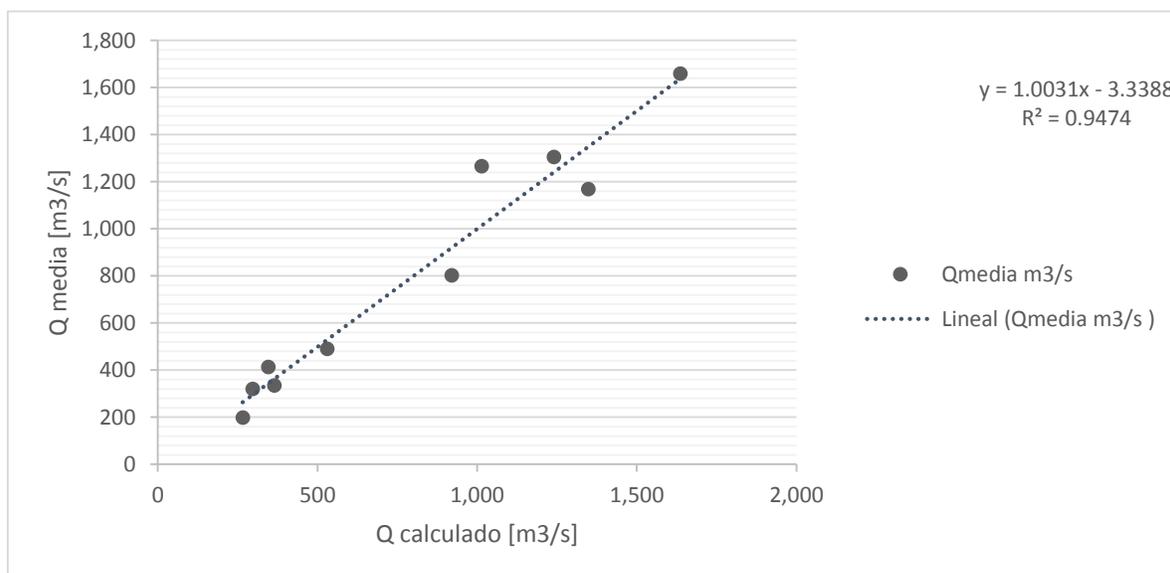
$$Q = 7.2 \times 10^{-10} \times V^{0.92} \times S^{-3.75}$$

Ecuación 4.2.5

De dicha ecuación resultaron los siguientes gastos al igual que la gráfica que relaciona los gastos calculados con los gastos medios:

Tabla 4.18 Algoritmos Genéticos RH 9

Estadísticos	V [m3]	S [m]	Q calculado [m ³ /s]	Q medio [m ³ /s]
	3493706720.0	0.114	1636.304	1659.100
	383764085.0	0.099	365.042	334.592
	649471760.0	0.114	345.511	412.773
	497913000.0	0.080	1013.851	1265.438
	65439630.0	0.068	296.420	319.047
	469067480.0	0.094	530.403	489.309
	2137028160.0	0.109	1239.897	1303.901
	690814800.0	0.089	919.656	802.147
	1045168500.0	0.089	1348.452	1168.529
	93197200.0	0.076	265.414	197.346
media	952557133.5	0.093	796.095	795.218
DS	1070764292	0.016	501.267	516.589
CV	1.12409456	0.172	0.630	0.650

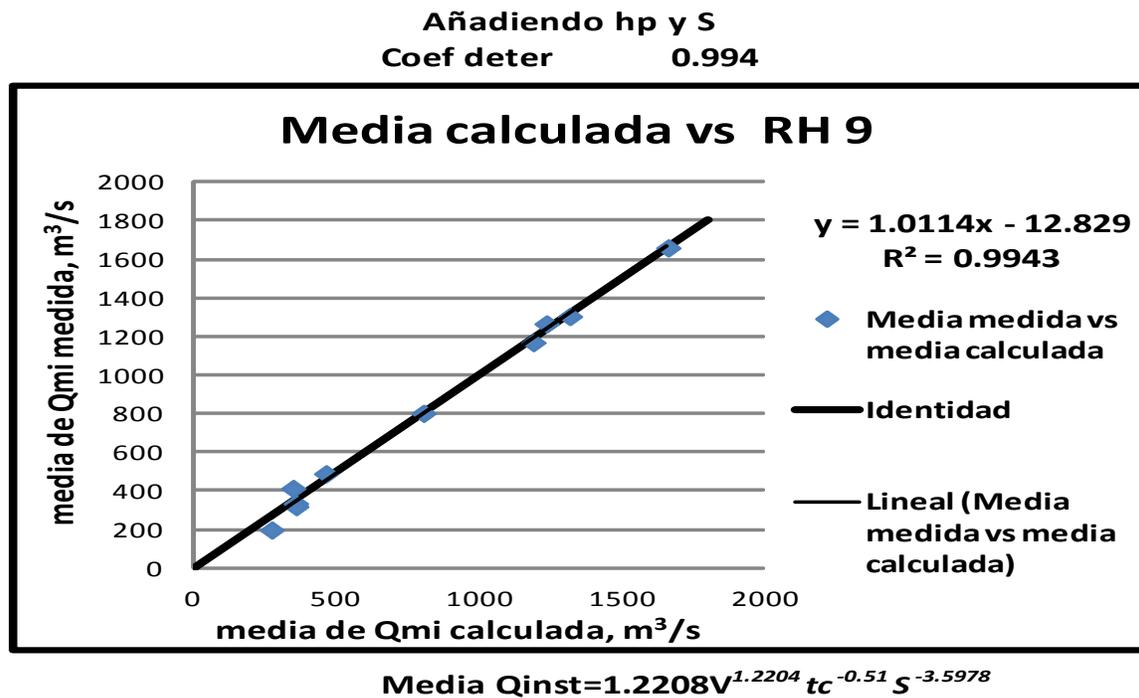


Gráfica 4.2.5 Algoritmos Genéticos RH 9

c) Ecuación del Instituto de Ingeniería

$$Q = 1.2208 \times V^{1.2204} \times tc^{-0.51} \times S^{-3.5978}$$

Ecuación 4.2



Gráfica 4.2.6 Instituto de Ingeniería UNAM RH 9

Región Hidrológica 10

a) Regresión Múltiple

Tabla 4.19 Regresión Múltiple en la RH 10

Clave	V [m3]	S [m]	Q media [m³/s]	Q calculado [m³/s]	Q media [m³/s]
10018	1318887040	0.109	1711.997	1653.407	1711.997
10027	32636870	0.109	288.877	274.937	288.876
10029	168257280	0.114	646.361	618.212	646.361
10031	144299400	0.131	634.128	599.116	634.127

Nuevos modelos para el cálculo de los escurrimientos en la República Mexicana

10033	924699450	0.114	1445.321	1412.69	1445.321
10034	61871400	0.085	362.778	346.384	362.777
10036	635508300	0.104	1024.042	1142.911	1024.041
10037	1555342330	0.104	3304.437	1764.138	3304.437
10040	734212080	0.120	1410.232	1281.754	1410.231
10041	335456610	0.109	496.841	851.167	496.840
10051	1811604150	0.109	2177.713	1928.587	2177.713
10053	169205800	0.109	284.520	610.751	284.520
10063	109863320	0.099	527.963	480.394	527.963
10064	309091740	0.104	948.067	805.735	948.066
10066	101254510	0.114	336.522	483.244	336.522
10070	193034640	0.114	849.201	660.804	849.200
10079	106269020	0.120	1058.173	501.986	1058.173
10083	84001000	0.114	479.063	441.386	479.063
10086	25560900	0.080	250.718	221.800	250.717
10087	208368180	0.089	615.016	634.633	615.015
10098	134977850	0.094	454.109	522.511	454.109
10100	212840000	0.104	332.404	672.367	332.404
10110	365550820	0.099	1090.091	860.621	1090.091
10111	398449560	0.109	1285.190	925.256	1285.190
10112	619725200	0.094	1577.423	1094.289	1577.422
10113	437009430	0.094	903.517	923.749	903.516
10120	746626200	0.104	946.992	1235.815	946.991
10122	1819967940	0.109	1115.597	1932.900	1115.598

Al realizar la regresión múltiple se obtuvieron los siguientes coeficientes:

Tabla 4.20 Coeficientes de la Regresión Múltiple RH 10

Variables	Coefficientes
Variable X 1	0.484996
Variable X 2	0.315161
Intercepción	0.125505

Los resultados anteriores se ven reflejados en la siguiente ecuación de regionalización:

$$Q = 0.1255 x V^{0.485} x S^{0.125}$$

Ecuación 4.2.7

Aplicando la ecuación 4.2.7 resultan los siguientes gastos, mismos que son comparados y graficados.

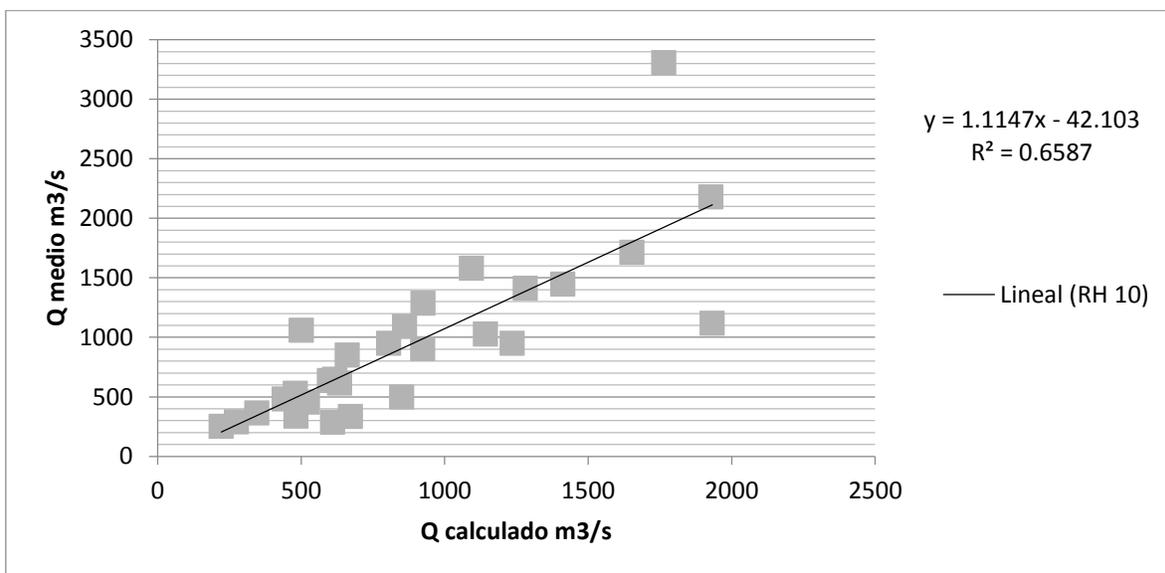
Tabla 4.21 Regresión Múltiple RH 10

Q calculado [m ³ /s]	Q media [m ³ /s]
1653.407	1711.997
274.938	288.877
618.212	646.361
599.117	634.128
1412.692	1445.321
346.385	362.778
1142.911	1024.042
1764.139	3304.437
1281.754	1410.232

Nuevos modelos para el cálculo de los escurrimientos en la República Mexicana

851.168	496.841
1928.587	2177.713
610.751	284.520
480.395	527.963
805.735	948.067
483.245	336.522
660.805	849.201
501.986	1058.173
441.387	479.063
221.800	250.718
634.634	615.016
522.511	454.109
672.367	332.404
860.621	1090.091
925.257	1285.190
1094.290	1577.423
923.750	903.517
1235.815	946.992
1932.900	1115.597
1653.407	1711.997
274.938	288.877
618.212	646.361
599.117	634.128
1412.692	1445.321
346.385	362.778

1142.911	1024.042
1764.139	3304.437
1281.754	1410.232
851.168	496.841
1932.900	1115.597



Gráfica 4.2.7 Regresión Múltiple RH 10

b) Algoritmos Genéticos

A continuación se presenta la información resultante para la región hidrológica 9, bajo el análisis de algoritmos genéticos.

Tabla 4.22 Límites de los Algoritmos Genéticos RH 10

0.00	< C0 <	0.15	=	0.00559404
0.4	< c1 <	0.6	=	0.53412275
-3	< c2 <	-0.01	=	-0.65860744

De la cual se obtuvo la siguiente ecuación:

$$Q = 5.594 \times 10^{-3} \times V^{0.5341} \times S^{-0.6586}$$

Ecuación 4.2.8

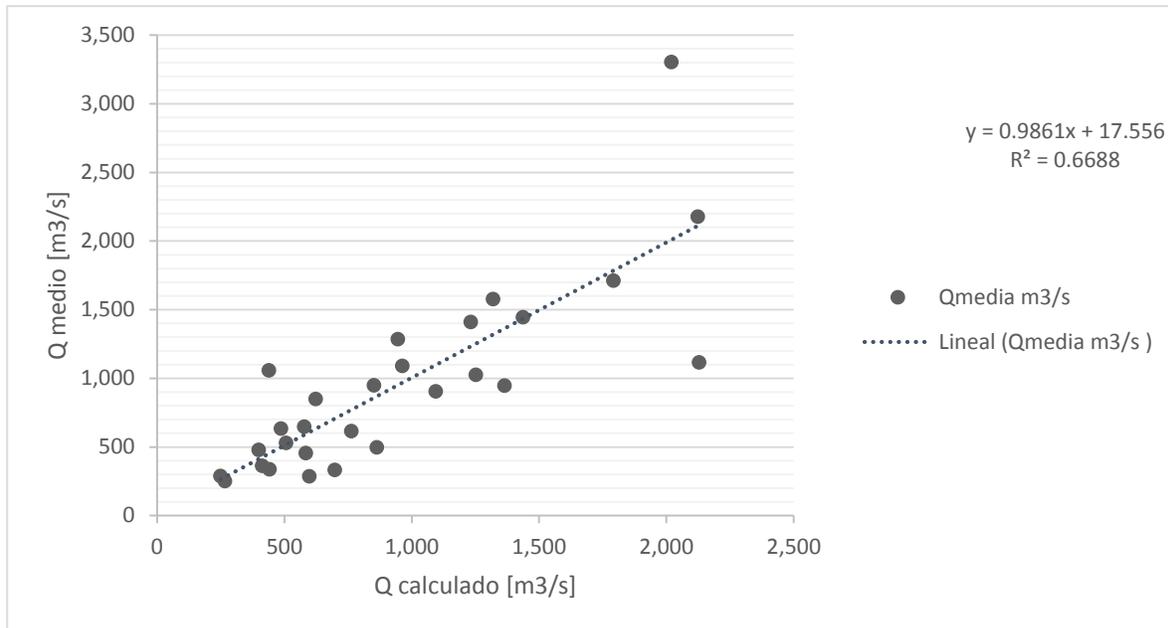
De dicha ecuación resultaron los siguientes gastos al igual que la gráfica que relaciona los gastos calculados con los gastos medios:

Tabla 4.23 Algoritmos Genéticos RH 10

Estadísticos	V [m3]	S [m]	Q calculado [m³/s]	Q medio [m³/s]
	1318887040.0	0.109	1792.129	1711.997
	32636870.0	0.109	248.486	288.877
	168257280.0	0.114	578.421	646.361
	144299400.0	0.131	486.942	634.128
	924699450.0	0.114	1437.174	1445.321
	61871400.0	0.085	412.624	362.778
	635508300.0	0.104	1252.450	1024.042
	1555342330.0	0.104	2020.117	3304.437
	734212080.0	0.120	1232.380	1410.232
	335456610.0	0.109	862.572	496.841
	1811604150.0	0.109	2123.250	2177.713
	169205800.0	0.109	598.471	284.520
	109863320.0	0.099	506.586	527.963

Nuevos modelos para el cálculo de los escurrimientos en la República Mexicana

	309091740.0	0.104	852.240	948.067
	101254510.0	0.114	441.000	336.522
	193034640.0	0.114	622.459	849.201
	106269020.0	0.120	438.929	1058.173
	84001000.0	0.114	399.121	479.063
	25560900.0	0.080	266.663	250.718
	208368180.0	0.089	762.363	615.016
	134977850.0	0.094	584.462	454.109
	212840000.0	0.104	698.258	332.404
	365550820.0	0.099	962.755	1090.091
	398449560.0	0.109	945.614	1285.190
	619725200.0	0.094	1319.203	1577.423
	437009430.0	0.094	1094.664	903.517
	746626200.0	0.104	1365.021	946.992
	1819967940.0	0.109	2128.481	1115.597
media	491591822.1	0.106	944.030	948.475
DS	533518343.3	0.011	559.690	674.890
CV	1.085287263	0.105	0.593	0.712

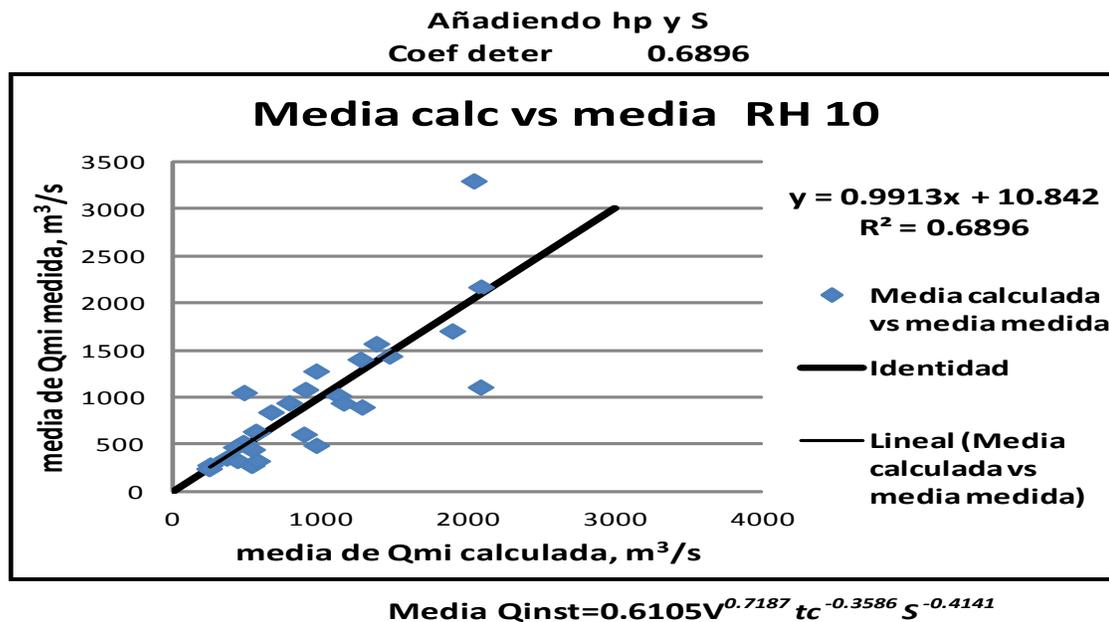


Gráfica 4.2.8 Algoritmos Genéticos

c) Ecuación del Instituto de Ingeniería

$$Q = 0.6105 \times V^{0.7187} \times tc^{-0.3586} \times S^{-0.4141}$$

Ecuación 4.2.9



Gráfica 4.2.9 Instituto de Ingeniería UNAM

Región Hidrológica 20-21

a) Regresión Múltiple

Tabla 4.24 Regresión Múltiple en la RH 20 -21

Clave	V [m³]	S [m]	Q media [m³/s]	Q calculado [m³/s]
20016	209115900	0.099	1233.75	1075.506
20017	1167126250	0.080	1805.46	964.444
20018	136992600	0.094	986.18	704.784
20019	129375120	0.080	656.79	340.381
20021	511887480	0.085	996.96	829.651
20022	20713700	0.080	120.45	142.974
20023	146853420	0.072	137.08	219.016
20025	230810340	0.109	726.31	1733.770
20026	181167810	0.072	117.76	241.912
20027	67015200	0.068	115.96	116.159
20031	646135810	0.094	2596.59	1468.971
20036	353095270	0.076	318.42	427.871
20037	349231360	0.094	664.92	1097.718
20045	9459492.09	0.089	337.76	158.325
21004	22804247.64	0.080	70.61	149.634
21005	31171126.28	0.080	157.62	173.500
21007	34246140.6	0.072	201.69	109.926
20016	209115900	0.099	1233.75	1075.506
20017	1167126250	0.080	1805.46	964.444

20018	136992600	0.094	986.18	704.784
20019	129375120	0.080	656.79	340.381
20021	511887480	0.085	996.96	829.651
20022	20713700	0.080	120.45	142.974
20023	146853420	0.072	137.08	219.016
20025	230810340	0.109	726.31	1733.770
20026	181167810	0.072	117.76	241.912
20027	67015200	0.068	115.96	116.159
20031	646135810	0.094	2596.59	1468.971
20036	353095270	0.076	318.42	427.871
20037	349231360	0.094	664.92	1097.718
20045	9459492.09	0.089	337.76	158.325
21004	22804247.64	0.080	70.61	149.634
21005	31171126.28	0.080	157.62	173.500
21007	34246140.6	0.072	201.69	109.926

Al realizar la regresión múltiple se obtuvieron los siguientes coeficientes:

Tabla 4.25 Coeficientes de la Regresión Múltiple RH 20 - 21

Variables	Coeficientes
Variable X 1	0.4735
Variable X 2	4.4334
Intercepción	3540.7471

Los resultados anteriores se ven reflejados en la siguiente ecuación de regionalización:

$$Q = 3540.7471 x V^{0.4735} x S^{4.4334}$$

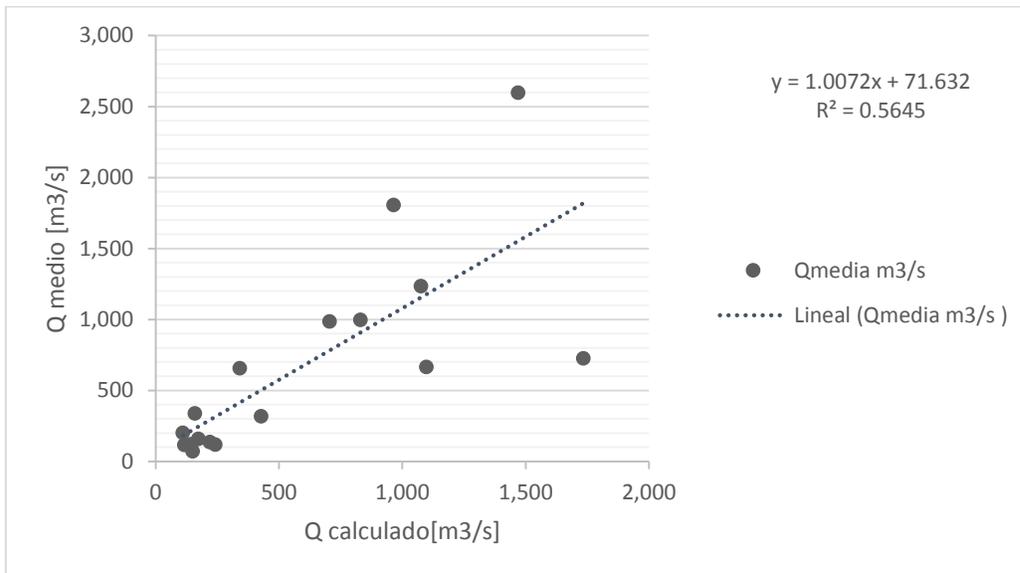
Ecuación 4.2.10

Aplicando la ecuación 4.2.1 resultan los siguientes gastos, mismos que son comparados y graficados.

Tabla 4.26 Regresión Múltiple RH 20 -21

Q calculado [m ³ /s]	Q media [m ³ /s]
1075.506	1233.754
964.444	1805.464
704.784	986.178
340.381	656.787
829.651	996.959
142.974	120.455
219.016	137.081
1733.770	726.312
241.912	117.762
116.159	115.959
1468.971	2596.587
427.871	318.416
1097.718	664.919
158.325	337.759
149.634	70.609
173.500	157.619

109.926	201.689
---------	---------



Gráfica 4.2. 10 Regresión Múltiple RH 20 - 21

b) Algoritmos Genéticos

A continuación se presenta la información resultante para la región hidrológica 9, bajo el análisis de algoritmos genéticos.

Tabla 4.27 Límites de los Algoritmos Genéticos RH 20 - 21

0.001	< C0 <	3600	=	0.1108666
0.1	< c1 <	0.5	=	0.46287729
-4	< c2 <	-0.00001	=	-0.00001

De la cual se obtuvo la siguiente ecuación:

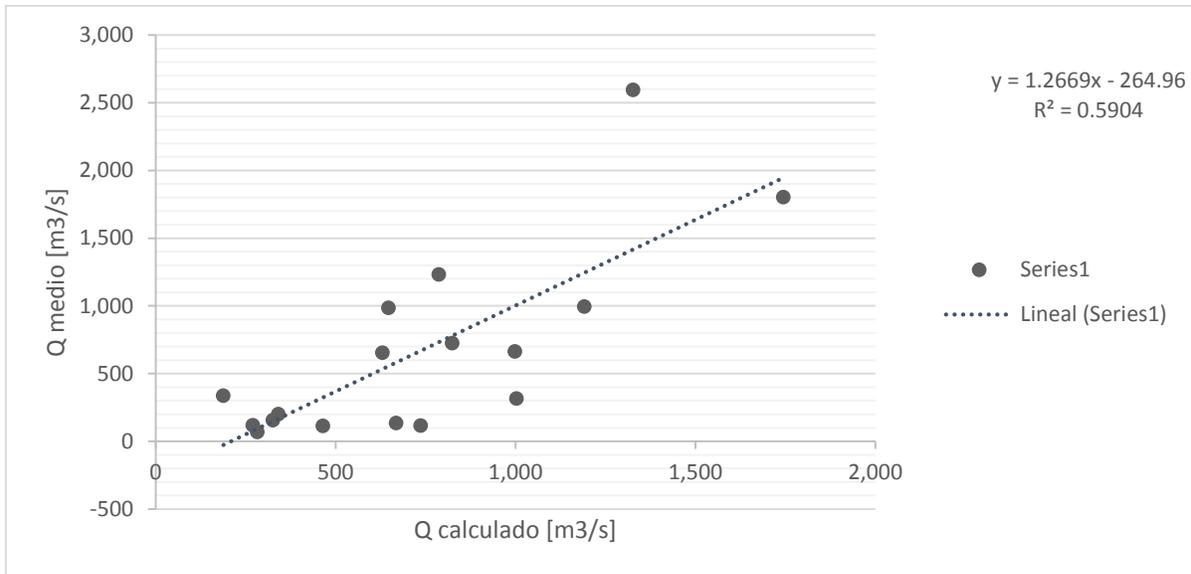
$$Q = 0.11 \times V^{0.4628} \times S^{-0.00001}$$

Ecuación 4.2.11

De dicha ecuación resultaron los siguientes gastos al igual que la gráfica que relaciona los gastos calculados con los gastos medios:

Tabla 4.28 Algoritmos Genéticos RH 20 - 21

	V [m ³]	S [m]	Q calculado [m ³ /s]	Q medio [m ³ /s]
	209115900.0	0.0988	787.280	1233.754
	1167126250.0	0.0802	1744.916	1805.464
	136992600.0	0.0939	647.297	986.178
	129375120.0	0.0802	630.381	656.787
	511887480.0	0.0847	1191.490	996.959
	20713700.0	0.0802	269.986	120.455
	146853420.0	0.0716	668.463	137.081
	230810340.0	0.1089	824.084	726.312
	181167810.0	0.0716	736.699	117.762
	67015200.0	0.0675	464.912	115.959
	646135810.0	0.0939	1327.119	2596.587
	353095270.0	0.0759	1003.314	318.416
	349231360.0	0.0939	998.215	664.919
	9459492.1	0.0892	187.837	337.759
	22804247.64	0.0802	282.273	70.609
	31171126.28	0.0802	326.212	157.619
	34246140.6	0.0716	340.732	201.689
medias	195283322.6	0.0821	660.837	515.637
DS	200831752.9	0.0113	368.225	665.725
CV	1.028412208	0.1371	0.557	1.291

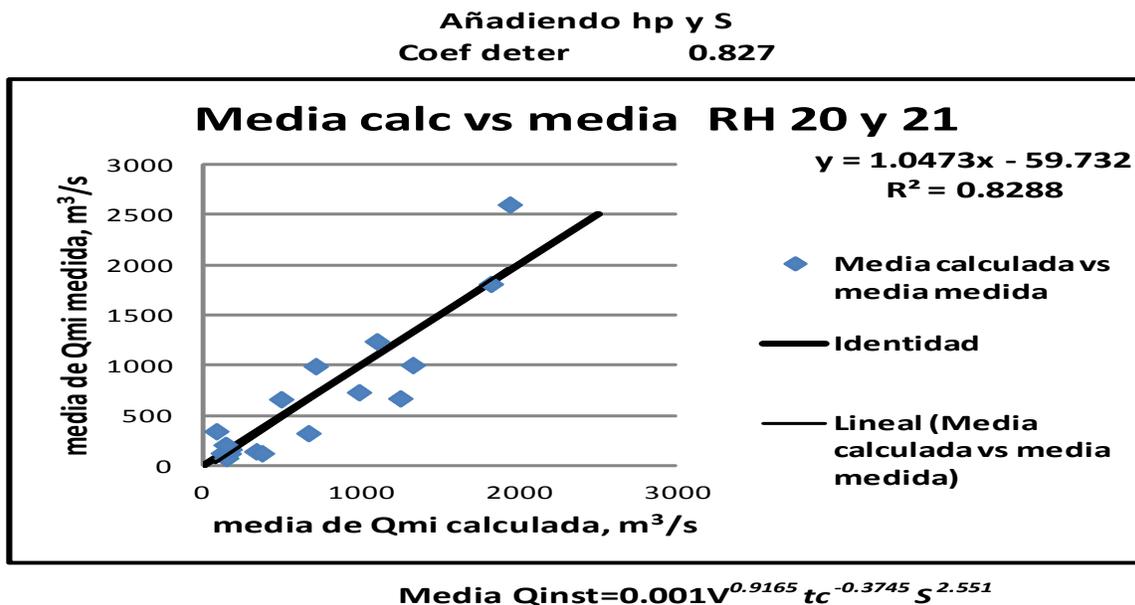


Gráfica 4.2.11 Algoritmos Genéticos RH 20 - 21

c) Ecuación del Instituto de Ingeniería

$$Q = 0.001 \times V^{0.9165} \times tc^{-0.3745} \times S^{2.551}$$

Ecuación 4.2.12



Gráfica 4.2.12 Instituto de Ingeniería UNAM RH 20 - 21

Región Hidrológica 30

a) Regresión Múltiple

Tabla 4.29 Regresión Múltiple en la RH 30

Clave	V [m³]	S [m]	Q calculado [m³/s]	Q media [m³/s]
30019	3922601280	0.0892	3847.952	5420.845
30020	149375600	0.0939	466.125	268.947
30030	1422354060	0.0988	1752.130	1725.773
30031	32606860	0.0558	403.352	358.890
30032	90530440	0.0802	435.262	955.108
30041	172483200	0.0939	509.733	347.453
30042	301030920	0.0675	1197.116	1351.765
30057	83728920	0.0675	540.257	592.664
30066	34076000	0.0802	237.087	489.781
30070	68359300	0.0759	398.126	1542.649
30088	994436420	0.1195	1046.352	262.668
30093	309024000	0.0635	1337.101	1572.229
30094	37534320	0.0635	360.497	218.910
30095	3430608440	0.0892	3540.309	6244.490
30096	54578700	0.0484	690.969	198.531
30135	195586580	0.0675	915.582	1036.733
30212	103671620	0.0939	371.432	341.800

Al realizar la regresión múltiple se obtuvieron los siguientes coeficientes:

Tabla 4.30 Coeficientes de la Regresión Múltiple RH 30

Variables	Coefficientes
Variable X 1	0.6218
Variable X 2	-1.5365
Intercepción	0.000101823

Los resultados anteriores se ven reflejados en la siguiente ecuación de regionalización:

$$Q = 1.018 \times 10^{-4} x V^{0.6218} x S^{-1.5365}$$

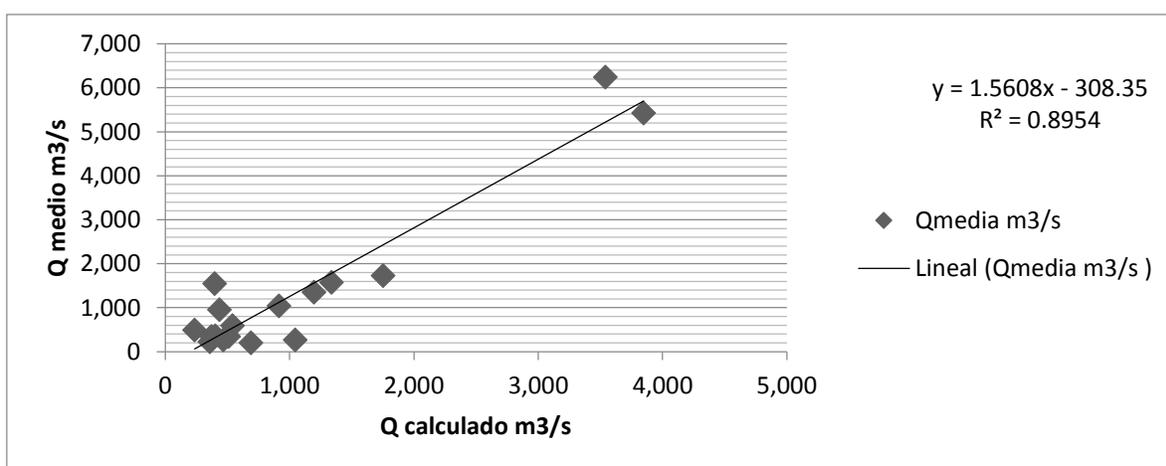
Ecuación 4.2.13

Aplicando la ecuación 4.2.1 resultan los siguientes gastos, mismos que son comparados y graficados.

Tabla 4.31 Regresión Múltiple RH 30

Q calculado [m ³ /s]	Q media [m ³ /s]
3847.952	5420.845
466.125	268.947
1752.130	1725.773
403.352	358.890
435.262	955.108
509.733	347.453
1197.116	1351.765
540.257	592.664
237.087	489.781

398.126	1542.649
1046.352	262.668
1337.101	1572.229
360.497	218.910
3540.309	6244.490
690.969	198.531
915.582	1036.733
371.432	341.800



Gráfica 4.2.13 Regresión Múltiple RH 30

b) Algoritmos Genéticos

A continuación se presenta la información resultante para la región hidrológica 9, bajo el análisis de algoritmos genéticos.

Tabla 4.32 Límites de los Algoritmos Genéticos RH 30

0.00000001	< C0 <	0.0002	=	0.0000000832
0.55	< c1 <	0.9	=	0.85167699
-4.0	< c2 <	-0.3	=	-2.5632252

De la cual se obtuvo la siguiente ecuación:

$$Q = 8.32 \times 10^{-8} \times V^{0.8517} \times S^{-2.563}$$

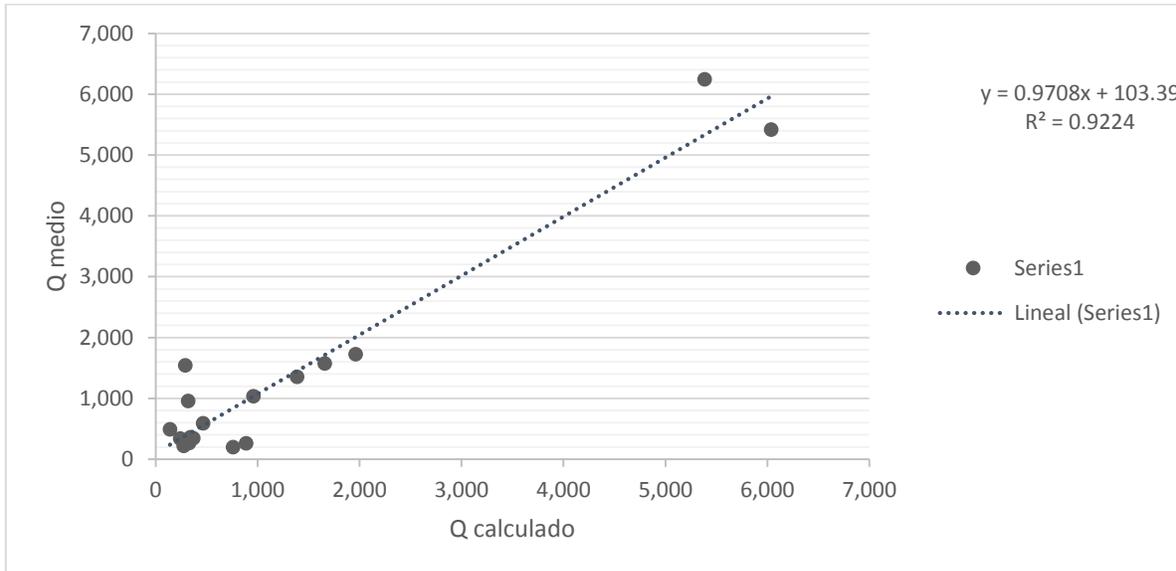
Ecuación 4.2.14

De dicha ecuación resultaron los siguientes gastos al igual que la gráfica que relaciona los gastos calculados con los gastos medios:

Tabla 4.33 Algoritmos Genéticos RH 30

	V [m3]	S [m]	Q calculado [m³/s]	Q medio [m³/s]
	3922601280.0	0.0892	6037.736	5420.845
	149375600.0	0.0939	327.292	268.947
	1422354060.0	0.0988	1961.810	1725.773
	32606860.0	0.0558	341.023	358.890
	90530440.0	0.0802	320.374	955.108
	172483200.0	0.0939	369.945	347.453
	301030920.0	0.0675	1386.178	1351.765
	83728920.0	0.0675	466.135	592.664
	34076000.0	0.0802	139.396	489.781
	68359300.0	0.0759	290.860	1542.649
	994436420.0	0.1195	887.167	262.668
	309024000.0	0.0635	1658.928	1572.229
	37534320.0	0.0635	275.463	218.910
	3430608440.0	0.0892	5386.467	6244.490
	54578700.0	0.0484	760.775	198.531
	195586580.0	0.0675	960.116	1036.733
	103671620.0	0.0939	239.796	341.8
media	670740391.8	0.1	1282.9	1348.8

DS	1194606805.2	0.0	1753.9	1772.8
CV	1.8	0.2	1.4	1.3

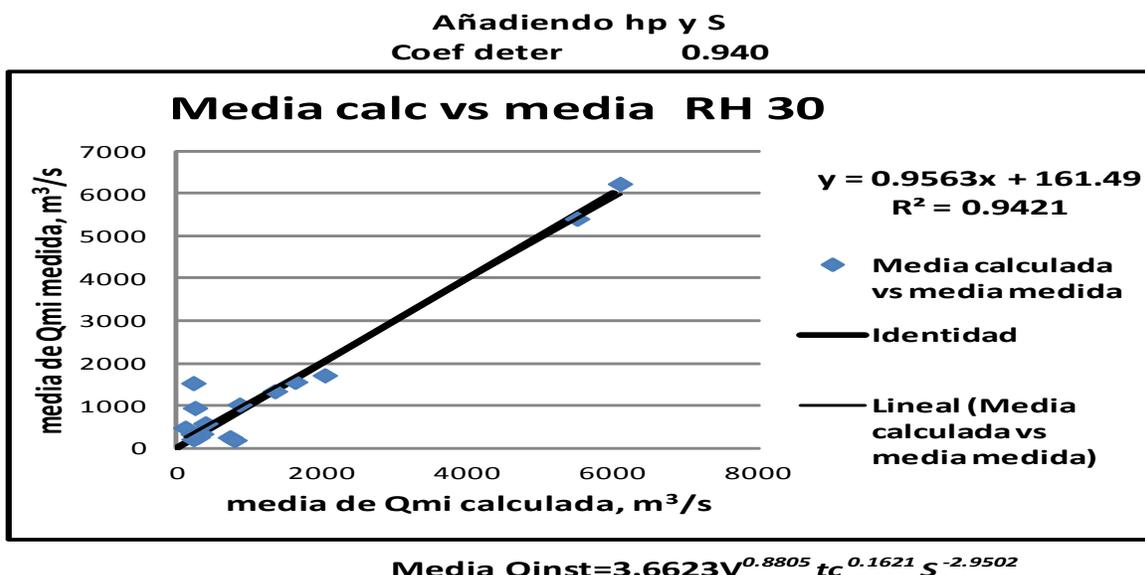


Gráfica 4.2.13 Algoritmos Genéticos RH 30

a) Ecuación del Instituto de Ingeniería

$$Q = 3.6623 \times V^{0.8805} \times tc^{0.1621} \times S^{-2.9502}$$

Ecuación 4.2.15



Gráfica 4.2.14 Instituto de Ingeniería UNAM RH 30

Capítulo V

Análisis de las ecuaciones de regionalización en México

5.1 Análisis particular de cada Región Hidrológica

En este capítulo se aborda el análisis de los resultados obtenidos por las diferentes ecuaciones planteadas en el capítulo anterior, para cada una de las regiones hidrológicas en estudio.

El análisis consiste en la comparación de las características particulares de cada una de las ecuaciones, de las variaciones en los gastos calculados y los gastos medios registrados; y con ello las variaciones en el coeficiente de determinación.

De esta forma es como a continuación se procede al análisis:

Región Hidrológica 1 – 3

A continuación se presenta la tabla 5.1, la cual resume la información más relevante de esta región hidrológica.

Tabla 5.1 Resumen de la RH 1 -3

RH 1 – 3					
Q medio [m3/s]	Regresión Múltiple		Algoritmos Genéticos		Instituto de Ingeniería UNAM
	$Q = 7.61 \times 10^{-14} V^{2.382} S^{4.262}$		$Q = 0.0003 V^{0.694} S^{-0.001}$		$Q = 0.001 V^{0.3104} t_c^{0.7405} S^{3.0198}$
	Q calculado [m3/s]	R2	Q calculado [m3/s]	R2	R2
51.909	77.502	0.8118	72.346	0.4833	0.9067
71.451	23.840		48.696		
131.975	155.113		68.408		
23.057	10.706		42.860		
58.102	69.177		86.855		
0.199	0.127		9.557		
0.411	1.985		23.608		

El análisis de la esta región hidrológica se basa únicamente en la información proporcionada por siete estaciones hidrométricas, de las cuales cuatro corresponden a la región 1 mientras que las restantes a la 3.

Las estaciones de la región hidrológicas 3 presentan la característica de tener el menor gasto registrado de este análisis.

El análisis tuvo como punto de partida una regresión múltiple generada por Excel, para los valores de gastos reportadas en esta región, se puede constatar que el valor del coeficiente independiente es prácticamente cero, mientras que el coeficiente que afecta al volumen es superior a la unidad, y por lo tanto se comete un error, mismo que se detalló en el capítulo tercero de esta tesis.

Otro error que se comete es considerar el coeficiente de la infiltración con un valor positivo, en este caso de 4.262

Considerando los coeficientes anteriores y con ello dar pie al cálculo de los escurrimientos, se obtuvo un coeficiente de determinación del 0.8118.

El segundo análisis que se realizó, tomó en cuenta los errores en los coeficientes de la Regresión Múltiple, y se limitaron los valores para que fueran congruentes. El análisis se apoyó en el programa de Algoritmos Genéticos.

Para tomar como definitivo el valor de los coeficientes se elaboraron diferentes alternativas, se inicia proponiendo unos límites cercanos a los arrojados por la regresión múltiple, si los resultados coinciden con los límites propuestos se amplió el límite de búsqueda, con el objetivo que el valor del coeficiente quede lo más centrado posible, en el rango de valores propuestos.

Bajo las consideraciones anteriores, el programa de Algoritmos Genéticos arroja que el valor del coeficiente independiente es de 0.003, mientras que el del volumen es de 0.694 y referente a la infiltración es de -0.001, este último quedó en el límite propuesto, pero se acepta ya que se busca que la infiltración sea negativa.

Pese a las consideraciones anteriores, los dos valores que presentan los gastos más inferiores y que son de la región hidrológica 3, presentan errores, ya que los gastos calculados difieren demasiado de los registrados.

Aun cuando se delimitan los coeficientes, para que la ecuación tenga una lógica y pueda ser aplicable, el coeficiente de determinación resultante bajo el análisis de Algoritmos Genéticos es de 0.4833

Finalmente se presenta el análisis de la ecuación que previamente había desarrollado Instituto de Ingeniería de la UNAM, en esta ecuación el gasto se calcula en función de tres parámetros (el volumen, el tiempo de concentración y la infiltración) teniendo como método de cálculo la utilización de un programa de algoritmos genéticos; este análisis al igual que el generado por la Regresión Múltiple no se fijan ningún tipo de restricciones a los coeficientes.

La ecuación del Instituto de Ingeniería UNAM, presenta el mejor coeficiente de determinación de los tres cálculos realizados al ser de 0.9067; pero su ecuación

presenta dos deficiencias ya que tomó como positivo el valor de la infiltración y el del tiempo de concentración.

Región Hidrológica 9

Tabla 5.2 Resumen de la RH 9

RH 9					
Q medio [m3/s]	Regresión Múltiple		Algoritmos Genéticos		Instituto de Ingeniería UNAM
	Q = 6.249 x 10 ⁻¹⁰ V ^{0.9415} S ^{-3.6563}		Q = 7.2 x 10 ⁻¹⁰ V ^{0.92} S ^{-3.75}		Q = 1.2208 V ^{1.2204} tc ^{-0.51} S ^{-3.5978}
	Q calculado [m3/s]	R ²	Q calculado [m3/s]	R ²	R ²
1659.100	1689.413	0.9458	1636.304	0.9474	0.9943
334.592	357.938		365.042		
412.773	346.528		345.511		
1265.438	979.308		1013.851		
319.047	272.053		296.420		
489.309	519.438		530.403		
1303.901	1263.742		1239.897		
802.147	902.325		919.656		
1168.529	1332.516		1348.452		
197.346	247.778		265.414		

Para la región hidrológica 9 se cuenta con información de 10 estaciones hidrométricas, en general presenta un escurrimiento medio cercano a los 800 m³ /s, mientras que la infiltración media es de 0.9 m, y el valor medio del volumen es de 952 x 10⁶ m³

Al realizar el análisis bajo una regresión múltiple, se obtuvieron los siguientes resultados:

- El coeficiente el volumen es de 0.9415, por lo cual es inferior a la unidad, y por lo tanto correcto.
- El coeficiente de infiltración es de -3.6563, y con ello es aceptable.

Al realizar un segundo análisis pero ahora apoyado en el programa de Algoritmos Genéticos, se encontró que:

- El coeficiente independiente varió poco respecto al arrojado en la regresión múltiple.
- El valor del volumen es de 0.92, el cual sigue siendo menor a la unidad, pero que disminuyó respecto al de regresión múltiple.
- La infiltración tiene un valor negativo, con lo cual se garantiza la validez de la ecuación planteada.
- El coeficiente de determinación es de 0.9474, el cual mejora respecto al cálculo anterior.

Para concluir el análisis de la región hidrológica 9, se presenta la información del Instituto de Ingeniería UNAM:

- Para esta ecuación el coeficiente independiente varía significativamente respecto a los otros dos análisis.
- El valor del volumen es de 1.2204, el cual es superior al límite fijado, para que la ecuación se considere como válida.
- El tiempo de concentración presenta un coeficiente negativo, por lo cual es aceptable este término, pero no así la totalidad de la ecuación.
- El valor de la infiltración es -3.5978, el cual es parecido a los arrojados en los análisis anteriores.
- Finalmente la R^2 , arrojada por esta ecuación es de 0.9943, la cual es la más alta y si este fuera el único criterio para validar la ecuación, se establecería que esta ecuación es la que mejor representa a la región hidrológica; pero no es así, ya que la ecuación estima un valor superior a la unidad para el volumen, por lo cual se está cometiendo un error, y la ecuación deja de ser lógica.

Región Hidrológica 10

Tabla. 5.3 Resumen de la RH 10

RH 10					
Q medio [m3/s]	Regresión Múltiple		Algoritmos Genéticos		Instituto de Ingeniería UNAM
	$Q = 0.1255 V^{0.485} S^{0.125}$		$Q = 5.594 \times 10^{-3} V^{0.5341} S^{-0.6586}$		$Q = 0.6105 V^{0.7187} t_c^{-0.3586} S^{0.4141}$
	Q calculado [m ³ /s]	R ²	Q calculado [m ³ /s]	R ²	R ²
1711.997	1653.407	0.6587	1792.129	0.6688	0.6896
288.877	274.938		248.486		
646.361	618.212		578.421		
634.128	599.117		486.942		
1445.321	1412.692		1437.174		
362.778	346.385		412.624		
1024.042	1142.911		1252.450		
3304.437	1764.139		2020.117		
1410.232	1281.754		1232.380		
496.841	851.168		862.572		
2177.713	1928.587		2123.250		
284.520	610.751		598.471		
527.963	480.395		506.586		
948.067	805.735		852.240		
336.522	483.245		441.000		
849.201	660.805		622.459		
1058.173	501.986		438.929		
479.063	441.387		399.121		
250.718	221.800		266.663		
615.016	634.634		762.363		
454.109	522.511		584.462		
332.404	672.367		698.258		
1090.091	860.621		962.755		
1285.190	925.257		945.614		
1577.423	1094.290		1319.203		
903.517	923.750		1094.664		
946.992	1235.815		1365.021		

La región hidrológica 10, es la que presenta más estaciones hidrométricas de las 5 regiones a analizar, ya que cuenta con un total de 27 estaciones.

El volumen medio registrado es de 491 Millones de metros cúbicos, con un gasto medio de 1 115 m³/s. y un espesor de infiltración medio de 10 centímetros.

Con base en el análisis realizado bajo el criterio de Regresión Múltiple, se obtiene lo siguiente:

- El exponente del volumen es ligeramente inferior al 0.5
- El valor de la infiltración es positiva, por lo cual nuevamente se trata de un error.
- El resultado de la R^2 es de 0.6587, el cual es el menor de las tres ecuaciones analizadas.

Al proponer límites para los algoritmos genéticos, en donde la principal limitante es tener una infiltración negativa, se obtuvo lo siguiente:

- Los límites propuestos para el coeficiente del volumen tomaron un rango de 0.4 a 0.6, resultando un valor definitivo de 0.53.
- De igual manera se definió un rango de posibles valores para el coeficiente de la infiltración, el cual podría tomar valores de -3 a -0.01. Una vez realizado el análisis, se obtuvo un coeficiente de -0.6586.
- Mientras que el coeficiente de determinación resultó ser mayor que el proporcionado por la regresión múltiple, pero menor que el arrojado por la ecuación del Instituto de Ingeniería UNAM.

Finalmente de la ecuación del Instituto de Ingeniería UNAM se observa que:

- Los coeficientes de volumen y tiempo de concentración son lógicos, esto es que el volumen adopte valores positivos, probablemente superiores a 0.5, pero menores a la unidad.
- Y el valor del tiempo de concentración es negativo, con lo cual el gasto calculado tendería a ser el mayor.
- El R^2 planteada por esta ecuación es de 0.6896, la cual es la de mayor certeza respecto a los anteriores análisis. Pero nuevamente el coeficiente de infiltración es positivo, lo cual supondría un error.

Región Hidrológica 20 – 21

Tabla 5. 4 Resumen de la RH 20- 21

RH 20 - 21					
Q medio [m ³ /s]	Regresión Múltiple		Algoritmos Genéticos		Instituto de Ingeniería UNAM
	Q = 3540.7471 V ^{0.4735} S ^{4.4334}		Q = 0.11 V ^{0.4628} S ^{-0.00001}		Q = 0.001 V ^{0.9165} tc ^{-0.3745} S ^{2.551}
	Q calculado [m ³ /s]	R ²	Q calculado [m ³ /s]	R ²	R ²
1233.754	1075.506	0.5645	787.280	0.5904	0.8288
1805.464	964.444		1744.916		
986.178	704.784		647.297		
656.787	340.381		630.381		
996.959	829.651		1191.490		
120.455	142.974		269.986		
137.081	219.016		668.463		
726.312	1733.770		824.084		
117.762	241.912		736.699		
115.959	116.159		464.912		
2596.587	1468.971		1327.119		
318.416	427.871		1003.314		
664.919	1097.718		998.215		
337.759	158.325		187.837		
70.609	149.634		282.273		
157.619	173.500		326.212		
201.689	109.926	340.732			

Las regiones comprenden la costa chica de Guerrero y los límites con este estado de Oaxaca.

La región hidrológica 20 cuenta con 14 estaciones hidrométricas, mientras que la región hidrológica 21 solamente cuenta con 3 estaciones que la representen.

En conjunto presentan una volumen medio de 181 millones de metros cúbicos, con una gasto medio de 1 115 m³/s, con un espesor de infiltración de 10 cm.

Se inicia con el análisis de los resultados de la ecuación generada a partir de la regresión múltiple:

- El coeficiente independiente es muy superior a sus homólogos de las otras ecuaciones.
- El valor del volumen es de 0.4735, ligeramente inferior al 0.5 registrado habitualmente.

- El valor de la infiltración es positiva y por lo tanto incongruente.
- El valor del coeficiente de determinación es el menor de las tres ecuaciones generadas.

Análisis bajo el criterio de algoritmos genéticos:

- El coeficiente independiente tiene un valor de 0.11
- El valor del volumen varía poco respecto al mismo parámetro, pero ahora de la regresión múltiple, al pasar de 0.4735 a 0.4628
- El valor de infiltración toma el valor límite fijado que es de -0.0001

Resultado de la ecuación del Instituto de Ingeniería UNAM:

- El valor del coeficiente independiente es de 0.001
- El valor del volumen es inferior a la unidad, pero diferente al registrado en los anteriores análisis, al ser un coeficiente del orden de 0.9
- El tiempo de concentración es negativo, por lo cual es correcto.
- La infiltración es de 2.551, mismo que al ser un coeficiente negativo, supondría un error.

Región Hidrológica 30

Tabla 5.5 Resumen de la RH 30

RH 30					
Q medio [m ³ /s]	Regresión Múltiple		Algoritmos Genéticos		Instituto de Ingeniería UNAM
	Q = 1.018 x 10 ⁻⁴ V ^{0.6218} S ^{-1.5365}		Q = 8.32 x 10 ⁻⁸ V ^{0.8517} S ^{-2.5632}		Q = 3.6623 V ^{0.8805} tc ^{0.1621} S ^{-2.9502}
	Q calculado [m ³ /s]	R ²	Q calculado [m ³ /s]	R ²	R ²
5420.845	3847.952	0.8954	6037.736	0.9224	0.9421
268.947	466.125		327.292		
1725.773	1752.130		1961.810		
358.890	403.352		341.023		
955.108	435.262		320.374		
347.453	509.733		369.945		
1351.765	1197.116		1386.178		
592.664	540.257		466.135		
489.781	237.087		139.396		
1542.649	398.126		290.860		
262.668	1046.352		887.167		
1572.229	1337.101		1658.928		

218.910	360.497		275.463		
6244.490	3540.309		5386.467		
198.531	690.969		760.775		
1036.733	915.582		960.116		
341.800	371.432		239.796		

Esta región hidrológica presenta un total de 17 estaciones hidrométricas, mismas que en su conjunto reportan un gasto de 1 348 m³/s, el cual es el máximo gasto reportado en las 5 regiones hidrológicas analizadas.

La región hidrológica tiene un volumen de 670 Millones de metros cúbicos, y un espesor de infiltración de 0.1 m.

Bajo el criterio de regresión múltiple, se obtienen los siguientes resultados:

- Un volumen de 0.6218, el cual se encuentra en rango
- Una infiltración de -1.5365, con la cual se daría validez a la ecuación
- Un coeficiente de determinación de 0.8954, el cual es el menor de los tres análisis, siendo aun así muy superior, al generado en otras regiones hidrológicas.

El análisis realizado por algoritmos genéticos arroja los siguientes resultados:

- Que el coeficiente del volumen aumenta, respecto al mismo parámetro pero con regresión múltiple, al pasar de 0.6218 a 0.8517
- El valor de infiltración se limita con un coeficiente de -2.5632, que nuevamente es negativo y por lo tanto, valida la ecuación
- El R² es de 0.9224, lo cual representa un aumento respecto al de regresión múltiple.

Ecuación del Instituto de Ingeniería UNAM:

- El volumen presenta un coeficiente de 0.8805, el cual es parecido al de algoritmos genéticos.
- El tiempo de concentración es de 0.1621, mismo que al ser positivo supondría un error en la ecuación.
- La infiltración tiene un coeficiente de -2.95, el cual es parecido al proporcionado por algoritmos genéticos.

5.2 Análisis en conjunto de las Regiones Hidrológicas

Todas las regiones hidrológicas presentan características particulares, mismas que sirven para diferenciarlas unas de otras; pero de igual manera existen características que todas tienen en común mismas que se detallarán en seguida.

A continuación se presentan las consideraciones más importantes del conjunto de todas las regiones hidrológicas estudiadas, tomando a la ecuación generada por medio de algoritmos genéticos, como la ecuación de referencia y la cual es el eje de estudio de esta investigación.

Tabla 5.6 Comparación de las ecuaciones generadas para cada Región Hidrológica

RH	Método de Cálculo	Ecuación	R2
RH 1- 3	Regresión Múltiple	$Q = 7.61 \times 10^{-14} V^{2.382} S^{4.262}$	0.8118
	Algoritmos Genéticos	$Q = 0.0003 \times V^{0.694} \times S^{-0.001}$	0.4833
	IINGEN	$Q = 0.001 V^{0.3104} tc^{0.7405} S^{3.0198}$	0.9067
RH 9	Regresión Múltiple	$Q = 6.249 \times 10^{-10} V^{0.9415} S^{-3.6563}$	0.9458
	Algoritmos Genéticos	$Q = 7.2 \times 10^{-10} \times V^{0.92} \times S^{-3.75}$	0.9474
	IINGEN	$Q = 1.2208 V^{1.2204} tc^{-0.51} S^{-3.5978}$	0.9943
RH 10	Regresión Múltiple	$Q = 0.1255 V^{0.485} S^{0.125}$	0.6587
	Algoritmos Genéticos	$Q = 5.594 \times 10^{-3} \times V^{0.5341} \times S^{-0.6586}$	0.6688
	IINGEN	$Q = 0.6105 V^{0.7187} tc^{-0.3586} S^{0.4141}$	0.6896
RH 20 -21	Regresión Múltiple	$Q = 3540.7471 V^{0.4735} S^{4.4334}$	0.5645
	Algoritmos Genéticos	$Q = 0.11 \times V^{0.4628} \times S^{-0.00001}$	0.5904
	IINGEN	$Q = 0.001 V^{0.9165} tc^{-0.3745} S^{2.551}$	0.8288
RH 30	Regresión Múltiple	$Q = 1.018 \times 10^{-4} V^{0.6218} S^{-1.5365}$	0.8954
	Algoritmos Genéticos	$Q = 8.32 \times 10^{-8} \times V^{0.8517} \times S^{-2.5632}$	0.9224
	IINGEN	$Q = 3.6623 V^{0.8805} tc^{0.1621} S^{-2.9502}$	0.9421

En la tabla 5.6 se puede observar el comportamiento general de las ecuaciones, donde destaca que sólo la región hidrológica 1 -3, presenta un resultado menor el cálculo por algoritmos genéticos. En todas las demás regiones se presenta el caso contrario en donde el R² aumenta al utilizar este método de cálculo.

Tabla 5.7 Ecuaciones generadas por Algoritmos Genéticos para las Regiones Hidrológicas

RH	Ecuación	R2
1-3	$Q = 0.0003 \times V^{0.694} \times S^{-0.001}$	0.4833
9	$Q = 7.2 \times 10^{-10} \times V^{0.92} \times S^{-3.75}$	0.9474
10	$Q = 5.594 \times 10^{-3} \times V^{0.5341} \times S^{-0.6586}$	0.6688
20 -21	$Q = 0.11 \times V^{0.4628} \times S^{-0.00001}$	0.5904
30	$Q = 8.32 \times 10^{-8} \times V^{0.8517} \times S^{-2.5632}$	0.9224

En general, para todas las regiones hidrológicas el coeficiente del volumen se encuentra en rango de 0.5 a 1, pero nunca superior a este valor porque se estaría suponiendo que todas las estaciones hidrométricas registraran al mismo tiempo la tormenta máxima registrada.

Los valores del coeficiente de infiltración se limitan menores al 0, con el propósito de ser congruentes que la infiltración disminuye los escurrimientos registrados.

En todas las regiones hidrológicas el resultado del coeficiente de determinación obtenido a partir de una regresión múltiple es inferior al generado por algoritmos genéticos.

En las ecuaciones proporcionadas por el Instituto de Ingeniería UNAM, se incluye el coeficiente del tiempo de concentración, mismo que al ser eliminado en esta investigación, tiene como resultado la disminución en el coeficiente de determinación; pero a su vez el generar una ecuación con menores parámetros de búsqueda es muy favorecedor, en regiones donde hay escasa información hidrológica.

Tabla 5.8 Coeficiente de determinación de las Regiones Hidrológicas

Región Hidrológica	R ²	Región Hidrológica	No. De estaciones hidrométricas	No de cuencas
9	0.9474	9	10	16
30	0.9224	30	17	83
10	0.6688	10	28	23
20-21	0.5904	20-21	17	51
1-3	0.4833	1-3	7	31

De la tabla 5.7, se observa que la región que mejor coeficiente de determinación tiene es la Región Hidrológica 9, misma que cuenta con 10 estaciones hidrométricas y un total de 16 cuencas hidrológicas.

El segundo mejor R², está representado por la Región Hidrológica 30, donde se encuentran 17 estaciones hidrométricas.

Estas dos regiones hidrológicas tienen los coeficientes de determinación más elevados, y se puede decir que la ecuación generada es aplicable, y que se obtendrán buenos resultados.

La Región hidrológica 10, tiene la característica de ser la zona de estudio donde más estaciones hidrométricas se encuentran.

Las regiones 20 – 21 y 1 – 3, son las zonas donde menor coeficiente de determinación se obtuvo, pero también en donde las regiones 21 y 3, solamente cuentan con 3 estaciones hidrométricas cada una, teniendo poca información que represente a estas regiones.

Tabla 5.9 Características fisiográficas de las Regiones Hidrológicas

RH	Área [km ²]	V [Mm ³]	S [m]	Q [m ³ /s]
10	194 972	491.591	0.1	1 115.6
9	189 983	952.557	0.1	795.2
30	131 078	670.74	0.1	1 348.8
20-21	57 390	195.283	0.1	515.6
1-3	6 125	35.865	0.16	48.15

En la tabla 5.8 se puede observar que la región hidrológica que presenta la mayor área drenada es la correspondiente a la Región Hidrológica 10, seguida de la regiones 9 y 30, en donde el este parámetro es superior a los 130 000 km². Mientras que en las regiones 20 – 21 y 1 -3, el área drenada es muy inferior, teniendo el valor mínimo la regiones 1 – 3, con sólo 6 125 km².

No obstante el valor del volumen registrado, no sigue la tendencia anterior ya que la Región Hidrológica 9, es la que reporta la mayor cantidad al tener 952.557 millones de metros cúbicos, seguida por la región hidrológica 10 y la 9. Lo anterior nos indica que los valores de precipitación varían fuertemente de una a otra región hidrológica.

El valor del gasto, sí sigue el orden jerárquico registrado en el volumen, y nuevamente las regiones hidrológicas 20-21 y 1-3, son las que reportan la menor cantidad.

El parámetro de espesor medio de infiltración, prácticamente es constante en todas las regiones hidrológicas, esto sin importar otras características fisiográficas o hídricas de la zona, con excepción el de la Región Hidrológica 1-3, en donde el valor del espesor de infiltración fue de 16 centímetros; para las otras regiones hidrológicas el valor fue de 10 cm.

Conclusiones

- La tesis aborda uno de los problemas más usuales durante la planeación o diseño de obras hidráulicas, que es la falta de información hidrológica en el sitio donde se desea construir el proyecto.
- La Regionalización sirve para dotar de un modelo matemático a una zona donde no existe o es escasa la información hidrológica, y él poder estimar futuras avenidas.
- Esta investigación centró sus esfuerzos en el cálculo de los escurrimientos a través de una ecuación que relacionara dos parámetros (el volumen y la infiltración), pero nunca olvidando las restricciones que sus exponentes deben tener.
- En la tesis se presentan importantes definiciones de elementos que están involucrados en la Regionalización como la cuenca hidrológica, el área, el volumen, la infiltración entre otros más.
- Las ecuaciones de regionalización aquí presentadas tienen una forma potencial en donde el cálculo del gasto (variable dependiente) se realiza en función de ciertas características de la zona de estudio afectadas por unos exponentes
- El enfoque regional incorpora los datos de varias estaciones hidrométricas en una sola muestra y con ello se busca contar con mayor información para poder estimar el gasto.
- El Flood Studies Report fue la primera investigación que planteó una ecuación de Regionalización para el cálculo de avenidas.
- La ecuación planteada por el Flood Studies Report está expresada en forma potencial y relaciona nueve parámetros físico – hídricos característicos de las zonas en estudio.
- La investigación “Diseño de inundaciones para cuencas urbanas, rurales y mixtas” propone cambios a los coeficientes y exponentes de la ecuación del Flood Studies Report, al considerar que se generan importantes variaciones entre cuencas urbanas y cuencas rurales. De igual forma propone cambios en los coeficientes de infiltración y presenta importantes cambios en los

métodos de cálculo como el estadístico y el del hidrograma unitario, bases para el análisis regional.

- La regionalización ha sido utilizada en diferentes partes del mundo, como en Turquía donde se utilizó para el cálculo de los gastos de diseño para futuras centrales hidroeléctricas. De igual manera se usó en Irán para el cálculo de factores que impactan en la sequía.
- Trabajos como “Análisis Regional de Tormentas y Avenidas de Diseño, Aplicación a la Cuenca del Papalopan” y “Regionalización de Gastos Máximos en la Cuenca de la Vertiente del Pacífico Centro de la República Mexicana”, son los pioneros en el uso de la Regionalización en México y demuestran que es factible y necesario profundizar en el tema.
- En México la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es el órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en el país.
- CONAGUA clasifica al territorio nacional en 37 Regiones Hidrológicas y 13 Regiones Hidrológico – Administrativas.
- Para el estudio de Regionalización en México se seleccionaron al azar 5 Regiones Hidrológicas, con el fin de proporcionar una ecuación que las caracterice.
- Las Regiones Hidrológicas seleccionadas fueron la RH 1-3, RH 9, RH 10, RH 20 y RH 30, en donde se necesitaba información como el Número de Curva, la precipitación media, el área, el volumen, el espesor de infiltración y el gasto medio. Lo anterior para cada una de las estaciones en estudio.
- El criterio para la selección de estaciones hidrométricas fue que tuvieran un registro continuo de más de 20 años de gastos máximos instantáneos, y estar ubicadas en cuencas vírgenes (que no existan almacenamientos importantes que distorsionen la información) y por lo mismo ubicadas aguas arriba de las hidrométricas correspondientes.
- Sólo 309 de las 1471 estaciones hidrométricas cumplieron con los requisitos necesarios para el análisis de regionalización.

- La tesis aquí expuesta parte de las ecuaciones realizadas por el Instituto de Ingeniería UNAM en el año 2012 - 2013, donde el gasto se calcula en función de tres parámetros (Volumen, espesor de infiltración y tiempo de concentración), en donde ningún exponente presenta alguna restricción.
- Se compararon las 3 ecuaciones generadas (Instituto de Ingeniería UNAM, Regresión Múltiple y Algoritmos Genéticos), en donde el coeficiente de correlación más alto fue el del Instituto de Ingeniería UNAM, pero su ecuación involucraba 3 parámetros lo que la hacía más complicada, aunado a lo anterior sus exponentes no presentaban limitaciones y en ocasiones representaban valores ilógicos.
- El cálculo de los exponentes que afectan a las variables independientes en la predicción del gasto, se obtuvieron gracias a la utilización de dos formas de cálculo, Regresión Múltiple y Algoritmos Genéticos.
- Los Algoritmos Genéticos son métodos adaptativos basados en la teoría de selección natural de Darwin, en donde un operador de selección escoge de la población a aquellos que son más aptos, logrando que los nuevos valores generados sean mejores que sus predecesores; pero de igual manera son propicios a aspectos como la mutación.
- Retomando que a través de algoritmos genéticos es posible determinar los exponentes que afectan las variables independientes, es de recalcar que el exponente relativo al volumen debe tomar un rango inferior a 1, ya que de lo contrario se supondría que todas las estaciones hidrométricas en una región registran al mismo tiempo la máxima precipitación.
- El exponente que afecta la infiltración deberá ser negativo ya que representa que a mayor infiltración menor gasto se registrará.
- El tiempo de concentración presenta una relación cercana con el área, ya que a mayor área mayor tiempo de concentración y viceversa. Esta es la principal razón para eliminar el término de la ecuación del Instituto de Ingeniería UNAM, ya que se considera que sobrevalora el valor del área.
- El método del Algoritmos Genéticos fue la forma en la que se obtuvieron mejores resultados, esto al generar una ecuación con sólo dos parámetros (volumen e infiltración), y donde sus exponentes tenía restricciones para que siempre fueran aceptables.

- Tomando como válidas las ecuaciones de los Algoritmos Genéticos, se obtuvo que el valor del exponente del volumen tiene un rango menor a 1.
- Que el exponente de la infiltración toma valores negativos.
- Que en todas las regiones en estudio el resultado del coeficiente de determinación obtenido por regresión múltiple fue menor al de algoritmos genéticos.
- La ecuación de regionalización generada por medio de algoritmos genéticos sólo se consideran dos parámetros, sin embargo presenta buenos resultados, haciendo de esta una ecuación sencilla y práctica para implementar.
- De esta forma es como la Región Hidrológica 9 presenta el mejor R^2 , mientras que las regiones 1-3 y 20- 21 presentan los menores resultados
- El espesor de infiltración fue de 10 centímetros en prácticamente todas las regiones hidrológicas

Bibliografía

- 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.
- Aparicio, M.F., (2012), "**Fundamentos de Hidrología de Superficie**". Editorial LIMUSA. México.
- Arganis, J.M., "**Programación No Lineal: Aplicación de la optimización vía AG para obtener parámetros de una función de distribución**". México.
- Arganis, J.M., Carrizosa, E.E., Guzmán, G.H., (2012), "**Regionalización de tormentas y avenidas de diseño en la República Mexicana para la estimación de avenidas de diseño**". Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- **Atlas Digital del Agua**, (2012), Sistema Nacional de Información del Agua, CONAGUA. México.
- 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 Congreso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Brazil.
- **Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS)**, CONAGUA, México.
- Breraña, P.A., Jacobo, V.M., (2006), "**Principios y Fundamentos de la Hidrología de Superficial**", Universidad Autónoma Metropolitana, México.
- Byzedi, M., Saghafian, B., Mohammadi, K. and Siosemarde, M. "**Regional analysis of streamflow drought: a case study in southwestern Iran**". Environ Earth Sci (2014) 71:2955-2972. DOI 10.1007/s 12665-013-2674-7.
- Carrizosa, E.E., (1997), "**Regionalización de Gatos Máximos en la Cuenca de la Vertiente del Pacífico Centro de la República Mexicana**". México.
- Cuevas, M., Garrido, A., Sotelo, E., "**Regionalización de las cuencas hidrográficas en México**". Instituto de Ingeniería UNAM, México.

- Domínguez, M.R., (1981), “**Análisis Regional de tormentas y avenidas de diseño. Aplicación a la cuenca del Papaloapan**”. México.
- Dominguez, M.R., (1983), “**Desing floods for mixed urban/ rural catchments**”. Universidad Nacional Autónoma de México. Report No. IT 221.
- Domínguez, M.R., Arganis, J.M., Gonzáles, 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**”. Instituto de Ingeniería UNAM. México.
- Domínguez, M.R., Esquivel, G.G., Baldemar, M.A., Mendoza, R.A., Arganis, J.M., Carrisoza, E.E., (2008), “**Manual del modelo para el pronóstico de escurrimiento**”. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería UNAM. México.
- Erazo, C.A., (2004), “**Regionalización de caudales máximos y medios en el Salvador**”. Servicio Hidrológico Nacional del Salvador, El Salvador, Salvador.
- Fuentes, M.O., Sáncghez, C.J., Domínguez, M.R., Lorenzo, M.H., Esquivel, G.G., (2012), “**Manual de Diseño de Obras Civiles**”, Comisión Federal de Electricidad, Sección A. Hidrotecnia, México.
- Ganancias, M.F., (2010), “**Evaluación de metodologías de regionalización hidráulica: aplicación a los caudales máximos de cuencas representadas de la región sur- oeste de la provincia de Córdoba**”. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Hines. (2005), “**Probabilidad y estadística para ingeniería**”, 3° edición, México.
- Isik, S. and Singh, V., (2008), “**Hydrologic regionalization of watersheds in Turkey**”. Journal of Hydrologic Engineering.13:824-834.
- Olguin, G., Rivera, F., Salas, N., (2011), “**Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado**”, Ingeniería Investigación y Tecnología, Vol XII, Núm 3.

- Sotelo, A.G., (1994) “**Apuntes de Hidráulica II. Capítulo VIII. Diseño Hidráulico de Obras**”. Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Sutcliffe, J.V., “**Methods of Flood Estimation. A guide to the flood studies report**”. Institute of Hydrology. Wallingford Oxon. England.
- Zamanillo, E., (2008), “**Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos**”, Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.