



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

REGIONALIZACIÓN DE DATOS DE ESCURRIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE
AVENIDAS DE DISEÑO EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA 30.

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

PRESENTA:
MARTÍNEZ COCOLETZI ADRIÁN ALEJANDRO

TUTOR PRINCIPAL
RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA. – INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO.
NOVIEMBRE, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo

Secretario: Dr. Beresowsky Verduzco Moisés

Vocal: Dr. Domínguez Mora Ramón

1^{er}. Suplente: M.I. Franco Víctor

2^{do}. Suplente: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO.

TUTOR DE TESIS:

DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

FIRMA

Agradecimientos

A mis padres que son fuente de inspiración incondicional en la realización del presente trabajo y porque han sabido formarme con valores, los cuales han sido la raíz de lo que he logrado en mi formación profesional y como persona.

A mis hermanos por estar cuando los necesito, ya que son parte de mi vida a todo momento.

Al Dr. Ramón Domínguez Mora, por su paciencia, amabilidad y dedicación que hicieron posible la culminación de esta tesis.

Ala Dra. Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana, al Dr. Beresowsky Verduzco Moisés, al Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo, al M.I. Franco Víctor y al M.I Eliseo Carrizosa por sus sugerencias recomendaciones en la complementación de dicha tesis.

A mis amigos del Instituto de ingeniería de la UNAM con quien colabore y trabaje; Cecilia Correa, Sinuhe, Carolina, Magaly, Lalito, Paty, Mauricio, Adam, Olaf, Mario, Memo, Robert, Edgar, Giuliana, Lizbeth, Jackie, Mike, Diego, Adrián, Marcos, Valentín, Daysi, Cristian, Saúl y a todos aquellos compañeros que fueron parte de esta bonita etapa, he hicieron de este trayecto lo más agradable y ameno.

Al CONACYT e Instituto de ingeniería de la UNAM, por el estímulo económico recibido, ya que sin ello no hubiera sido posible la elaboración de este trabajo.

Y cada ola quisiera ser la última quedarse congelada
en la boca de sal y arena que mudamente
le está diciendo siempre: Adelante.

José Emilio pacheco (1939-2014)

ÍNDICE

CAPITULO 1.....	1
Introducción	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Metodología.....	2
1.4 Descripción de capítulos.....	4
CAPITULO 2.....	6
Antecedentes, Regionalización de caudales.....	6
2.1 Panorama internacional.....	6
2.2 Panorama Nacional.....	10
CAPITULO 3.....	12
Marco teórico.....	12
3.1 Regionalización.....	12
3.1.1 Regionalización de caudales.....	13
3.2 Métodos y Criterios de Regionalización	14
3.2.1 Pruebas de homogeneidad e independencia	18
3.2.2 Prueba estadística de Helmert.....	18
3.2.3 Prueba estadística de t de Student	18
3.2.4 Prueba estadística de Cramer.....	19
3.2.5 Prueba de independencia de Anderson	20
3.3 Función de distribución de probabilidades	20
3.3.1 Distribución Gumbel.....	21
3.3.2 Doble Gumbel o Gumbel Mixta	21
3.4 Características fisiográficas	22
3.5 Programa AX.....	23
CAPÍTULO 4.....	25
La Región hidrológica	25
4.1 Región hidrológica Grijalva –Usumacinta (RH-30)	25
4.1.1 Cauces principales y ciclo hidrológico.....	28
4.1.2 Clima	30
4.2 Fisiográficas, Provincias y Sub-Provincias fisiográficas	30

CAPÍTULO 5.....	34
Evaluación, Etapa primaria (regiones homogéneas) y Secundaria (ecuaciones regionales).	34
5.1 Depuración de datos de escurrimiento y obtención de las regiones homogéneas, Etapa primaria.	34
5.1.1 Formación de grupos y criterios de homogeneidad.....	37
5.1.2 Formación Grupo 1	42
5.1.3 Formación Grupo 2	43
5.1.4 Formación Grupo 3	43
5.1.5 Formación Grupo 4	44
5.1.6 Funciones de distribución de probabilidades.....	45
5.1.7 Valores extrapolados para diferentes periodos de retorno	46
5.2 Ecuaciones potenciales para el cálculo de los Gastos Máximos Instantáneos, Etapa Secundaria.	53
5.2.1 Análisis del conjunto de todas las estaciones (Ecuaciones Globales).	55
5.2.1.1 Evaluación de una variable fisiográfica, Global	55
5.2.1.2 Evaluación de dos variables fisiográficas, Global.....	55
5.2.1.3 Evaluación de tres variables fisiográficas, global	57
5.2.1.4 Ecuaciones de la Evaluación global.	58
5.2.2 Análisis por grupo utilizando las ecuaciones obtenidas al analizar todas las estaciones (Análisis Global por Grupo).....	59
5.2.2.1 Evaluación de una VF, Análisis Global por Grupo.....	59
5.2.2.2 Evaluación de dos VF, Análisis Global por Grupo	59
5.2.2.3 Evaluación de tres VF, Análisis Global por Grupo.....	62
5.2.2.4 Valoración del error porcentual de las mejores combinaciones, forma Global por grupo	63
5.2.3 Análisis por grupo (grupo independiente).....	65
5.2.3.1 Evaluación de una variable fisiográfica, grupo independiente	65
5.2.3.2 Evaluación de dos variables fisiográficas, grupo independiente	68
5.2.3.3 Evaluación de tres variables fisiográficas, grupo independiente.....	71
5.2.3.4 Valoración del error porcentual de las mejores combinaciones por grupo independiente	72
5.2.4 Ecuaciones finales, de la Región hidrológica	75
5.2.4.1 Grupo 1, Ecuaciones finales	75
5.2.4.2 Grupo 2, Ecuación final.....	76

5.2.4.3 Grupo 3, Ecuación final.....	77
5.2.4.4 Grupo 4, Ecuación final.....	78
Capítulo 6	79
Caso de estudio, recomendaciones y conclusiones.....	79
6.1 Caso de estudio.....	79
6.2 Recomendaciones	81
6.3 Conclusiones finales	82
Bibliografía.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE PROCESOS DE REGIONALIZACIÓN DE LA RH-30.....	4
FIGURA 2. LOS CV DE LAS SERIES SINTÉTICAS Y OBSERVADAS.....	17
FIGURA 3. LOS CV SERIE SINTÉTICAS Y OBSERVADAS EN BASE A LA FRECUENCIA.....	17
FIGURA 4. DIAGRAMA DE PROCESOS DENTRO DEL PROGRAMA AX.EXE.....	24
FIGURA 5. CLASIFICACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO	26
FIGURA 6. REGIONES HIDROLÓGICAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA.....	26
FIGURA 7. SUB-REGIONES HIDROLÓGICAS GRIJALVA –USUMACINTA (RH 30).....	27
FIGURA 8. PRINCIPALES CAUCES DE LA RH-30	29
FIGURA 9. ALTIMETRÍA DE LA REGIÓN RH-30	31
FIGURA 10. SUB- PROVINCIAS FISIGRÁFICAS DE LA RH-30.	32
FIGURA 11. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 30 QUE SE ENCUENTRA EN EL BANDAS Y META DATOS DE CONABIO.....	35
FIGURA 12. DISPERSIÓN DE DATOS DE LAS ESTACIONES 30212 (SANTO DOMINGO) Y 30041 (LA ESCALERA).....	36
FIGURA 13. RELACIÓN ENTRE EL ÁREA DE LA CUENCA CONTRA QMI ANUAL DE LAS 20 ESTACIONES RH-30.....	39
FIGURA 14. GRUPOS FORMADOS DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 30.	42
FIGURA 15. GRUPOS FORMADOS Y SUB-PROVINCIAS FISIGRÁFICAS.....	45
FIGURA 16. AJUSTE GLOBAL DE FUNCIONES DE PROBABILIDAD DEL GRUPO 1.	46
FIGURA 17. AJUSTE DOBLE GUMBEL DEL GRUPO 1.	47
FIGURA 18. VALORES MEDIDOS Y CALCULADOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO DEL GRUPO 1.	48
FIGURA 19. VALORES MEDIDOS VS CALCULADOS DEL GRUPO 2, DOBLE GUMBEL.	49
FIGURA 20. VALORES MEDIDOS Y CALCULADOS DEL GRUPO 3, GUMBEL.....	50
FIGURA 21. VALORES MEDIDOS Y CALCULADOS DEL GRUPO 4, DOBLE GUMBEL.....	50
FIGURA 22. GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS VS SERIE OBSERVADA DEL GRUPO 1.	51
FIGURA 23. GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS VS SERIE OBSERVADA DEL GRUPO 2.....	52
FIGURA 24. GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS VS SERIE OBSERVADA DEL GRUPO 3.....	52
FIGURA 25. GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS VS SERIE OBSERVADA DEL GRUPO 4.....	52
FIGURA 26. ÁREA DE LA CUENCA DRENADA Y LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL, QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS DEL CONJUNTO DE ESTACIONES SELECCIONADAS (FORMA GLOBAL).....	55
FIGURA 27. RESUMEN DE LAS GRÁFICAS CON RESPUESTA A LA COMBINACIÓN DE 2 VF DEL GRUPO DE ESTACIONES DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	56
FIGURA 28. GRÁFICAS CON RESPUESTA A LA COMBINACIÓN DE 2 VF DEL CONJUNTO DE ESTACIONES DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	58
FIGURA 29. GRÁFICAS DE 1 VF UTILIZANDO LA MEJOR RESPUESTA DE LAS ECUACIONES GLOBALES A CADA GRUPO (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	59

FIGURA 30. GRÁFICAS DE 2 VF UTILIZANDO LA MEJOR RESPUESTA DE LAS ECUACIONES GLOBALES A CADA GRUPO (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	60
FIGURA 31. CONTINUACIÓN DE GRÁFICAS DE 2 VF UTILIZANDO LA MEJOR RESPUESTA DE LAS ECUACIONES GLOBALES A CADA GRUPO (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	61
FIGURA 32. GRÁFICAS DE 3 VF UTILIZANDO LA MEJOR RESPUESTA DE LAS ECUACIONES GLOBALES A CADA GRUPO (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	62
FIGURA 33. GRÁFICAS DE 1 VF UTILIZANDO LAS ESTACIONES DEL GRUPO 1 (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS). ...	65
FIGURA 34. GRÁFICAS DE 1 VF UTILIZANDO LAS ESTACIONES DEL GRUPO 2 (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS). ...	66
FIGURA 35. GRÁFICAS DE 1 VF UTILIZANDO LAS ESTACIONES DEL GRUPO 3 (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS). ...	67
FIGURA 36. GRÁFICAS DE 1 VF UTILIZANDO LAS ESTACIONES DEL GRUPO 4 (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS). ...	67
FIGURA 37. GRÁFICAS DEL GRUPO 1 CON RESPUESTA A COMBINACIONES DE 2 VF (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	68
FIGURA 38. GRÁFICAS DEL GRUPO 2 CON RESPUESTA A COMBINACIONES DE 2 VF (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	69
FIGURA 39. GRÁFICAS DEL GRUPO 3 CON RESPUESTA A COMBINACIONES DE 2 VF (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	70
FIGURA 40. GRÁFICAS DEL GRUPO 4 CON RESPUESTA A COMBINACIONES DE 2 VF (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	70
FIGURA 41. GRÁFICAS DEL GRUPO 1 CON RESPUESTA A COMBINACIONES DE 3 VF (QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS).	71
FIGURA 42. ESTACIONES 30053 Y 30097, CASOS DE ESTUDIO.	80

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. REGIONES HIDROLÓGICAS FRONTERA SUR.	27
TABLA 2. ESTACIONES QUE CONSIDERA EN EL ESTUDIO DE REGIONALIZACIÓN.	37
TABLA 3. PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA RH-30, DONDE; "X" SIGNIFICA QUE NO PASA LA PRUEBA, POR EL CONTRARIO, "✓" SIGNIFICA QUE PASA.	38
TABLA 4. ESTACIONES CONSIDERADAS CON SU CORRESPONDIENTE ÁREA DE LA CUENCA (A), QMI, CV Y RELACIÓN (A/QMI). ...	39
TABLA 5. ESTADÍSTICOS RH-30 DE LAS 19 ESTACIONES SELECCIONADAS.	41
TABLA 6. VALORES EXTRAPOLADOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO, GRUPO 1.	47
TABLA 7. FACTORES EXTRAPOLADOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO DE LOS GRUPOS FORMADOS.	48
TABLA 8. VALORES EXTRAPOLADOS DEL GRUPO 3 POR DIFERENTES FUNCIONES DE PROBABILIDAD.	49
TABLA 9. PARÁMETROS DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DOBLE GUMBEL Y GUMBEL DE CADA GRUPO.	51
TABLA 10. VARIABLES FISIográfICAS DE LAS ESTACIONES DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA 30.	53
TABLA 11. COMBINACIONES 2 VF PARA LA OBTENCIÓN DE ECUACIONES EN SU FORMA GLOBAL EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA.	56
TABLA 12. COMBINACIONES 3 VF PARA LA OBTENCIÓN DE ECUACIONES EN SU FORMA GLOBAL EN LA REGIÓN HIDROLÓGICA.	57
TABLA 13. VALORES DEL MEJOR COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN(R^2) POR GRUPO DE LA EVALUACIÓN GLOBAL.	63
TABLA 14. COMPARACIÓN DEL ERROR PORCENTUAL (E%) DE LAS MEJORES RESPUESTA DEL (R^2) DEL GRUPO 1.	64
TABLA 15. COMPARACIÓN DEL ERROR PORCENTUAL (E%) DE LAS MEJORES RESPUESTA DEL (R^2) DEL GRUPO 2.	64
TABLA 16. COMPARACIÓN DEL ERROR PORCENTUAL (E%) DE LAS MEJORES RESPUESTA DEL (R^2) DEL GRUPO 3.	65
TABLA 17. COMBINACIONES QUE SE CONSIDERAN PARA LA OBTENCIÓN DE LAS ECUACIONES A CADA GRUPO.	68
TABLA 18. COMBINACIONES 3 VF QUE SE CONSIDERAN PARA LA OBTENCIÓN DE LAS ECUACIONES A LOS GRUPO 1 Y 2.	71
TABLA 19. VALORES DEL R^2 A LAS MEJORES RESPUESTAS DE LAS COMBINACIONES DE CADA GRUPO.	72
TABLA 20. VALORES DEL ERROR PORCENTUAL DEL GRUPO 1, RESPUESTA DE LOS GASTO (QMI) OBSERVADOS VS CALCULADOS, ECUACIONES DE INTERÉS FINALES.	73
TABLA 21. VALORES DEL ERROR PORCENTUAL DEL GRUPO 2, RESPUESTA DE LOS GASTO (QMI) OBSERVADOS VS CALCULADOS, ECUACIONES DE INTERÉS FINALES.	73
TABLA 22. VALORES DEL ERROR PORCENTUAL DEL GRUPO 3, RESPUESTA DE LOS GASTO (QMI) OBSERVADOS VS CALCULADOS, ECUACIONES DE INTERÉS FINALES.	74
TABLA 23. VALORES DEL ERROR PORCENTUAL GRUPO 4, COMBINACIÓN A-S.	74
TABLA 24. ECUACIONES FINALES, PARA LOS GRUPOS HOMOGÉNEOS, CON SU RESPECTIVO COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN.	75

TABLA 25. COMBINACIONES FINALES DEL GRUPO 1, GASTOS CALCULADOS.	75
TABLA 26. COMBINACIONES FINALES DEL GRUPO 1, ERRORES PORCENTUALES.	76
TABLA 27. COMBINACIONES FINALES DEL GRUPO 2, GASTOS CALCULADOS.	76
TABLA 28. COMBINACIONES FINALES DEL GRUPO 2, ERRORES PORCENTUALES.	77
TABLA 29. COMBINACIONES FINALES DEL GRUPO 3, GASTOS CALCULADOS.	77
TABLA 30. COMBINACIONES FINALES DEL GRUPO 3, ERRORES PORCENTUALES.	77
TABLA 31. COMBINACIÓN FINAL DEL GRUPO 4 GASTOS CALCULADOS Y ERRORES PORCENTUALES.	78
TABLA 32. VALORES ESTADÍSTICOS, INFILTRACIÓN POTENCIAL MÁXIMA (IF) Y ÁREA DE LA CUENCA DRENADA (A) DE LAS ESTACIONES SELECCIONADAS.	80
TABLA 33. VALORES DEL GASTO DE DISEÑO CON LA ECUACIÓN 5.20 Y LA RELACIÓN DE GASTO OBSERVADOS CONTRA LOS MEDIDOS.	81
TABLA 34. QMI OBSERVADOS CONTRA QMI CALCULADOS, DE LAS ESTACIONES 30053 Y 30097.	81
TABLA 35. ERROR PORCENTUAL DE LOS QMI ANUALES CALCULADOS CON LAS ECUACIONES REGIONALES.	82
TABLA 36. VALORES DE LOS ERRORES PORCENTUALES DE LOS GASTOS DE DISEÑO DE LOS ESTUDIOS DE DOMÍNGUEZ Y GUZMÁN (2015) Y EL PRESENTE ANÁLISIS.	83

Resumen

En la región hidrológica del Grijalva –Usumacinta (RH-30) existen cauces donde los datos estadísticos están limitados o no existe información suficiente, ya sea para prevención de desastres o manejo del recurso hídrico. En estudios preliminares, Guzmán (2015) realizó relaciones matemáticas con base a las características fisiográficas y gastos de diseño, sin embargo, solo es representativo a nivel región hidrológica por ello es de importancia dividir en regiones para el mejor manejo del recurso. El presente análisis, a partir de las provincias fisiográficas, área de la cuenca e información estadística, de las estaciones hidrométricas existentes (Banco Nacional de aguas superficiales) se hace una regionalización con características similares; dichas regiones son analizadas para obtener relaciones matemáticas que permitan calcular los gastos de diseño con relación a las variables fisiográficas de cada cuenca de estudio.

CAPITULO 1

Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

Las cuencas del país se encuentran agrupadas en regiones hidrológicas para la realización de estudios hidrológicos y calidad de agua, por lo que es de importancia medir el comportamiento climatológico e hidrométrico para la evaluación de proyectos futuros.

Hoy en día, la información de las estaciones climatológicas esta mejor distribuida en comparación con las estaciones hidrométricas; por lo que no existe información completa y suficiente de escurrimientos superficiales, en mucho de los casos la base de datos de cada estación de la región hidrológica no está completa y no es suficiente para su análisis, debido a ello, es necesario recurrir por otros caminos para obtener los datos necesarios y posteriormente realizar los estudios que garanticen la correcta toma de decisiones en la estimación de los gastos de diseño.

La importancia de tomar valores hidrométricos adecuados influye directamente en un proyecto, debido a la dificultad y costoso de medir el escurrimiento en cuencas en la que no existen datos estadísticos suficientes.

1.2 Objetivo

La presente investigación estudia la región hidrológica 30 ubicada en la zona sur del país (Grijalva - Usumacinta) conformada mayormente por los estados de Chiapas y Tabasco con la finalidad de encontrar relaciones matemáticas que permitan obtener los gastos de diseño para diferentes periodos de retorno a partir de cuencas en las que no se tienen datos estadísticos.

El análisis está dividido en dos partes, la primera se determina regiones homogéneas por medio de las provincias fisiográficas clasificadas por el instituto de geografía de la UNAM; considerando la homogeneidad y congruencia de datos observados de las estaciones hidrométricas seleccionadas, la segunda parte se realiza la búsqueda de ecuaciones que relacionen los gastos de diseño para cada región homogénea.

1.3 Metodología

El procedimiento propuesto para la estimación de avenidas de diseño consta de dos partes principales: la primera, se definen zonas similares de manera estadística y espacial dando como resultado que se definan 4 grupos homogéneos, el cual se constituye de la siguiente manera:

1. Valoración de las estaciones hidrométricas de la región hidrológica para el análisis, la información hidrométrica observada se evalúa para evitar tener alteraciones antropogénicas significativas dentro de la serie temporal.
2. Valoración de datos estadísticos más importantes tales como el coeficiente de variación, media de los gastos máximos instantáneos anuales (QMI), variancia, desviación estándar, máximo y mínimo de los QMI, dichos valores estadísticos son de importancia para diferenciar el comportamiento hidrométrico en cada cuenca en la región hidrológica.
3. Agrupación por medio de provincias fisiográficas así como la relación de las áreas de las cuencas y coeficientes de variación para la formación de grupos (regiones homogéneas), con observaciones en la distribución espacial y estadística.
4. Para cada grupo, se realizan ajustes de una función de distribución de probabilidades con ayuda de un software especializado (Ax.exe), identificando la mejor función para los valores observados de los QMI.
5. Para cada grupo se estiman factores que permiten pasar de la media de los gastos máximos anuales a los gastos máximos asociados a distintos periodos de retorno, siendo estos, valores extrapolados de la mejor función de distribución de probabilidades.

La segunda parte se determinan ecuaciones exponenciales a partir de las características fisiográficas, considerando los gastos máximos instantáneos anuales (QMI) de cada estación hidrométrica con la relación de las variables fisiográficas y datos característicos de las cuencas, tales como; área de la cuenca, pendiente, precipitación, tiempo de concentración, número de curva, Infiltración potencial máxima, longitud del cauce principal y pendiente de la cuenca principal (Guzmán, 2016); permitiendo saber la correlación de los gastos observados contra los calculados en las ecuaciones para cada grupo. En la obtención de las ecuaciones que representan los gastos de diseño se consideran los siguientes puntos.

6. Recopilación de la información de las variables fisiográficas consideradas en cada cuenca dentro de la región.
7. Representación de una ecuación exponencial con la relación del QMI observados contra una variable fisiográfica por cada grupo de interés y de forma Global (considera los grupos formados de la región hidrológica), analizando el coeficiente de determinación (R^2) de la relación al QMI anual calculados contra los observados.
8. Representación de una ecuación exponencial con la relación del QMI contra dos variables fisiográficas por cada grupo de interés, así como de manera global, considerando el punto anterior, las variables fisiográficas con mejor respuesta de la relación al QMI anual calculados contra los observados ($R^2 \sim 1$).
9. Representación de una ecuación exponencial con la relación del QMI contra tres variables fisiográficas a los grupos conformados por 5 o más estaciones hidrométricas, así como, de manera global aunado a la mejor respuesta de los puntos anteriores (7 y 8) y con la mejor respuesta de la relación QMI anual calculados contra los observados ($R^2 \sim 1$).

Esto permite analizar el R^2 obteniendo las ecuaciones finales, concluyendo en modelos matemáticos recomendados por cada grupo, aunado a los factores extrapolados calculados en la primera parte, es posible determinar la media de los gastos máximos instantáneos anuales (QMI) y pasar en la obtención de los gastos máximos asociados a distintos periodos de retorno (gastos de diseño).

De manera esquemática la figura 1, muestra el diagrama de procesos para la obtención de las ecuaciones finales considerando los pasos de la etapa primaria y secundaria en la obtención de los gastos de diseño y concluyendo en la aplicación.

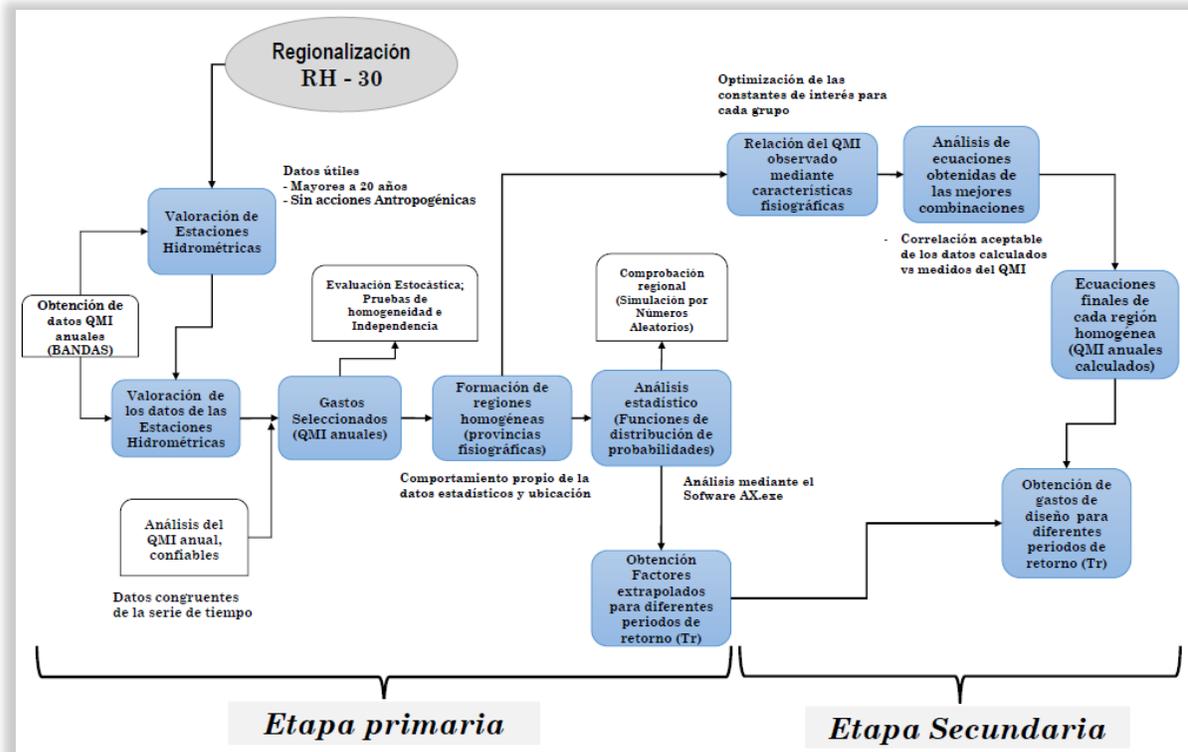


Figura 1. Diagrama de Procesos de regionalización de la RH-30.

1.4 Descripción de capítulos

En el capítulo 2, se muestra la revisión bibliográfica analizando ejemplos de estudio de regionalización para un fin específico, considerando que, la regionalización toma un papel importante en la optimización de los recursos hídricos, la evaluación de proyectos ya sea para la conservación y generación de infraestructura, así como, el comportamiento del medio ambiente en escenarios futuros.

En capítulo 3, se presentan definiciones importantes para el caso de estudio de la región hidrológica, dando así una síntesis de los conceptos utilizados desde regionalización de caudales y definiciones básicas de algunas funciones de probabilidad más utilizadas en hidráulica, hasta las características fisiográficas. Dicha información es la base para los estudios de regionalización de escurrimientos.

El Capítulo 4, se describe la zona de estudio y la particularidad que tiene la región hidrológica 30 (RH-30), con un contenido general del ciclo hidrológico, clima, orografía y provincias fisiográficas así como los cauces principales.

Posteriormente, el Capítulo 5, con el caso de estudio se divide en dos etapas como se ha mencionado, una etapa inicial o primaria que consiste en la formación de grupos con aspectos homogéneos, derivado de sus datos estadísticos y similitud espacial (área de la cuenca) de los valores del QMI de las estaciones hidrométricas observadas. Posteriormente se realiza análisis de funciones de distribución probabilística para cada

grupo o región homogénea, con el propósito de obtener factores que permitan determinar los gastos de diseño para distintos periodo de retorno.

La segunda etapa considera el análisis de los grupos de interés obteniendo ecuaciones con las características fisiográficas evaluadas (Guzmán, 2015) que se consideran dentro del análisis: área de la cuenca (A), pendiente del cauce principal (S), tiempo de concentración (Tc), infiltración potencial máxima (If), Número de curva (NC), longitud del cauce principal (L) y precipitación media máxima anual (P), esto definirá ecuaciones matemáticas para la estimación del QMI anual de diseño , por lo que se contempla la valoración del coeficiente de determinación (R^2) en conjunto con las combinaciones de una a tres variables fisiográficas (VF) del análisis.

El capítulo 6, consiste en mostrar dos casos de estudios con las ecuaciones finales correspondientes y observar el comportamiento de los QMI calculados contra observados. Se hace mención de recomendaciones sobre el presente análisis y los resultados obtenidos de los casos de estudio, finalizando en “conclusiones finales”, donde se realiza el análisis de la respuesta de cada región contra la mejor ecuación obtenida del estudio realizado por Guzmán (2015) “La regionalización de datos de escurrimientos de las regiones hidrológicas de México” en la región hidrológica de estudio (RH-30).

CAPITULO 2

Antecedentes, Regionalización de caudales

2.1 Panorama internacional.

Actualmente hay una diversidad bibliográfica respecto a la regionalización hídrica. La importancia de los métodos a evaluar dependerá de los datos de precipitación y escurrimiento así como la fisiografía del lugar de estudio.

En algunos casos las variables de entrada son diferentes, contemplando condiciones específicas del medio ambiente y fenómenos naturales del lugar. Hay una diversidad de estudios que se realizan para resolver casos particulares del recurso hídrico, ya sea directa o indirectamente; desde investigar el comportamiento del suelo en los diseño de avenida para distintos periodos de retorno hasta la utilización de herramientas especializadas como métodos de percepción remota para identificar el pronóstico del

clima y para observar los escurrimientos. A continuación se resumen 5 investigaciones diferentes sobre la regionalización.

- En Perú, el estudio realizado por Chaves J. (2009) “Aplicación de regionalización para la determinación de caudales en el puente Carrasquillo”, el diseño de regionalización se realizó para determinar los caudales de diseño en un río con el propósito de estimar la capacidad de erosión del suelo debajo de un puente vehicular, se analizó la información climatológica e hidrométrica de las estaciones de la zona de estudio; con ello, se determinó la precipitación total anual en cada estación pluviométrica dividiendo la zona de influencia que tiene la cuenca, al considerar la altura del terreno y la variación climática del fenómeno natural de “*El Niño*”.

Con la información que se recaudó, la cuenca se regionalizó en 3 zonas con la función de distribución de probabilidad Lognormal de tres parámetros, recurriendo a obtener el caudal medio con la relación entre la precipitación total anual y el área de la cuenca. Concluyendo que, al regionalizar dichas cuenca en zonas se determina el efecto que tiene el caudal calculado con los periodos de retorno (50 años), pronosticando así; la variación posible que puede efectuar el suelo debajo del puente.

Según el autor, el estudio es capaz de determinar el comportamiento de la avenida considerando la capacidad de erosión del suelo en la zona que se clasificó.

Solo se consideran periodos de retorno de 50 años como máximo y con valores de 20 años en promedio de cada estación climatológica. Chow (1994) recomienda para el diseño de puentes carreteros, periodos de retorno entre 10 a 50 años en sistemas secundarios y en primarios de 50 a 100 años.

- Videla (2013), realiza un análisis de una cuenca alta en Chile, “Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Maipo mediante la aplicación del software (*Cold Region hydrological model*)” valorando las condiciones físicas y fisiográficas del sitio como; temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, tipo suelo, precipitación entre otras, con la finalidad saber el equilibrio que existe entre el escurrimiento y la nieve.

La diversidad de la información en dicho análisis hace que se recurra a un software especializado para la obtención del escurrimiento y comportamiento de la nieve en zonas altas, cabe recalcar que para este tipo de estudios se involucra el agua en estado sólido y estado líquido por lo que lo hace aún más complejo el análisis para la obtención de los escurrimientos.

Las aproximaciones obtenidas reflejan que existe poca aproximación sobre los escurrimientos reales debido al número de variables que se ven involucradas, se concluye que de manera espacial solo se puede tener una aproximación del comportamiento de la nieve, regionalizando de esta manera las zonas montañosas.

- En Colombia, Pilar (2006), “Regionalización de caudales mínimos por métodos estadísticos de la cuenca Magdalena Cauca”, realizó el estudio de la cuenca más extensa del territorio colombiano analizando los escurrimientos mínimos en épocas de sequías, la ausencia y veracidad de datos en cuencas pequeñas hace de este estudio algo complejo para el análisis, por lo que se opta en regionalizar en base a, funciones de distribución de probabilidad con pruebas de bondad y ajuste para la serie de registros con caudales mínimo con y sin ceros, obteniendo resultados satisfactorios con relación al caudal mínimo y área, de esta manera se obtiene el caudal mínimo de diseño agrupando en 9 regiones homogéneas de registro de entre 20 y 33 años, las regiones establecidas tiene un comportamiento estable con la distribución de probabilidades.

El autor menciona que existen valores negativos dado que el comportamiento de varias corrientes de caudales pequeños tienden a desaparecer (valores de cero en los escurrimientos superficiales) en épocas de estiaje o sequía y esto imposibilita el pronóstico y comportamiento en diferentes periodos de retorno, en el estudio considera el fenómeno de “*El Niño*” por el impacto que este ocasiona en la región.

- En la evaluación de los recursos hídricos de España, Estrela (1999) analiza el modelo hidrológico distribuido, el cual basa las aportaciones de comportamientos espaciales de la retícula del territorio español. Los modelos base, anteriormente utilizados en España como el Stanford IV (Crawford y Linsley, 1966) o el modelo Sacramento (Burnash, 1973) fueron base para la estimación del recurso hídrico pero con dificultades de analizar cuencas de mayor tamaño, por lo que se decidió requerir de otro modelo que de manera espacial diera resultados más objetivos, el modelo llamado “*SIMPA*”, fue el resultado de estudios dando mejores respuestas respecto al comportamiento real de los escurrimientos, basado en 3 componentes básicos del cálculo de flujos y almacenamientos de aguas, evaluadas en celdas discretizadas en el territorio español de un kilómetro cuadrado.

Básicamente con variables de precipitación, humedad del suelo y evapotranspiración, dando así el cálculo del escurrimiento superficial y subterráneo, por lo que el modelo estima mes a mes durante todo el periodo de simulación en cada una de las celdas que se ha dividido el territorio, interpolando datos registrados en pluviómetros.

Consideran los datos faltantes en la precipitación se obtienen con valores cercanos a las demás estaciones aplicando regresión múltiple y la homogeneidad espacial en conjunto con algoritmos de interpolación espacial. Con ello la aproximación a la realidad son semejantes aunado que el análisis es de más de 5 mil estaciones climatológicas.

- En el Reino Unido, Sutcliffe (1975), sugiere un método de estudio: “*Flood Study Report*” (FSR) para el cálculo de diseño de avenidas en cuencas donde la captación no es regulada.
En 1975 se realizaron estudios para cuencas del reino unido, dicho estudio considera variables fisiográficas que permiten identificar el comportamiento del flujo de escurrimiento superficial máximo medio anual. El estudio comprende 533

cuencas de gran Bretaña e Irlanda con dimensiones de cuencas que van de 0.048km² a 9868km².

La fórmula que resume el análisis es la siguiente:

$$QBAR = CTE * A^{0.94} * STMFRQ^{0.27} * S1085^{0.16} * SOIL^{1.23} * RSMD^{1.03} * (1 + LAKE)^{-0.85} \quad (2.1)$$

Dónde:

- QBAR: gasto medio máximo anual.
- CTE: constante con valores en el intervalo de 0.0153 a 0.0315 según la zona de estudio.
- A: Área de la cuenca en kilómetros cuadrados (km²)
- STMFRQ: frecuencia de corrientes corresponde al número de corriente por km²
- S1085: pendiente del cauce entre 10% y 85% en m/km²
- SOIL: tipo de suelo; varía ente 0.15 a 0.50
- RSMD: Déficit de humedad del suelo que corresponde a la lluvia de un día en un periodo de retorno de 5 años menos efectivo en (mm).

Los estudios complementarios “Flood Studies Supplementary Reports (FSSR)” por Marshall & A C Bayliss (1994) considera zonas urbanas en cuencas pequeñas así como cuencas grandes dividiendo la ecuación E6V en dos ecuaciones.

Una de las variaciones que ha tenido la E6V es considerar la variable de precipitación, por lo que sufre una modificación de la variable RSMD considerando la precipitación media anual (SAAR) en un intervalo del área de la cuenca entre 120 a 3000 km²; por lo que se tiene lo siguiente:

$$QBAR = 0.00204 * A^{0.8} * STMFRQ^{0.27} * S1085^{0.16} * SOIL^{1.23} * SAAR * (1 + LAKE)^{-0.85} \quad (2.2)$$

Y considerando cuencas menores de 50km²:

$$QBAR = 0.01371 * A^{0.94} * STMFRQ^{0.31} * S1085^{0.15} * SOIL^{1.03} * SAAR^{0.60} \quad (2.3)$$

En algunos estudios complementarios FSSR de Naden & Polarski (1990) consideran el área urbanizada y otra variable para cuencas menores a 20km²:

$$QBAR = 0.000011 * NETLEN^{0.73} * SAAR^{1.76} * SOIL^{0.76} * (1 + URBAN)^{2.00} \quad (2.4)$$

Dónde:

- NETLEN: representa la corriente total de la cuenca, la longitud de la red
- SAAR: precipitación media anual, en mm
- URBAN: área urbanizada en km²

Cabe mencionar que, el FSR es el estudio del cual parte como referencia para el presente proyecto. En México, la obtención de modelos dependerá de la información disponible de los organismos operadores (CONAGUA, CLICOM, CONABIO etc.) y tecnologías (modelos

hidrológicos, percepción remota, regionalización fisiográfica etc.) que se cuenten para la estimación de los gastos de diseño en cuencas no aforadas, debido a ello las ecuaciones son exclusivas de cada región.

2.2 Panorama Nacional

Actualmente, el Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) de la región hidrológica de estudio (RH-30) cuenta con un total de 165 estaciones hidrométricas para la recopilación y análisis de escurrimiento superficial de los gastos máximos instantáneos anuales, sin embargo; para determinar factores de urbanización aún no se tiene registros. Cabe mencionar que la mancha urbana tiene un porcentaje muy pequeño con respecto a la región hidrológica de estudio por lo que no se considera dentro del análisis.

Como se ha mencionado, la región hidrológica de estudio cuenta con escasa información de datos de escurrimiento con respecto a la precipitación, la valoración de los datos dependerá mucho en función de estas componentes, por lo que es de importancia saber los escurrimientos para cualquier diseño futuro ya sea para prevención, generación del potencial hidroeléctrico, planeación de distritos de riego, delimitación de zonas, etc.

Actualmente la república mexicana cuenta con 37 regiones hidrológicas y cada región hidrológica tiene sus divisiones en cuencas hidrográficas.

La división se basa en que en cada cuenca hidrográfica dependerá únicamente de sus valores propios, sin embargo; la realidad refleja una disyuntiva, mucha información no está completa por diversas cuestiones para su valoración analítica. En un estudio reciente, Guzmán (2015) presenta una síntesis regional de las 37 regiones hidrológicas del país para el diseño de avenidas, proporcionando 3 modelos finales. Esto se logró considerando características geográficas y fisiográficas, obteniendo 18 grupos con la relación de la media de los gastos máximos instantáneos (QMI anuales) y las áreas drenadas de las cuencas.

Dicho análisis se complementa a partir de variables fisiográficas como; tiempo de concentración, volumen de lluvia y el espesor del suelo (Infiltración potencial máxima) que proporciona una aproximación de datos de escurrimiento superficial para diseño de avenidas en diferentes periodos de retorno, el autor define los siguientes modelos.

Modelo 1. Estimación de la media de los gastos máximos anuales, función de área de la cuenca.

Modelo 2. Estimación de la media de los gastos máximos anuales, función del área de la cuenca y tiempo de concentración.

Modelo 3. Estimación de la media de los gastos máximos anuales con la aplicación de algoritmos Genéticos relacionando volumen, tiempo de concentración y el espesor del suelo.

Los modelos anteriores garantizan una aproximación de los gasto de diseño, sin embargo, la representación solo garantizar el panorama a nivel región hidrológica, y no detalla el comportamiento delimitado en ciertas zonas dentro de la región por lo que el error de

aproximación en varios casos es grande, aunque permite tener una referencia aproximada a la realidad de los caudales de diseño.

Otro estudio de regionalización de caudales en cuencas no aforadas se encuentran las realizadas por Alcalá (2016), “Regionalizando la Región hidrológica 27 (Norte de Veracruz), 28 (Papaloapan) y 29 (Coatzacoalcos)”. El método empleado es el siguiente:

- Delimitación de regiones homogéneas desde un punto de vista Hidrometeorológico, realizado por dos enfoques; cualitativo (características geográficas) y cuantitativo (emplea pruebas estadísticas).

Los métodos considerados fueron; Método del parámetro β de la distribución General de Valores Extremos (GVE), Método de trazos Multidimensionales el cual permite definir la homogeneidad por la similitud hidrológica de la cuenca y sus características y puede no tener significancia geográfica utilizando variables predecibles, Prueba de Fisher esta prueba realiza la homogeneidad cuando se requiere probar si dos o más series climatológicas o hidrométricas pertenecen a una misma población, es decir forma parte de la región homogénea, prueba de homogeneidad regional y técnicas regionales.

- Valoración y agrupación de regiones homogéneas.
- Análisis de frecuencia para la estimación de eventos de diseño para diferentes periodos de retorno, se obtuvo al verificar la ecuación con el mejor ajuste de las funciones Gumbel, doble Gumbel y GVE de los grupos formados con el menor error estándar obteniendo los valores extrapolados para diferentes periodos de retorno.
- Obtención de ecuaciones por medio de características fisiográficas utilizando el método de optimización de Landson y Waren (1978) “Generalized Reduced Gradient (GRG)” utilizada en SOLVER®.

Dicho estudio tuvo buena aproximación de los valores calculados con los medidos dando coeficientes de determinación (R^2) en RH-27 en los grupos de 0.90 - 0.99; RH – 28 de 0.83 -0.85 y RH-29 de 0.92 -0.95, posteriormente se analiza la homogeneidad regional en la generación de números aleatorios comparando el CV sintéticos con CV medidos, también la función doble Gumbel tuvo el mejor comportamiento debido a que son zonas costeras. Sin embargo las ecuaciones no son aplicables para todas las cuencas debido a que no consideran varios cauces principales.

Los estudios realizados por Alcalá O. (2016), Guzmán (2015) junto con FSR son investigaciones en las que se basa el presente estudio.

CAPITULO 3

Marco teórico

3.1 Regionalización.

Como definición general, implica la división de un territorio en áreas menores con características comunes y representa una herramienta metodológica básica en la planeación, pues permite el conocimiento de los recursos de interés, cuyo objetivo principal es incluir toda la heterogeneidad que prevalece dentro de un determinado espacio geográfico.

Por otra parte, la regionalización abarca todo tipo estudios: hidrológicos, económicos, sociales y ambientales con el fin de realizar un mejor análisis también; es conocida como regiones delimitadas por semejanza de valores o atributos.

María E. Morales (2007) hace mención de 5 definiciones de regionalización según el ámbito de interés y alcances.

1. La región circunscrita como unidad geográfica o ecológica y por barreras naturales.
2. El sistema o los sistemas sociales que conforman la región y que implican las relaciones en los ámbitos social, político, cultural y económico.
3. La región definida por la membresía de la organización regional, lo cual implica la creación de un marco de cooperación.
4. La sociedad civil regional, la cual toma forma cuando el marco organizacional promueve la comunicación y la convergencia de valores dentro de la región.
5. La actuación de la región como sujeto con su propia identidad, capacidad, legitimidad y aparatos para hacer políticas propias. Esta fase implica un nivel de regional complejo y avanzado.

De manera objetiva la regionalización implica una serie de factores importantes que se deben de considerar para la optimización de los estudios y análisis de datos. En el presente estudio, la regionalización se hace mediante cuencas en conjunto con las provincias fisiográficas del instituto de geografía de la UNAM, con el fin de realizar una regionalización de caudales.

3.1.1 Regionalización de caudales

Para el desarrollo de obras de ingeniería es necesario evaluar el aspecto hidrológico en la zona de estudio para determinar los caudales de diseño, sin embargo, se presentan muchos casos en los cuales la información con la que se cuenta no es suficiente en calidad y/o en cantidad para la determinación de éstos.

Frente a este problema hay metodologías que permiten mediante el análisis de las diferentes variables hidrológicas de la región, llegar a tener un mayor entendimiento del comportamiento estocástico, comprendiendo las fluctuaciones del recurso hídrico.

La regionalización hidrológica permite explotar al máximo la información hidrológica existente.

Como se ha mencionado, el principio de regionalización se basa en la similitud espacial que permita la transferencia de información de un punto a otro de una región. Se debe destacar que ningún estudio de regionalización puede sustituir una adecuada red de monitoreo hidrológico.

El autor Tucci (2002), indica que la regionalización se realiza por medio de variables, funciones y parámetros.

- Variables, ejemplo; la precipitación media, caudales medios, caudal mínimo tiempo de concentración, puede ser determinada por medio de un grupo de relaciones establecida a través de datos puntuales.

- Funciones, cuando se puede estimar información hidrológica por medio de parámetros de función estadística, gastos máximos para diferentes periodos de retorno.
- Parámetros, los parámetros de una función o modelos matemáticos pueden ser relacionados con características físicas de la cuenca.

La regionalización de caudales se puede dar siempre que se tenga información de esta variable en otros puntos de la misma región. Considerando el presente estudio solo se toma en cuenta la región hidrológica 30 (Grijalva –Usumacinta) para llevar a cabo el análisis que complementa el estudio y la evaluación de la regionalización.

3.2 Métodos y Criterios de Regionalización

Dentro de los criterios y técnicas de regionalización se encuentran los de región homogénea, cuyo objetivo es agrupar aspectos con similitud y semejanza particular; el análisis se realiza a partir de enfoques geoestadísticos para determinar regiones homogéneas, cabe mencionar que existe una gama diversa de métodos y técnicas de regionalización. Escalante (2008), hace mención de técnicas que permiten la obtención de regiones homogéneas, entre ellos se encuentra el Método geográfico, Método de la región de influencia, Método del coeficiente de variación entre otros.

Otro método característico es la Prueba “F” de Fisher el cual, usa los coeficientes de variación de los QMI observados de cada estación hidrométrica considerada dentro de la región hidrológica, dicho análisis se ejemplifica en el trabajo de regionalización de caudales Alcalá, (2016), sin embargo, corresponde a comportamientos con función de distribución normal, por lo que al utilizarla en cuencas donde existen información de eventos extraordinarios no se ajusta de manera que el método debe ser sustituido por aquellas funciones que contengan dos poblaciones.

El análisis considera la valoración geoestadística a partir de la ubicación de cada estación seleccionada y su correspondiente geomorfología; entre las que destacan las provincias fisiográficas para la delimitación homogénea. Para comprobar la homogeneidad, se considera la “prueba de simulación muestral”, esta depende de los parámetros del mejor ajuste de las funciones de distribución de probabilidades más utilizadas, generando series sintéticas a partir de números aleatorios, con ello se verifica el estadístico del coeficiente de variación.

A continuación se hace mención general de algunos métodos característicos y conocidos, para obtener regiones homogéneas (Escalante C., 2008).

- Método geográfico

Técnica que supone que una región es homogénea, dada la proximidad de sus cuencas; la delimitación se puede realizar trazando un radio de 80km a partir del centro de Gravedad del sitio de proyecto y tomando toda la información de los sitios que quedan dentro de este radio.

- Método de la región de influencia

Dicha técnica se considera el centro de su propia región (Burn, 1998, 1990). La identificación de una región de influencia se apoya en la medición de la distancia euclidiana en un espacio de atributos multidimensionales. El conjunto de atributos (características fisiográficas y climatológicas) se relaciona con las características de los eventos extremos. También se define una función que refleja la importancia de cada sitio dentro de la región.

$$D_{jb} = \left[\sum_{i=1}^p (C_j^i - C_b^i)^2 \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

$$C_j^i = \frac{X_j^i}{S(X^i)} \quad (3.2)$$

$$C_b^i = \frac{X_b^i}{S(X^i)} \quad (3.3)$$

Donde

p	Número de atributos considerados
C_j^i y C_b^i	Valores estandarizados del atributo i para los sitios j y la estación base b
X_j^i	Valores del atributo i del sitio j
X_b^i	Valores del atributo i de la estación base b
$S(X^i)$	Desviación estándar del atributo i considerando todos los sitios j y la estación b .

El proceso de estandarización elimina las unidades de cada atributo y reduce cualquier diferencia de escala dentro del rango de valores.

El grupo de atributos seleccionados son función de la información disponible en la red de estaciones. La elección de los atributos puede al observar la correlación entre las características estadísticas de los eventos extremos y las características fisiográficas y/o climatológicas (Escalante C., 2008).

- Prueba de Fisher con el coeficiente de variación.

En hidrología, la prueba Fisher es la más adecuada para verificar la homogeneidad, también es conocida como la prueba de comparación de varianzas, esta prueba se emplea cuando se requiere probar si las varianzas de dos poblaciones normales son iguales, a partir de las variaciones estimadas de dos muestras independientes extraídas de dos poblaciones.

En las estadísticas es común llamar F a la prueba y se calcula como el cociente de las varianzas de cada muestra expresado de la siguiente forma

$$F = \frac{\text{Primera estimación de la varianza } \sigma^2}{\text{Segunda estimación de la varianza } \sigma^2} = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (3.4)$$

La distribución f depende de dos parámetros que son sus grados de libertad definidos por las siguientes expresiones

$$gl_1 = n_1 - 1 \quad (3.5)$$

$$gl_2 = n_2 - 1 \quad (3.6)$$

Donde

n_1 y n_2 Son el tamaño de la muestra 1 y 2 respectivamente.

Al comparar las varianzas de ambas muestras, se tiene que el estadístico F tiene una distribución F con gl_1 y gl_2 , entonces el recíproco de F , tiene una distribución $1/F$ con $gl_1 = n_2 - 1$ y $gl_2 = n_1 - 1$. Como ambos estadísticos tienen distribuciones F , es común colocar la varianza mayor en el numerador del cociente.

Cuando el cociente se acerca al valor de 1, entonces se puede decir que las muestras provienen de la misma población, por el contrario; si el cociente de las varianzas es considerablemente mayor que 1, se considera que las muestras no pertenecen a la misma población.

Para aceptar o rechazar la hipótesis nula es necesario comparar el estadístico F con el valor F crítico (F_c) para un nivel de significancia dado (α), generalmente de 1 a 5 %, esto se obtiene mediante tablas.

Para determinar una región homogénea se debe de realizar una estimación de los estadísticos entre ellos el coeficiente de variación del conjunto de datos obtenidos de cada estación (gastos máximos instantáneos anuales), el cual se ordenan de mayor a menor considerando que los resultados no excedan los límites que estable al distribución Fisher para los niveles de confianza van del 95-99%.

$$factor\ grupo\ homog\ ene\ o = \left(\frac{CV_i^2}{CV_f^2} \right) \quad (3.7)$$

Donde

CV_i^2 Coeficiente de variación mayor del conjunto

CV_f^2 Coeficiente de Variación menor del conjunto

- Prueba de simulación muestral o número aleatorios.

Para observa si la región es homogénea, se debe considerar el comportamiento de las funciones de distribución y determinar si la formación de grupos considerados son aptos para el estudio, esto es posible con la generación de series con números aleatorios, donde Domínguez R., Alcalá O., (2016) y Galván (2011), consideran el siguiente procedimiento, debido a que la prueba Fisher resulta conservadora por su distribución normal.

- Se obtienen los parámetros de la función de distribución $F(x)$ con el mejor ajuste.
- Se generan números aleatorios y_i con densidad de uniforme, dada por la siguiente expresión.

$$f(y) = 1; 0 \leq y \leq 1 \quad (3.7.1)$$

- Se considera que el valor y_i , representa un valor de la función de distribución $F(X)$, y se despeja el valor correspondiente de x .
- Para cada simulación se determina el Coeficiente de Variación de las muestras generadas.
- Por último, se grafican y comparan los CV de sintéticos generados contra los medidos, ordenados de mayor a menor.

En análisis de homogeneidad cumple si los valores del CV observados entran dentro del rango del límite superior e inferior correspondiente de los CV sintéticos (figura 2).

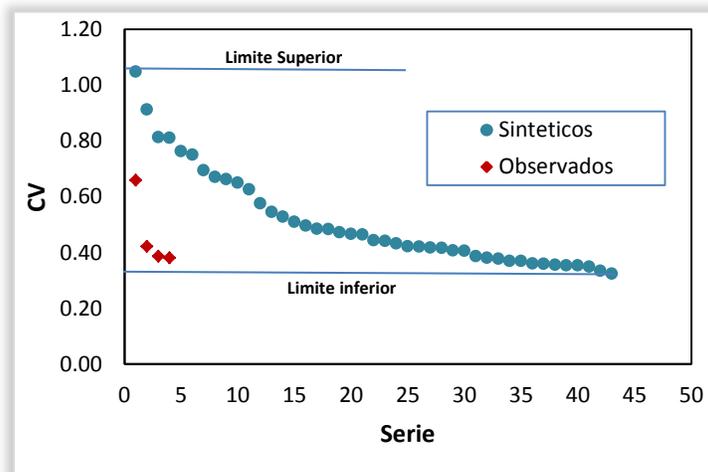


Figura 2. Los CV de las series sintéticas y Observadas

La serie se puede graficar con la frecuencia dividiendo la posición inicial entre el número de datos, tanto los datos observados y calculados, ordenada de mayor a menor como se muestra en la figura 3.

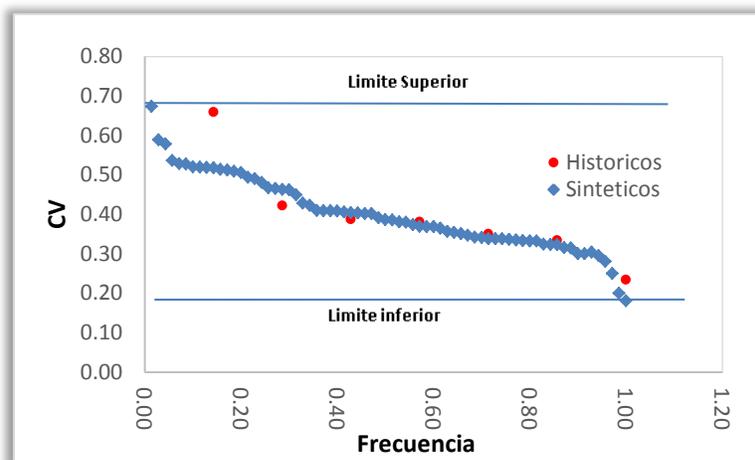


Figura 3. Los CV serie sintéticas y observadas en base a la Frecuencia.

3.2.1 Pruebas de homogeneidad e independencia

Las características estadísticas de las series hidrológicas, como la media, desviación estándar y los coeficientes de correlación serial, se afectan cuando la serie presenta tendencias de la media o en la varianza o cuando ocurren saltos negativos o positivos; tales anomalías son producidas por la pérdida de homogeneidad, Escalante y Reyes (2002). Las pruebas estadísticas que miden la homogeneidad de una serie de datos, presentan una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla.

3.2.2 Prueba estadística de Helmer

Esta prueba consiste en analizar el signo de las desviaciones estándar de cada evento de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida con la otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S, de lo contrario se considera un cambio C.

La serie se considera homogénea si se cumple lo siguiente

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (3.7.2)$$

Donde n_j es el número de datos.

3.2.3 Prueba estadística de t de Student

Cuando la causa probable de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico t es muy útil.

Si se considera Q_i^j para $i = 1, 2, \dots, n_j$, del sitio, la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$, entonces el estadístico de la prueba se define con la expresión (Escalante y Reyes, 2002).

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 * s_1^2 + n_2 * s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} * \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.7.3)$$

Donde

\bar{x}_1, s_1^2 ; son la media y la varianza del primer registro de tamaño n_1
 \bar{x}_2, s_2^2 ; son la media y la varianza del segundo registro de tamaño n_2

Si y solo si, el valor absoluto de t_d es mayor que aquel de la distribución de t de student, se concluye que las diferencias entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie Q_i^j se considera no homogénea.

3.2.4 Prueba estadística de Cramer

Dicha prueba se utiliza con el propósito de verificar homogeneidad en el registro de Q_i^j de la serie j para $i=1,2,3\dots n_j$ y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro, por lo que su análisis considera tres bloques, el primero de tamaño total de la muestra, el segundo del 60% de los últimos valores de la muestra y un último del 30% de los valores de la muestra n_j .

La prueba compara el valor de $\overline{Q^j}$ del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos $\overline{Q_{60}^j}$ y $\overline{Q_{30}^j}$. Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media, se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre las medias de los bloques, (Escalante y Reyes, 2002).

$$\overline{Q^j} = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}, \text{ para una sola muestra analizada } j = 1 \quad (3.7.4)$$

$$S_Q^j = \left[\frac{1}{(n_j - 1)} * \sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \overline{Q^j})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.7.5)$$

$$\overline{Q_{60}^j} = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{Q_k^j}{n_{60}} \quad (3.7.6)$$

$$\overline{Q_{30}^j} = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{Q_k^j}{n_{30}} \quad (3.7.7)$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\overline{Q_{60}^j} - \overline{Q^j}}{S_Q^j} \quad (3.7.8)$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\overline{Q_{30}^j} - \overline{Q^j}}{S_Q^j} \quad (3.7.9)$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w [1 + (\tau_w^j)^2]} \right\}^{\frac{1}{2}} |\tau_w^j| \text{ para } w = 60 \text{ y } 30 \quad (3.7.10)$$

El estadístico T_w tiene distribución t de Student de dos colas con $v = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y par aun nivel $\alpha = 0.05$. si y solo si, el valor absoluto de t_w para $w= 60$ y 30 , es mayor que la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencias y por lo tanto Q_i^j se considera no homogénea.

3.2.5 Prueba de independencia de Anderson

Para llevar a cabo el análisis de frecuencias se requiere que la muestra Q_i^j de la serie j para $i = 1, 2, 3 \dots n_j$ este compuesta por variables aleatorias.

Para comprobar que los datos de una muestra son variables aleatorias se utiliza la prueba de independencia de Anderson. Esta prueba hace uso del coeficiente de correlación serial r_k para distintos tiempos de retraso " k ".

El coeficiente de correlación de retraso k es.

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(Q_{i+k} - \bar{Q})}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (3.7.11)$$

Donde

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n} \quad (3.7.12)$$

para $k = 1, 2, \dots, n/3$

Los límites de confianza del 95% de r_k^j se obtiene como.

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{(n-k-1)}}{n-k} \quad (3.7.13)$$

Se grafican los valores estimados para r_k contra los tiempos de retraso k junto con sus correspondientes límites de confianza, a esta gráfica se le denomina Correlograma de la muestra. Si menos del 10% de los valores r_k sobrepasan los límites de confianza se dice que la muestra es independiente, por lo tanto, los datos son producto de un proceso estocástico.

3.3 Función de distribución de probabilidades

En la estadística existen decenas de funciones de distribución de probabilidad teóricas, se debe buscar entre las distintas funciones de distribución a la que se ajuste mejor a los datos medidos y usar esta función para la extrapolación. Se sabe que existe una diversidad de funciones al respecto, sin embargo existen una serie de funciones más usadas en hidrología. (Aparicio, 1997)

- a) Normal
- b) Lognormal
- c) Pearson III o Gamma de 3 parámetros

- d) Gumbel
- e) Doble Gumbel

3.3.1 Distribución Gumbel

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

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (3.3.1)$$

La función de densidad de probabilidad es entonces:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (3.3.2)$$

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

$$\alpha = \frac{1.2825}{S} \quad (3.3.3)$$

$$\beta = \bar{x} - 0.45 S \quad (3.3.4)$$

3.3.2 Doble Gumbel o Gumbel Mixta

Esta función en hidráulica se ajusta a dos poblaciones la primera con precipitaciones relacionadas a fenómenos meteorológicos normales y la segunda a fenómenos ciclónicos, normalmente mayores que los primeros (Aparicio, 1997).

Para realizar en análisis de frecuencias, la función de distribución acumulada está definida como (Hann, 1977)

$$F(x) = P \exp\left\{-\exp\left(-\frac{(x-\beta_1)}{\alpha_1}\right)\right\} + (1-P) \exp\left\{-\exp\left(-\frac{(x-\beta_2)}{\alpha_2}\right)\right\} \quad (3.3.5)$$

Dónde

P Es la probabilidad de tener eventos no ciclónicos, adimensional.

x Es la variable aleatoria para la cual se estima la probabilidad de no excedencia

α_1 Es el parámetro de escala de la población no ciclónica

β_1 Es el parámetro de ubicación de la población no ciclónica

α_2 Es el parámetro de escala de la población ciclónica

β_2 Es el parámetro de ubicación de la población ciclónica

La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{P}{\alpha_1} \exp\left\{-\frac{(x - \beta_1)}{\alpha_1} - \exp\left(-\frac{(x - \beta_1)}{\alpha_1}\right)\right\} + \frac{1 - P}{\alpha_2} \exp\left\{-\frac{(x - \beta_2)}{\alpha_2} - \exp\left(-\frac{(x - \beta_2)}{\alpha_2}\right)\right\} \quad (3.3.6)$$

3.4 Características fisiográficas

La selección de las características depende de aquellas que pueden ser potencialmente útiles para predecir el escurrimiento, en este caso el máximo escurrimiento medio diario anual (Domínguez, 1981), por lo que, las características fisiográficas evaluadas (Guzmán, Domínguez 2016) que se consideran dentro del análisis son; área de la cuenca (A), pendiente media del cauce principal (S), tiempo de concentración (Tc), Infiltración potencial máxima (If), Número de curva (NC), longitud del cauce principal (L) y precipitación media máxima anual (P), de cada variable o característica fisiográfica (VF) se describe la obtención de forma general.

- Área de la cuenca(A); o área drenada por la cuenca el cual esta expresada en km^2 , estos datos se consideran lo obtenidos en el registro del BANDAS.
- Pendiente del cauce principal (S); este se mide en porcentaje se obtuvo con los datos de registro de valores del estudio de Domínguez y Guzmán (2016).
- Longitud del cauce principal (L); dicho valor expresado en Km se obtuvo a partir de un modelo digital de elevaciones con procesamiento geoespacial.
- Tiempo de Concentración (Tc); Se estimó por la ecuación de Kirpich, la cual utiliza el cauce principal y su pendiente utilizando la siguiente expresión

$$T_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (3.3.7)$$

Escalante (2008) nos define el tiempo de concentración como la diferencia temporal entre el inicio de la lluvia hasta el momento en que se establece el gasto de equilibrio.

- Infiltración potencial máxima (If), se obtiene a partir de la ecuación que la relaciona con el número de curva (NC) dicho de otra manera

$$I_f = \frac{2540 - (25.4 * NC)}{NC} \quad (3.3.8)$$

Donde

I_f Infiltración potencial máxima [cm]

NC Número de Curva

- Número de Curva (NC), también conocido como número de escurrimiento, se calcula en relación con la precipitación total (P_t) y precipitación efectiva (P_e) ambos parámetros en centímetros, el cual se calcula en la siguiente ecuación.

$$NC = \frac{2540}{25.4 + 5 P_t + 10 P_e - 5 \sqrt{P_e (4 P_e + 5 P)}} \quad (3.3.9)$$

La esta ecuación es aplicable cuando se tienen las variables (P_t) y (P_e), de otro modo el NC se calcula a partir de tablas propuestas por la USSCS (United States Soil Conservation Service) debido a que muchas de las cuencas no están aforadas cuyo valor depende del tipo del suelo, cobertura vegetal, pendiente del terreno entre otros factores.

- Precipitación media máxima anual (P), la precipitación se obtuvo a partir del análisis de la identificación espacial de las estaciones climatológicas dentro y cerca de la cuenca de estudio, por lo que se obtuvo de las estaciones climatológicas la media de las precipitaciones diarias máximas anuales, obteniendo un mapa de isoyetas. dicho mapa sirve para obtener la precipitación por el método de las Isoyetas.

Dentro de un primer análisis se realiza la calibración, considerando cada variable fisiográfica (VF) con una ecuación potencial que relacione el QMI anual de cada grupo y de la región hidrológica (Global), esto es para identificar el comportamiento del coeficiente de determinación (R^2), y observar las variables que se relacionan mejor ($R^2 \approx 1$).

3.5 Programa AX.

El programa AX.exe tiene como objetivo ajustar distintas funciones de probabilidad a muestra de datos y calcular el error estándar de cada una de ellas obteniendo valores extrapolados para diferentes periodos de retorno. El programa considera las funciones:

- Normal
- Lognormal
- Gumbel
- Exponencial
- Gamma
- Doble Gumbel

Los métodos para calcular los parámetros de funciones de probabilidad son: por momentos y por máxima verosimilitud; además, las funciones Lognormal y Gamma para dos y tres parámetros.

El archivo dentro de la interfaz, contempla las opciones de ajuste Global y ajuste de una función, el ajuste Global permite realizar un análisis de todas las funciones de probabilidad que el programa contempla, presentado en una tabla el resumen de los errores estándar, el cual se tiene sobre las funciones el mejor ajuste de la muestra de datos.

En el caso de la función doble Gumbel, en el menú de la tabla del ajuste global se presenta una primera aproximación de esta función, el procedimiento se basa en escoger un valor de $P = 0.8$ lo que indica que, las poblaciones con valores mayores corresponden al 20% del número total de ellos y a cada población se ajusta una función sencilla Gumbel por momentos.

El ajuste de una función de probabilidad se lleva a cabo de manera visual a partir de la tabla del ajuste Global que ocupa las funciones anteriormente mencionadas. El ajuste en la distribución doble Gumbel, el valor de P puede variar de manera manual y automática obteniendo un menor error estándar (Jiménez, 1996).

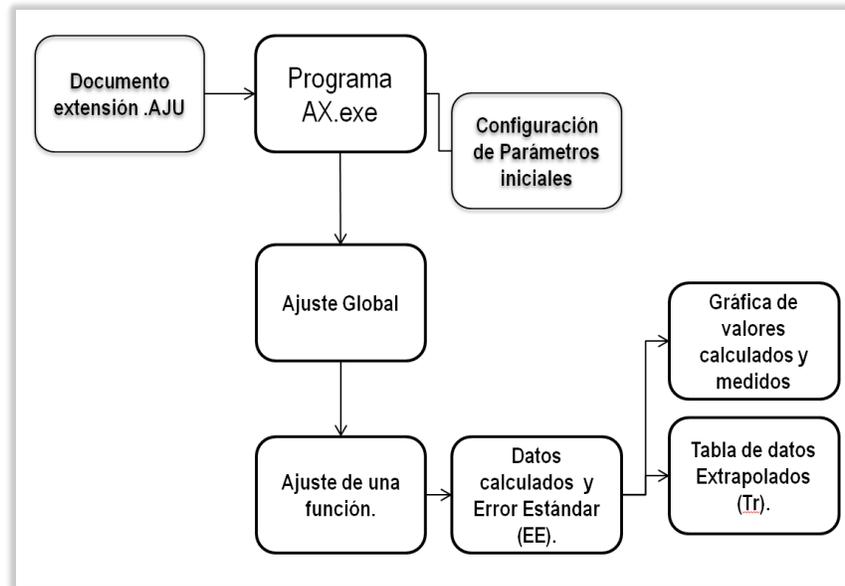


Figura 4. Diagrama de procesos dentro del programa AX.exe

La figura 4, muestra el proceso de la interfaz y su funcionamiento, el cual finaliza con la obtención de los factores extrapolados para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 10000).

CAPÍTULO 4

La Región hidrológica

4.1 Región hidrológica Grijalva –Usumacinta (RH-30)

De acuerdo a CONAGUA, INECC e INEGI, se han identificado 1,471 cuencas hidrográficas en el país, las cuales se han agrupado y/o subdividido en cuencas hidrológicas para fines de publicación de la disponibilidad de las aguas superficiales. Al 31 de diciembre de 2009 se tenían publicadas las disponibilidades de 722 cuencas hidrológicas, en tanto en el 2010 se habían añadido otras nueve cuencas. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas, que a su vez se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA) (ver figura 5).

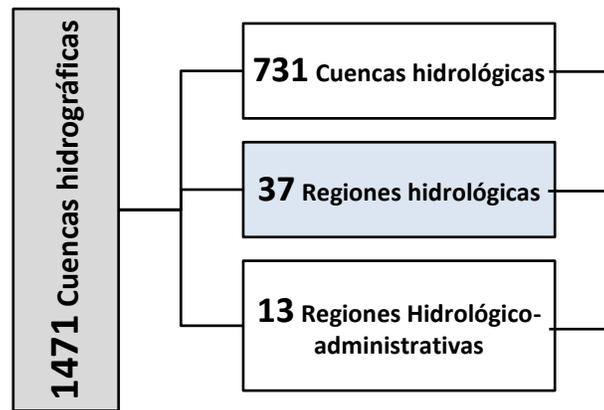


Figura 5. Clasificación del Recurso Hídrico

La región hidrológica (RH) No. 30 Grijalva-Usumacinta (Figura 6), pertenece a la vertiente del Golfo de México, dicha región alberga dos cuencas binacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y la República de Guatemala, las denominadas del Río Grijalva y Río Usumacinta, dicha región tiene una extensión de 102 465 km². Ubicada entre los estados de Chiapas, Tabasco, Campeche, Oaxaca y Campeche al sur-este de la república mexicana.

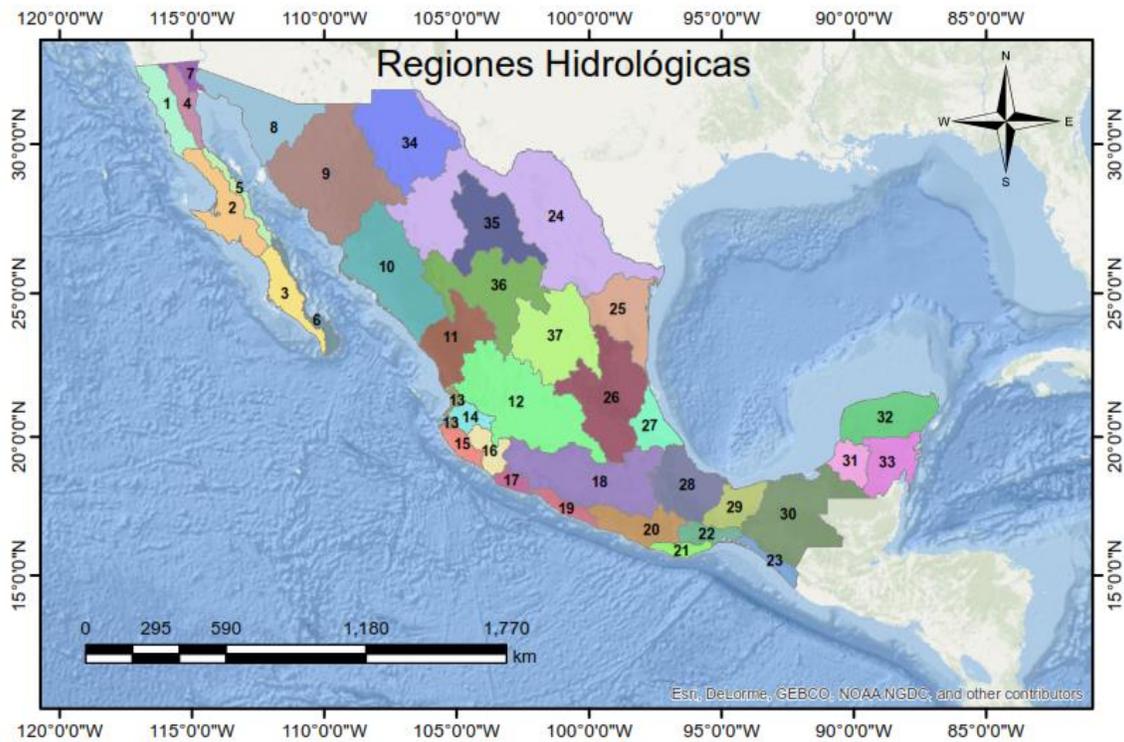


Figura 6. Regiones hidrológicas de la República Mexicana

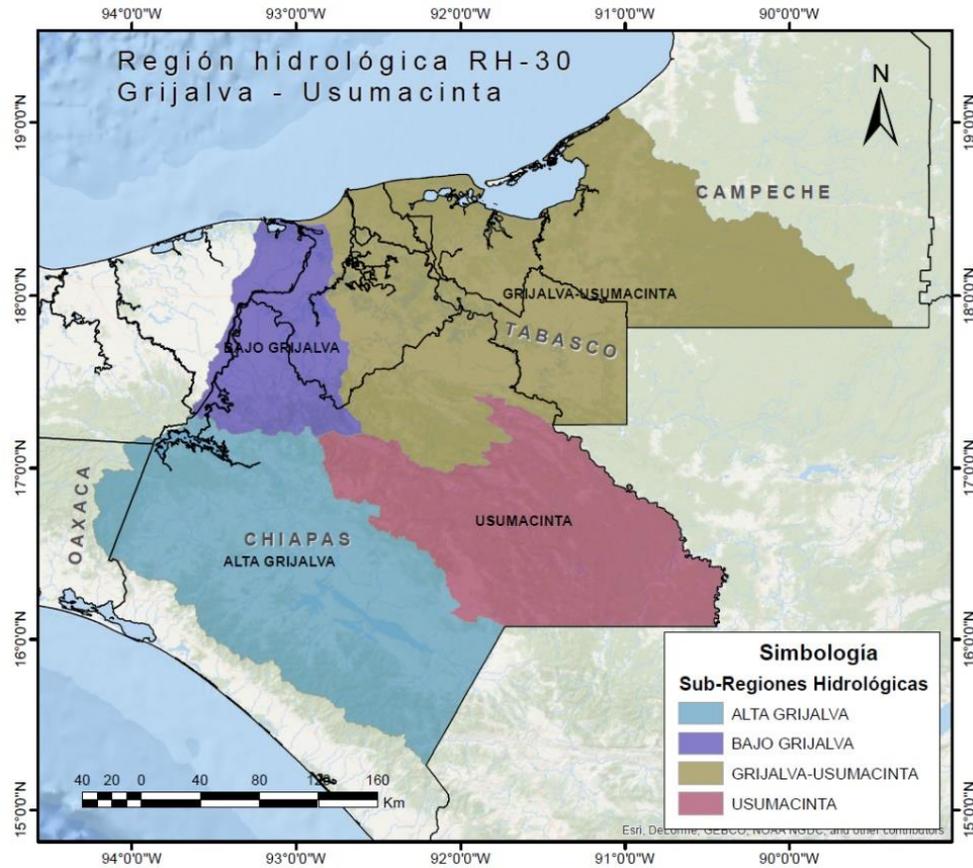


Figura 7. Sub-Regiones hidrológicas Grijalva –Usumacinta (RH 30).

Tabla 1.Regiones hidrológicas frontera Sur.

Regiones hidrológicas de México	
Región Hidrológico-Administrativa	Región hidrológica
XI. Frontera Sur	23. costa de Chiapas
	30. Grijalva-Usumacinta

La región hidrológica 30 está dentro de la demarcación de la región hidrológica administrativa, frontera sur (tabla 1) y subdividida en 83 cuencas hidrológicas, las cuales para su manejo se dividieron en 4 subregiones hidrológicas (figura 7) definidas por el por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), las cuales son:

- Alto Grijalva
- Grijalva - Usumacinta
- Bajo Grijalva
- Usumacinta.

Dicha subdivisión, marca cuatro zonas de interés, sin embargo 3 de las subregiones también integran cuencas binacionales.

4.1.1 Cauces principales y ciclo hidrológico.

De acuerdo a CONAGUA (2014), la cuenca de los ríos Grijalva Usumacinta, se ubica al sureste de México, y posee una diversidad de relieves, climas y ecosistemas, su historia geológica y su geoforma, le permiten contar con una alta diversidad de ecosistemas con la disponibilidad de agua ya que es la más abundante del país; el volumen anual de escurrimiento es del orden de 102,800 Mm³, que representa más del 30% de los escurrimientos totales del país. Dentro del ciclo hidrológico (CONAGUA, 2014), El río Usumacinta, con una longitud 1,200 km aproximadamente, es el río más caudaloso de Guatemala y México, es uno de los principales escurrimientos de la Cuenca Grijalva–Usumacinta (figura 8).

En su recorrido recibe aportaciones de los siguientes ríos: Cala, Serchil, Copón, Salama, Icbolay, Tzeja, San Román, La Pasión, San Pedro y Lacantún. Atraviesa el noroeste de Guatemala, sirve de frontera entre este país y México a lo largo de 200 km, se adentra en territorio mexicano por el estado de Tabasco, en cuyo territorio forma en conjunción con el río Grijalva, un extenso delta pantanoso llamado pantanos de Centla, en el que alcanza un caudal de 5400 m³/s.

El río Grijalva, también conocido localmente como río Grande de Chiapas o río Mezcalapa, es el segundo más caudaloso del país y el mayor productor de energía hidroeléctrica. En su cauce medio, en el estado de Chiapas, se han construido las plantas hidroeléctricas más importantes del país que son: la presa Angostura o Belisario Domínguez (construida en 1976), la presa Chicoasén (construida en 1980), la cortina tiene una altura de 261 m; la presa Malpaso o Netzahualcóyotl (construida en 1966); y la presa Peñitas (inaugurada en 1987) que es la presa más pequeña del sistema Grijalva-Mezcalapa.

Diez kilómetros aguas abajo del sitio donde estuvo la estación hidrométrica El Dorado, el río sufre una bifurcación, debido al nuevo cauce que se abrió hacia la margen izquierda en 1932, el brazo recibió el nombre de río Samaría y cuyo rumbo es hacia el Norte, hasta desembocar en el golfo de México. Ambos ríos tanto el Grijalva como el Usumacinta descargan el Golfo de México.

4.1.2 Clima

De acuerdo a CONAGUA (2014) Dentro de sus principales climas de la región hidrológica 30 se encuentran compuesto por tres grupos: los cálido-húmedos con aproximadamente un 93.5% del territorio, los templado-húmedos con 6.3% y una pequeña porción de clima seco. Los climas templados se deben a la presencia de elevaciones montañosas (sierras altas y mesetas ver en la figura 8), la región fisiográfica de la Sierra Madre conocido también sierra del sur de Chiapas y el macizo montañoso de los Altos (Sierra del norte y Altos de Chiapas) son los únicos con estas características (Figura 9), en tanto que lo que predomina en el resto del estado de Chiapas son los climas cálidos.

En la Depresión Central de Chiapas es notoria la escasez de lluvias durante el periodo sequía, situación que cambia significativamente en la siguiente temporada ya que se presentan lluvias moderadas (800 a 1200 mm). Una situación similar se presenta en la costa, aunque la presencia de lluvias es más abundante en el periodo correspondiente.

4.2 Fisiográficas, Provincias y Sub-Provincias fisiográficas

El INEGI y Cervantes-Zamora et al. (1990) del instituto de geografía de la UNAM, han definido límites en el territorio nacional agrupando regiones que tengan un mismo origen geológico, con paisajes y tipos de rocas semejantes en la mayor parte de su extensión con geoformas similares, climas y altimetrías (Figura 9), las cuales se han denominado provincias fisiográficas.

Como antecedentes, con la intención de establecer un marco de referencia en los años 70's y 80's se estableció una representación cartográfica de los recursos naturales del país elaborando un sistema fisiográfico, posteriormente se fue detallando debido a que la superficie cuenta con una gran variedad de formas del relieve, que integran paisajes de diversos tipos. Por lo que existe una clasificación fisiográfica (INEGI, 2017) las cuales son:

- Provincia fisiográfica, derivado del conjunto estructural del origen geológico unitario con morfología propia y distintiva.
- Sub-provincias fisiográficas, son subregiones de una provincia fisiográfica con características distintivas.
- Sistemas de topoformas, Es el conjunto de formas del terreno asociados según algún patrón o patrones estructurales.

Las 3 clasificaciones parten de un mismo objetivo fisiográfico, sin embargo las provincias y sub-provincias fisiográficas contemplan más criterios característicos del lugar, por lo que es de mayor utilidad para el presente estudio.

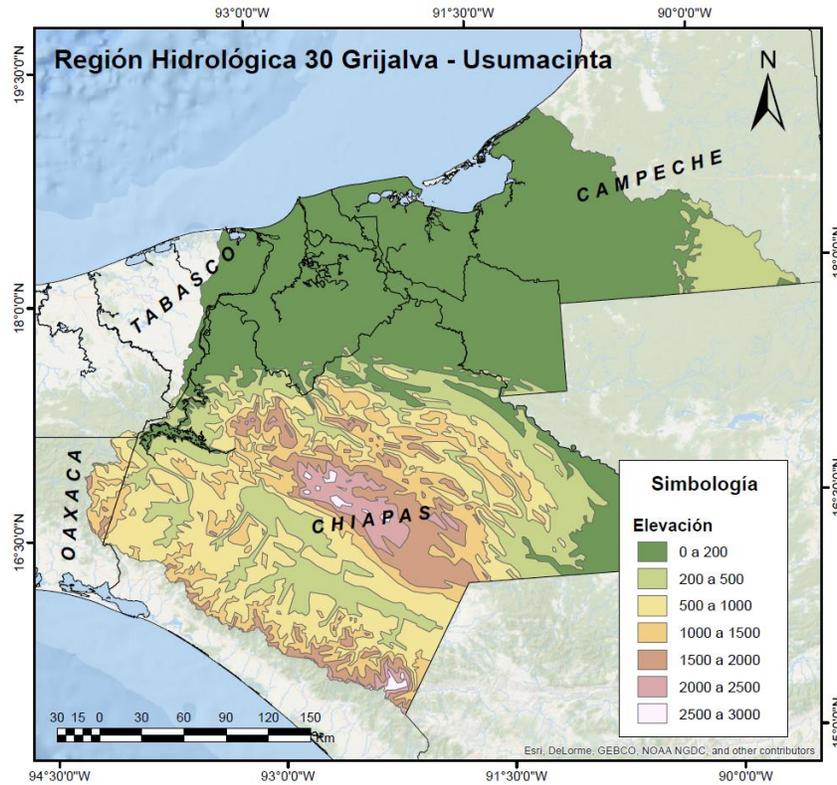


Figura 9. Altimetría de la región RH-30

El territorio mexicano está dividido en 15 provincias Fisiográficas que describen e integran el relieve del país con sus características más sobresalientes. Entre la variación y diversificación se han subdividido en 73 sub-provincias fisiográficas. La región hidrológica del Grijalva – Usumacinta se clasifica en 4 provincias fisiográficas.

- Península de Yucatán
- Llanura costera del Golfo Sur
- Sierra de Chiapas y Guatemala
- Cordillera Centroamericana

Dichas clasificaciones están subdivididas en las siguientes Sub-Provincias Fisiográficas (Figura 10). del cual es la que se utiliza para el presente análisis debido a su división más detallada.

- Altos de Chiapas
- Depresión central de Chiapas
- Karst y Lomeríos de Campeche
- Llanuras y Pantanos Tabasqueños
- Sierra Lacandona
- Sierras bajas del Petén
- Sierras del Norte de Chiapas
- Sierras del Sur de Chiapas
- Volcanes de la Costa golfo Norte

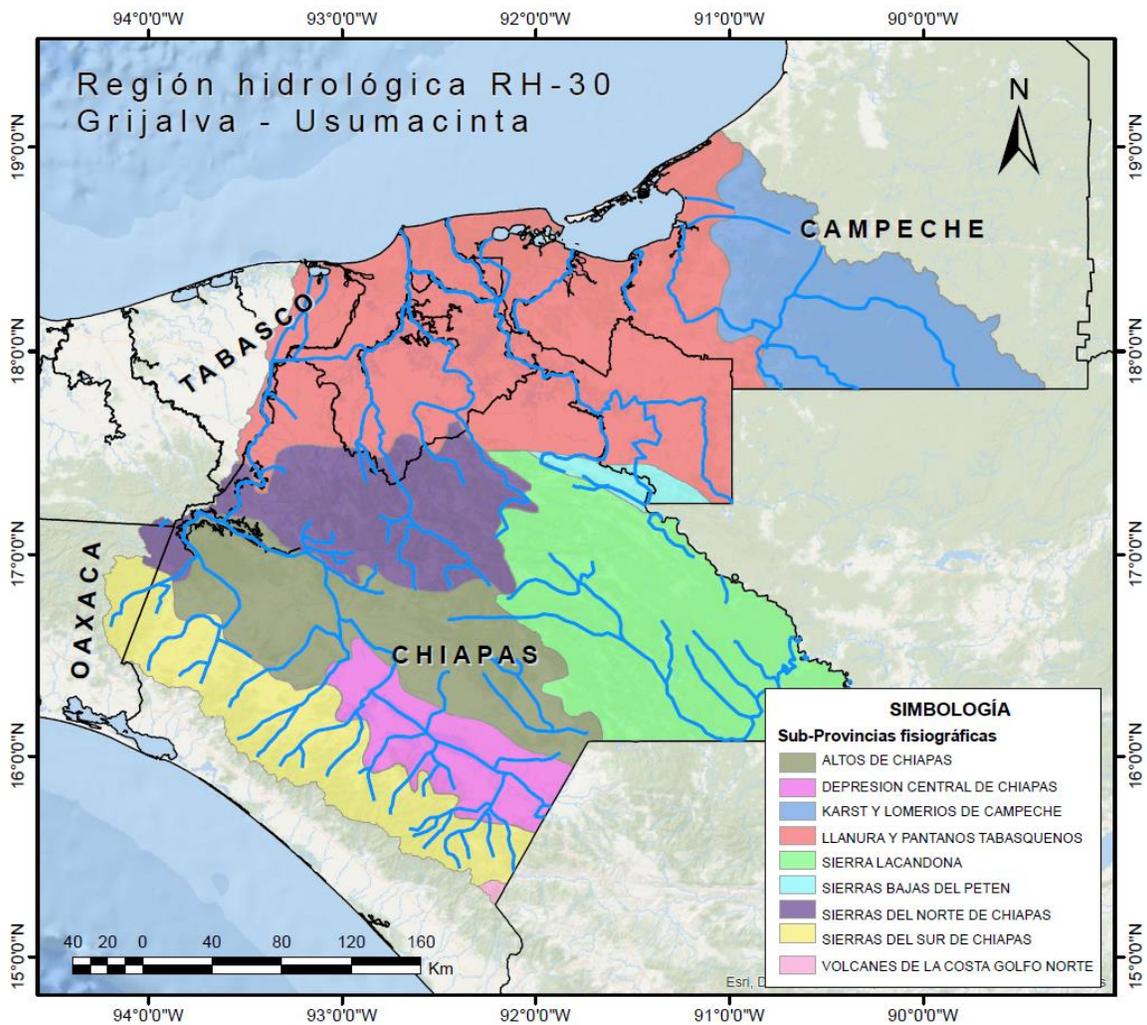


Figura 10. Sub- Provincias Fisiográficas de la RH-30.

La clasificación considera las siguientes características.

- Altos de Chiapas, también conocida como altiplanicie central en ella se encuentra las ciudades de San Cristóbal de las Casas y Tuxtla Gutiérrez, por su relieve accidentado y su considerable altura en esta región el clima es variado, esta provincia pertenece íntegramente a la vertiente del golfo y en ella se encuentra el parteaguas entre las cuencas de los ríos Grijalva y Usumacinta. Esta región recibe anualmente entre 1500 y 2000mm de lluvia, en lo que se refiere a la temperatura, la media es de 16° C.
- Depresión Central de Chiapas, también conocido como valle central de Chiapas, alberga los municipios de Chiapa de corzo, Comitán Domínguez, frontera entre otros, En el sureste la altitud es hasta 700 m.s.n.m. y hacia el noroeste descende hasta los 500 m.s.n.m., formando valles amplios tales como el del Alto Grijalva, en rocas calcáreas y arcillosas. En esta región es donde se registran las menores precipitaciones pluviales del estado, en algunas regiones de hasta menos 1000

mm anuales y, como la evaporación siempre supera a la precipitación, es en ella en donde han detectado las temperaturas más altas de Chiapas.

- Karst y Lomeríos de Campeche, así como; Llanuras y Pantanos Tabasqueños, pertenecen a las llanuras costeras del golfo sur o Planicies costeras del golfo, estos se forman en el estado de Chiapas y continúa por Tabasco y Campeche. Estas planicies tiene una pendiente muy baja hacia el norte y se desprende desde los 50 m.s.n.m., en el límite colindando con las Montañas del Norte, hasta los 15 m.s.n.m. en terrenos chiapanecos limítrofes con Tabasco.
- Sierra Lacandona y sierras bajas del Petén, localizada en las montañas del oriente de Chiapas, entre los municipios de Las Margaritas, Altamirano, Ocosingo y Palenque, y los municipios recientemente formados de Maravillas, Tenejapa, Marqués de Comillas y Zamora Pico de Oro. La región cuenta con un complejo sistema hidrológico que abarca el 53% de la cuenca del río Usumacinta, su topografía es montañosa y consiste en una serie de serranías con rumbo noroeste a sureste, separadas por valles intercalados.
- Sierra norte de Chiapas, también se le conoce como Montañas del Norte, esta provincia es una franja con orientación este-oeste que colinda al norte con la Planicie Costera del Golfo, al sur con los altos de Chiapas y al oriente con la sierra Lacandona. La altitud de las montañas del Norte llega a ser en su límite sur de 1500 m.s.n.m. y de 50 m.s.n.m. en su límite norte. Otro rasgo característico de esta región es de recibir altas precipitaciones pluviales, superiores a los 4000 mm anuales junto con altas temperaturas tropicales.
- Sierras del Sur de Chiapas y volcanes de la costa golfo Norte, también conocida sierra madre de Chiapas y por Guatemala Sierra Madre, En México, la sierra se inicia en el río Ostuta, y sigue hasta la frontera con Guatemala. En esta región se encuentran las más altas elevaciones que corresponden al Volcán Tacaná (4.092 msnm), el cerro Mozotal (3.050 msnm), el cerro Tres Picos (2.550 msnm) y se caracteriza por ser una zona donde nacen los ríos Santo Domingo, Suchiapa entre otros y aportan al Río Grijalva.

CAPÍTULO 5

Evaluación, Etapa primaria (regiones homogéneas) y Secundaria (ecuaciones regionales).

5.1 Depuración de datos de escurrimiento y obtención de las regiones homogéneas, Etapa primaria.

Como se ha mencionado, el análisis de datos para la evaluación no considera estaciones donde se involucre actividades humanas que permitan alterar los datos de escurrimiento superficial, tal es el caso de los embalses artificiales. El propósito es obtener una relación de la actividad natural y no antropogénica sobre los modelos.

Para el diseño de avenidas se toman los gastos máximos instantáneos (QMI) presentados en cada año de la estación hidrométrica.

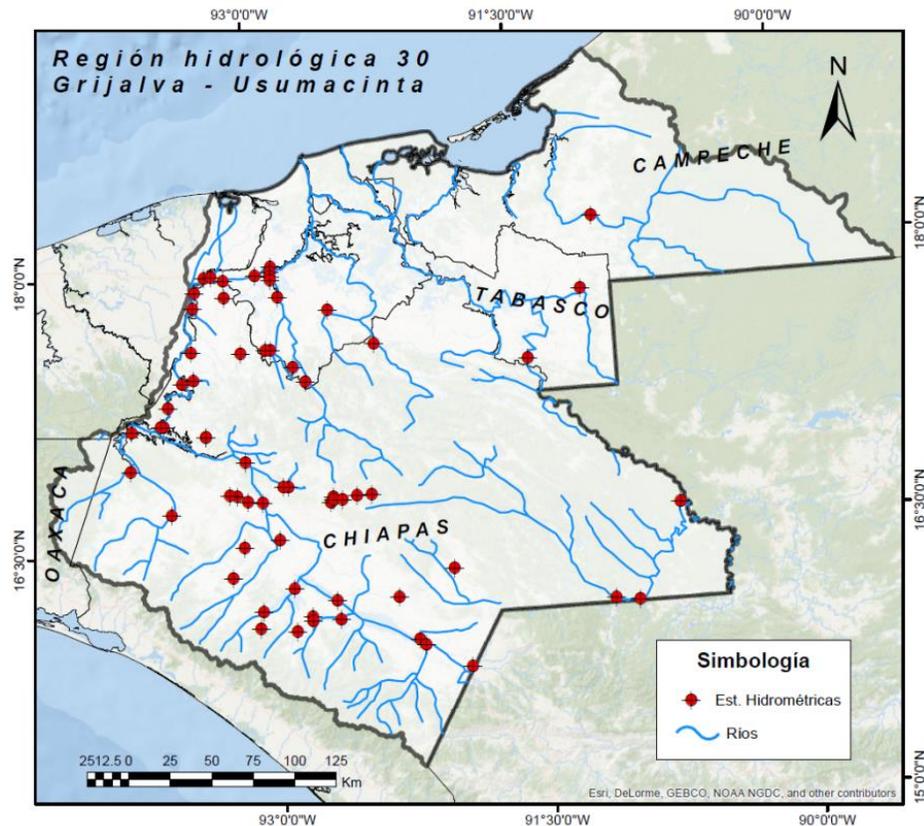


Figura 11. Estaciones Hidrométricas de la Región hidrológica 30 que se encuentra en el BANDAS y meta datos de CONABIO.

En la depuración de datos anuales, la información obtenida de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) del portal del Banco Nacional de Aguas superficiales (BANDAS) y con la información digitalizada de las estaciones de interés del geportal CONABIO (comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad) se realizaron las observaciones de cada estación de la región hidrológica 30 (figura 11), las cuales se tuvieron criterios para indicar si eran aptos o no para ser tomados dentro de la evaluación.

En resumen se utilizan solo 20 estaciones de las 153 existentes, considerando las siguientes observaciones.

- No se consideraron estaciones con valores muy escasos (< 20 datos), sin embargo; las estaciones hidrométricas que no cumplen con la suficiente información, solo se ocuparan para realizar algunas comparaciones de estaciones que si las contienen y que sean contiguas, esto se hizo con el fin de ver la veracidad de los escurrimientos de los QMI anuales de la serie histórica.
- En la región hidrológica, existe el sistema de embalses artificiales del Río Grijalva (Angostura, Malpaso, Chicoasen y Peñitas) debido a ello se descartan estaciones que se vean afectadas dentro del proceso constructivo y posteriormente en la operación. En un caso particular, la estación "ARCO DE PIEDRA" ubicada cerca de la presa angostura (Est. 30030), contiene registros desde 1950 por lo que permite dar información confiable (la presa entro en operación en julio 1976) antes

del proceso constructivo y considerando que tiene la suficiente información disponible para su evaluación.

- En algunos valores del registro de la estación "TEAPA" (Est. 30032) no tienen alguna similitud o congruencia con las estaciones contiguas, sabiendo que no hubo algún evento extraordinario que permitiera dar como aceptable la información.

Dicho gasto se presentó el último día de diciembre 1995 por lo que se recurrió en obtener los escurrimientos de diciembre a enero y los meses de temporada de lluvia entre mayo y octubre. Este criterio se repite en algunos valores mínimos y máximos, en el caso de la estación TEAPA se tuvo que descartar el escurrimiento de ese año.

- La estación de "SANTO DOMINGO" (Est. 30212) se realizó un llenado de datos del periodo 1954-1975 con base en datos de la estación "LA ESCALERA" (Est. 30041) que no es considerada para el análisis pero, se encuentra en el mismo cauce aguas abajo.

Esto es debido a dos criterios; la proximidad entre dichas estaciones sobre el mismo cauce hace que se pueda realizar la sustitución de valores y la falta de datos sobre el periodo mencionado de la estación SANTO DOMINGO aunque dicha estación cuenta con mayor registro de información y por tal, es considerada para su evaluación. Esto fue posible realizando un análisis de la dispersión de datos conocidos en ambas estaciones en el periodo de 1976-1997 y sustituyendo los valores de la estación de "LA ESCALERA" del periodo 1954-1975 de la ecuación de la recta en la tendencia lineal (figura 12).

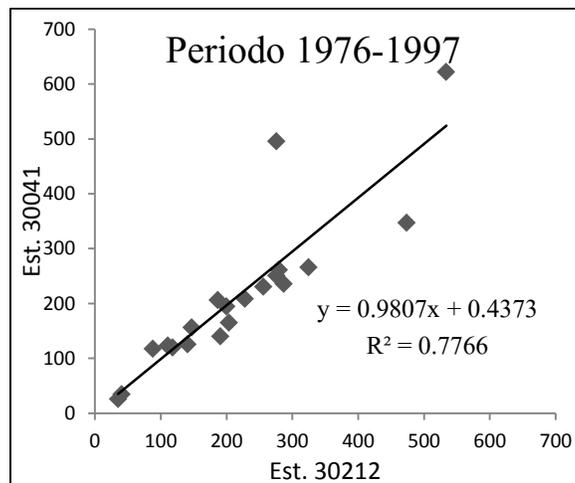


Figura 12. Dispersión de datos de las Estaciones 30212 (Santo Domingo) y 30041 (La Escalera).

- Las mediciones de los QMI anuales de las estaciones PICHUCALCO (30057) Y SAYULA (30070) en los registros de los últimos años tuvieron ciertas anomalías de medición de los escurrimiento debido a que son mucho menores a la media del registro temporal de cada estación comprobando que en la zona donde se encuentran dichas estaciones hidrométricas, no existen eventos meteorológicos extremos tal como las sequías. Las estaciones están ubicadas en la sierra Norte de Chiapas y Altos de Chiapas (figura 10), también se observó que las estaciones

contiguas no existe coincidencia en la información hidrométrica, por lo que, se descartaron 12 datos para la estación 30057 y 4 datos de la Estación 30070, aun así, las estaciones cumple con los requisitos de más de 20 datos.

Los datos recopilados de las estaciones de la región hidrológica contienen información de 1945 hasta 2014, sin embargo de las 20 estaciones hidrométricas ninguna de ellas contiene todos los datos (70 datos). La de mayor registro es la estación “BOCA DEL CERRO” (Est. 30019) con 66 datos y del menor registro es “PAREDÓN” (Est. 30096) con 21 datos, con un promedio de 40 datos por estación. En resumen las estaciones que se consideran son las mostradas en la tabla 2.

Tabla 2. Estaciones que considera en el estudio de regionalización.

Clav.	NOMBRE	Clav.	NOMBRE
30031	PUYACATENGO	30030	ARCO DE PIEDRA
30032	TEAPA	30040	ARGELIA
30093	TAPIJULAPA	30095	EL TIGRE
30135	ALMANDRO	30042	SALTO DE AGUA
30020	EL BOQUERON II	30055	MACUSPANA
30071	SANTA MARIA	30066	TZIMBAC
30072	LAS FLORES II	30070	SAYULA
30212	STO DOMINGO	30094	PLATANAR
30156	BOMBANA	30096	PAREDÓN
30019	BOCA DEL CERRO	30057	PICHUCALCO

5.1.1 Formación de grupos y criterios de homogeneidad

En la valoración de la información se debe realizar pruebas que demuestren la homogeneidad e independencia de los datos, por lo que se recurre a utilizar métodos que ayuden a determinar y verificar la hipótesis, entre los que destacan son; Método de Helmert, Prueba t de Studen y prueba estadística de Cramer. Consecuentemente se realiza la independencia de los valores con la prueba de Anderson demostrando que la información es el resultado de un proceso estocástico o producto del azar. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3. Pruebas de homogeneidad e independencia RH-30, donde; "x" significa que no pasa la prueba, por el contrario, "✓" significa que pasa.

Región 30	Nombre	No. De datos	Pruebas de homogeneidad			Independencia
			Helmert	t de Student	Cramer	Anderson
30019	BOCA DEL CERRO	66	X	X	✓	✓
30020	EL BOQUERON II	56	X	✓	✓	✓
30030	ARCO DE PIEDRA	24	✓	✓	✓	✓
30031	PUYACATENGO	48	X	✓	✓	✓
30032	TEAPA	61	X	✓	X	✓
30040	ARGELIA	22	X	✓	✓	✓
30042	SALTO DE AGUA	57	✓	✓	✓	✓
30055	MACUSPANA	40	X	✓	✓	✓
30057	PICHUCALCO	27	✓	X	✓	✓
30066	TZIMBAC	35	X	✓	✓	✓
30070	SAYULA	23	✓	X	X	✓
30071	SANTA MARIA	42	X	✓	✓	✓
30072	LAS FLORES II	47	X	✓	✓	✓
30093	TAPIJULAPA	46	✓	✓	✓	✓
30094	PLATANAR	32	X	✓	✓	✓
30095	EL TIGRE	29	✓	✓	✓	✓
30096	PAREDON	21	✓	✓	✓	✓
30135	ALMANDRO	30	✓	✓	✓	✓
30156	BOMBANA	30	X	✓	✓	✓
30212	STO DOMINGO	54	X	✓	✓	✓

En la tabla anterior, se concluye que existen en las estaciones consideradas respuestas confiables y son aptas para su análisis de regionalización considerando que:

- En todas las estaciones existe independencia, utilizando la prueba de independencia de Anderson.
- 5 de las estaciones pasan todas las pruebas de homogeneidad, sin embargo 3 estaciones solo pasan una prueba de homogeneidad (*BOCA DEL CERRO*, *TEAPA* y *SAYULA*) los criterios a considerarlas es que a pesar de que no pasan la mayoría de las pruebas, existe cierta compatibilidad con los datos, debido a la independencia de valores, por lo que se consideran aptas para el estudio.

Las 20 estaciones distribuidas en la región hidrológica se obtuvieron sus datos estadísticos, tal como; la media, desviación estándar, coeficiente de variación (CV), varianza, valores máximos y mínimos de los gastos máximos instantáneos anuales (QMI) del registro de cada estación.

Por lo que inicialmente se realizó un análisis del QMI contra el área de la cuenca drenada (A) y poder determinar como una primera aproximación los límites para definir grupos.

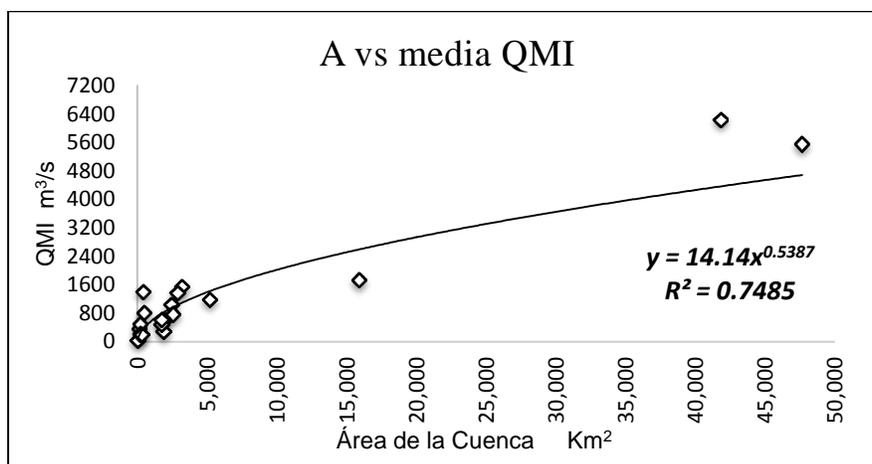


Figura 13. Relación entre el área de la cuenca contra QMI anual de las 20 estaciones RH-30.

La gráfica anterior (Figura 13) permite observar que existen 3 estaciones con una gran un área de cuenca correspondiente a un QMI grande, sin embargo en la demás estaciones no se aprecia dicha proporcionalidad entre los tamaños de cuencas que entre 0 a 5000 km².

Tabla 4. Estaciones consideradas con su correspondiente área de la cuenca (A), QMI, CV y relación (A/QMI).

Clave de Est.	Estación	Área de la cuenca (A) km ²	Media QMI m ³ /s	Coefficiente de Variación (CV)	Relación A/QMI
30030	ARCO DE PIEDRA	15,894	1725.773	0.221	9.209786881
30019	BOCA DEL CERRO	47,697	5548.186	0.213	8.596863536
30095	EL TIGRE	41,852	6244.490	0.142	6.70222887
30020	EL BOQUERON II	1,870	282.219	0.668	6.626066612
30040	ARGELIA	5,189	1178.243	0.292	4.404013772
30212	STO DOMINGO	1743	485.680	1.791	3.588782441
30072	LAS FLORES II	2,551	766.655	1.976	3.327440924
30071	SANTA MARIA	1,958	598.397	0.958	3.272074577
30055	MACUSPANA	1,739	611.662	0.334	2.843075205
30135	ALMANDRO	2,443	1036.733	0.387	2.3564401
30042	SALTO DE AGUA	2,876	1381.479	0.233	2.081826188
30093	TAPIJULAPA	3,219	1549.768	0.422	2.077084504
30096	PAREDON	330	198.531	0.339	1.662212911
30094	PLATANAR	216	218.910	0.266	0.986705457
30156	BOMBANA	32	37.361	1.037	0.856508123
30032	TEAPA	476	813.168	0.659	0.585364658
30031	PUYACATENGO	169	356.545	0.381	0.473992967
30057	PICHUCALCO	411	700.58	0.350	0.586716940
30066	TZIMBAC	200	489.781	0.475	0.408345842
30070	SAYULA	410	1542.649	0.529	0.292308623

En la tabla 4, se observa la relación numérica del área de la cuenca drenada (A) y el gasto máximo instantáneo (QMI) de la gráfica de la figura 13, donde; en la estación "EL BOQUERÓN II", indica que existe 6.6 veces el gasto QMI con respecto al (A) sin embargo, dicha área de la cuenca es mucho más pequeña que las estaciones, ARCO DE

PIEDRA, BOCA DEL CERRO y *EL TIGRE*, por lo que esta no se puede considerar en el grupo de las que contiene las mayores áreas de cuenca en la región. Otro punto a considerar, son aquellas que tiene una proporcionalidad de A/QMI menores a 1, en el caso de la estación "*BOMBANA*", el área de la cuenca es muy pequeña, en comparación a las estaciones que cumplen con dicha proporcionalidad y observando el coeficiente de variación alto a comparación de las demás, por lo que solo se definen aquellas con la mayor área de cuenca.

Al realizar criterios fisiográficos y análisis estadístico, la comparación de los coeficientes de variación (CV) y áreas de la cuenca drenada (A), indica que hay semejanza en algunas estaciones considerando también la ubicación de las mismas en su geomorfología (sub-provincias fisiográficas), de modo que al ubicar las estaciones de manera espacial, se concluye que las estaciones tiene un similitud tanto en el coeficiente de variación (CV) así como la relación de las sub-provincias fisiográficas de cada una de ellas. De este modo, se tiene un mapa de dichos grupo formados que se muestra en la figura 13 y sus correspondientes estadísticos en conjunto con el QMI y el área de la cuenca (A).

De manera general la tabla 5 muestra el rango del CV que oscila entre 0.14 y 1.97, analizando dicho estadístico con los eventos meteorológicos, las estaciones "*LAS FLORES*" y "*SANTA MARÍA*" se vieron afectadas en septiembre 1980 presentado un evento extraordinario por lo que en ese mismo año se tiene valores altos en QMI medido, en el caso de la estación "*SANTO DOMINGO*" en octubre del 2005 con el huracán "Stan", confirmando los valores altos del propio coeficiente de variación aproximados a 2, también se observan coeficientes de variación pequeños en el grupo 3 debido a su magnitud de cuenca, lo que posibilita una distribución más uniforme sobre los datos en el registro considerando que se encuentran ubicadas las estaciones cerca de la zona central este de la Región Hidrológica (Estado de Chiapas y parte del Estado de Tabasco) por lo que el impacto no es tan directo de eventos extremos tal como, huracanes aunado a que es una zona montañosa.

La formación de los grupos homogéneos dentro del estudio corresponde; tanto en su ubicación, geomorfología, coeficiente de variación, tamaños de cuenca drenada y zonas de nacimientos de los ríos principales, un caso ejemplificado es la formación del grupo 1, el cual realizando un análisis se observa en las estaciones *SALTO DEL AGUA* y *MASCUPANA*, sus coeficientes de variación son los más pequeños en comparación a los del resto del grupo sin embargo cumplen con la ubicación que corresponde a la sub-provincia fisiográfica (Sierra norte de Chiapas) esto es debido a que los cauces del grupo nacen en dicha demarcación fisiográfica (figura 14).

Tabla 5. Estadísticos RH-30 de las 19 estaciones seleccionadas.

GRUPO	Estación	Nombre	Máximo	Media QMI [m³/s]	Mínimo [m³/s]	Varianza	Desv Estandar	Coefficiente de Variación	Área de la Cuenca (Km²)
1	30031	PUYACATENGO	915.00	356.545	175.70	18411.51	135.69	0.381	169
1	30032	TEAPA	3394.99	813.168	99.44	286985.03	535.71	0.659	476
1	30042	SALTO DE AGUA	2565.00	1381.479	932.00	103981.04	322.46	0.233	2876
1	30055	MACUSPANA	1304.67	611.662	316.51	41689.01	204.18	0.334	1739
1	30057	PICHUCALCO	1368.00	700.508	333.50	60015.516	244.98	0.350	411
1	30093	TAPIJULAPA	3386.00	1549.768	642.64	426900.84	653.38	0.422	3219
1	30135	ALMANDRO	1827.00	1036.733	359.00	161073.17	401.34	0.387	2443
2	30020	EL BOQUERON II	1200.00	282.219	76.42	35499.87	188.41	0.668	1870
2	30071	SANTA MARIA	3246.96	598.397	199.00	328292.66	572.97	0.958	1958
2	30072	LAS FLORES II	9350.00	766.655	64.07	2294338.99	1514.71	1.976	2551
2	30156	BOMBANA	211.00	37.361	8.42	1500.08	38.73	1.037	32
2	30212	STO DOMINGO	5980.00	485.680	35.40	756340.83	869.68	1.791	1743
3	30019	BOCA DEL CERRO	9153.00	5548.186	3556.66	1397744.97	1182.26	0.213	47697
3	30030	ARCO DE PIEDRA	2422.00	1725.773	1166.00	144832.92	380.57	0.221	15894
3	30040	ARGELIA	1921.00	1178.243	612.00	118545.71	344.30	0.292	5189
3	30095	EL TIGRE	8140.57	6244.490	4782.36	786518.15	886.86	0.142	41852
4	30066	TZIMBAC	1150.00	489.781	185.92	54061.57	232.51	0.475	200
4	30070	SAYULA	3500.00	1402.627	454.00	550972.14	742.27	0.529	410
4	30094	PLATANAR	370.20	218.910	108.40	3392.65	58.25	0.266	216
4	30096	PAREDON	379.50	198.531	88.52	4537.57	67.36	0.339	330

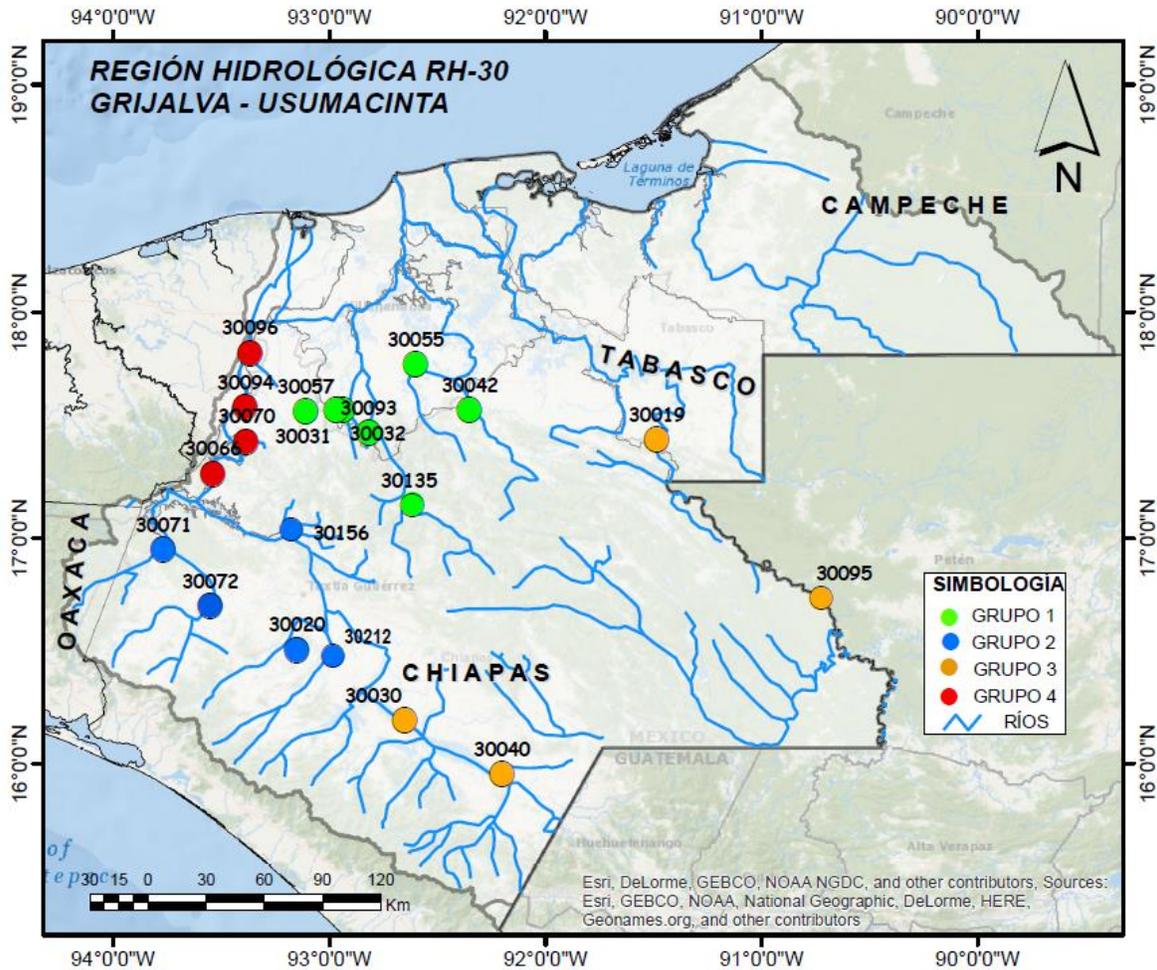


Figura 14. Grupos formados de la región Hidrológica 30.

Los detalles mostrados de cada grupo se presentan a continuación.

5.1.2 Formación Grupo 1

El grupo 1 o Grupo de ríos formados en la Sierra norte de Chiapas central; considera lo siguiente

- Las estaciones (*PUYATENCO, SALTO DEL AGUA, TEAPA, MACUSPANA PICHUCALCO, TAPIJULALPA y ALMANDRO*) se encuentran ubicados en el conjunto de ríos formados al noroeste de la región hidrológica en la sierra del norte de Chiapas, ríos formadores del Río de la Sierra Norte de Chiapas, entre ellos están; Río Bascan, Río Teapa, Río Oxlotán, Río San pedro, Río Almandro, Río Pichucalco, Río Tulija cuyos ríos aguas abajo se unen al Río Grijalva.
- El promedio de los gastos máximos instantáneos (QMI) del grupo correspondientes son de $958 \text{ m}^3/\text{s}$, coeficiente de variación es de 0.40 y su área de cuenca corresponde a 1820 km^2 .

- Tiene una aproximación en su ubicación y una similitud en su relación con el coeficiente de variación de las estaciones, debido a que también los cauces nacen en la sub-provincia fisiográfica de sierra Norte de Chiapas.

5.1.3 Formación Grupo 2

El grupo 2 o Grupo de los Altos de Chiapas:

- El conjunto de estaciones están ubicada en la zona sur – oeste de la región hidrológica, los ríos nacen en la Sierra Madre de Chiapas estos son tributarios del río Grijalva, por los Ríos Santo Domingo, Río Zoyatenco, Río Cintalapa, Río Suchiapa y Río encajonado principalmente, la ubicación se encuentra en la sub-provincia fisiográfica de los Altos de Chiapas.
- En la tabla 4 se observa que este grupo contiene altos CV anteriormente mencionados debido a que en las estaciones presentan valores de eventos extraordinarios más grandes en la región hidrológica, la estación *SANTO DOMINGO* tiene el dato más alto del evento del 2005 “El huracán Stan” en el caribe.
- Las estaciones *SANTO DOMINGO*, *LAS FLORES*, *SANTA MARÍA* y *BOQUERÓN*, se encuentra dentro de la misma zona y los valores del CV son semejantes, para la estación hidrométrica *BOMBANÁ (30156)* contiene el área más pequeña sin embargo se encuentra ubicada dentro en la zona de los Altos de Chiapas, por lo que se considera en este grupo.
- El promedio anual de los gastos máximos instantáneos del grupo correspondiente es de 434 m³/s, coeficiente de variación de 1.29 y área del área de la cuenca de 1630 km².

5.1.4 Formación Grupo 3

El grupo 3 o Grupo de mayores Áreas de Cuenca:

- El conjunto de estaciones se encuentra ubicada en zona Sur de la región hidrológica correspondientes a las sub-provincias fisiográficas; Depresión central de Chiapas, Sierra Lacandona y la parte Sur de los Altos de Chiapas. La mayoría de las corrientes provienen del país vecino de la República de Guatemala, el cual considera los siguientes cauces; Río Lacantún, Río La Pasión, Río Cuilco, Río San Miguel, Río Usumacinta entre otros. Dicha zona considera las cuencas más grandes de la región hidrológica de los datos para ser evaluados.
- Para este grupo se consideran 4 estaciones hidrométricas *BOCA DEL CERRO*, *ARCO DE PIEDRA*, *ARGELIA* y *EL TIGRE*, con CV y grandes extensiones de área de cuenca.
- Su promedios correspondientes de este grupo son para el QMI de 3674 m³/s, coeficiente de variación de 0.21 y área del área de la cuenca de 27658 km².

5.1.5 Formación Grupo 4

El grupo 4 o Grupo del Oeste de la Sierra Norte de Chiapas:

- El conjunto de estaciones se encuentra del lado Oeste de la región hidrológica que nacen en la zona oeste de la sub provincia Fisiográfica de la Sierra Norte de Chiapas, compuesto de ríos que aportan al Río Grijalva entre la presa Malpaso y Peñitas y parte del Grijalva – Mezcalapa ubicada en territorio tabasqueño, dicho conjunto de ríos son; Río Camoapa, Río Platanar, Río Sayula, Río Paredón y Río Tzimbac.
- Este grupo se forma por 4 estaciones hidrométricas; *TZIMBAC, SAYULA, PLATANAR Y PAREDÓN*, observando áreas de cuenca con similitud para su consideración
- Las estaciones para este grupo tienen como promedio el QMI de 577 m³/s, coeficiente de variación de 0.40 y área del área de la cuenca de 289 km².
- Por su ubicación y la zona en que se encuentra estos cauces hacen que se facilite la formación de este grupo, estos desembocan en el Río Grijalva que también es conocido como Río Grijalva - Mezcalapa. La media de los valores del coeficiente de variación para este grupo no se aleja por lo que también se considera por su comportamiento homogéneo (Ver Figura 15).

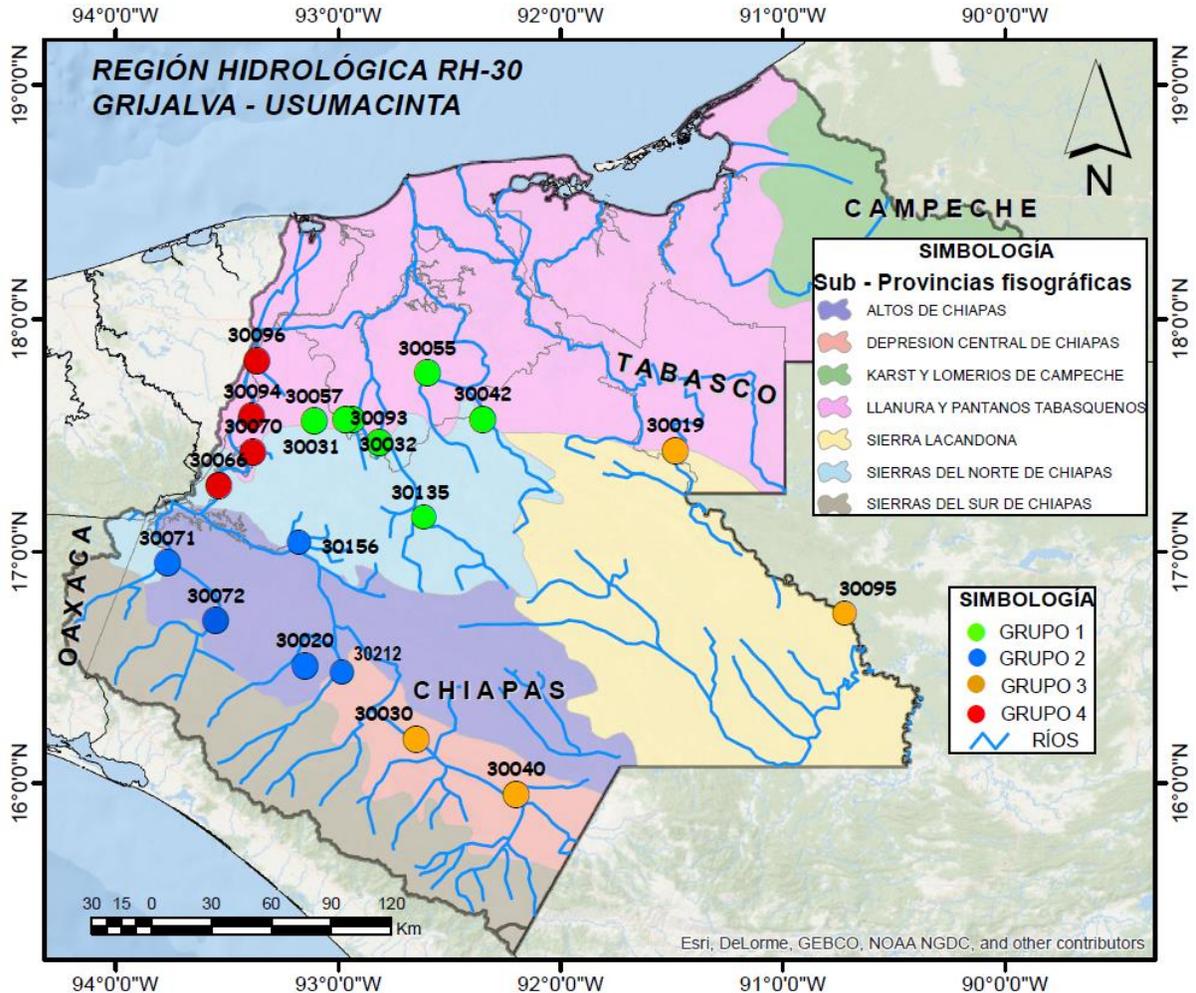


Figura 15. Grupos formados y Sub-provincias fisiográficas.

5.1.6 Funciones de distribución de probabilidades

El diseño de obras en materia hídrica esta relacionando directamente con eventos hidrológico futuros cuyo tiempo de ocurrencia y magnitud no se pueden predecir, esto depende del azar. Es por tal motivo que la probabilidad y estadística toma un papel importante sobre el pronóstico de eventos hidrológicos.

Entre las herramientas de interés en materia hídrica, las distribuciones de probabilidad son las que indican el comportamiento sobre datos medidos con el fin de obtener datos extrapolados y estimar avenidas de diseño. Entre las distribuciones que mejor comportamiento de los estudios recientemente hechos en regionalización de caudales, son la Función de distribución Gumbel y doble Gumbel, dichas distribuciones se ha comprobado tienen un mejor respuesta.

En la bibliografía la distribución doble Gumbel es funcional para dos poblaciones la primera con valores meteorológicos dominantes y la segunda por valores ciclónicos (Aparicio, 1997), por tal motivo es la que mejor se ajusta.

La datos extrapolados para cada grupo de interés, se realizara por medio de la herramienta AX.exe que permite obtener los ajustes de las funciones de distribución de probabilidad y verificar el mejor comportamiento.

5.1.7 Valores extrapolados para diferentes periodos de retorno

En la obtención de los datos extrapolados para diferentes periodos de retorno, se recurre a un programa llamado "AX.exe" (Jiménez, 1996), dicho programa permite la obtención sobre funciones de probabilidad, comparando el error estándar entre los datos medidos. El programa permite ver de manera "global" los errores estándares que las funciones de distribución calculan, identificando cual es la que mejor se ajusta como primera aproximación. Para ello se considera como paso previo la estandarización de datos esto se hace dividiendo cada valor entre la media del registro de cada estación de los gastos máximos instantáneos anuales.

Los valores de la figura 16, se visualiza los datos analizados del ajuste global de las funciones de distribución (la lectura de datos corresponde a un formato con extensión .AJU, para el Grupo 1 se utilizó el nombre G001.AJU basado en un block de notas de Windows®).

Los resultados que calcula el programa indica que la distribución Doble Gumbel tiene un Error Estándar (EE) de 0.093 en forma Global (Figura 16), sin embargo al realizar nuevamente el ajuste automático con dicha función de probabilidad se tiene un error de 0.047, debido a que en la primera iteración el programa evalúa con un 80% ($P = 0.8$) en la población de datos frecuentes (primera población), y al realizar el ajuste de la función se presenta con un 97% ($P = 0.97$).

La figura 17 muestra los valores que calcula el programa AX, observando los parámetros estadísticos de la muestra para la función Doble Gumbel (Alfa1, Beta1, alfa2, Beta2 y P) del mejor ajuste.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	.180	-----	.180	-----
Lognormal	.099	.074	.105	.877
Gumbel	.107	-----	.113	-----
Exponencial	.096	-----	.561	-----
Gamma	.127	.119	.134	11111.000
Doble Gumbel	.093			

Mínimo error estándar: .074
Calculado por la función: Lognormal (momentos) 3 p.

Aceptar Imprimir Ayuda

Figura 16. Ajuste Global de funciones de probabilidad del Grupo 1.

i	Tr	Dato	Calculado	Error^2
1	310	4.18	3.63	.3
2	155	2.92	3.14	.05
3	103.33	2.57	2.84	.07
4	77.5	2.43	2.62	.04
5	62	2.3	2.45	.02
6	51.67	2.28	2.32	.
7	44.29	2.19	2.21	.
8	38.75	2.13	2.12	.
9	34.44	2.07	2.04	.
10	31	2.03	1.98	.
11	28.18	1.95	1.92	.
12	25.83	1.95	1.88	.01
13	23.85	1.87	1.84	.
14	22.14	1.86	1.8	.
15	20.67	1.78	1.77	.
16	19.38	1.76	1.74	.
17	18.24	1.7	1.71	.
18	17.22	1.68	1.68	.
19	16.32	1.67	1.66	.
20	15.5	1.67	1.64	.
21	14.76	1.66	1.62	.
22	14.09	1.54	1.6	.
23	13.48	1.53	1.58	.
24	12.92	1.52	1.56	.
25	12.4	1.52	1.55	.
26	11.92	1.51	1.53	.

Parámetros estadísticos de la muestra:
 $\mu = 1.001$ $\sigma = .426$ $\gamma = 2.413$ $\kappa = 14.734$

Parámetros de la función: **Doble Gumbel**

Parámetro	Alfa1	Beta1	Alfa2	Beta2	P
Valor	3.907773	.8119	1.497624	2.1773	.97

Error estándar = .047

Figura 17. Ajuste doble Gumbel del Grupo 1.

Los datos extrapolados para diferentes periodos de retorno se muestra en la tabla 6, el cual representan factores que permiten realizar el caculo de los gastos máximos de diseño para el grupo 1 en distintos periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50,100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 10000 años). La grafica de los datos medidos y calculados se muestra en la figura 18.

Tabla 6. Valores extrapolados para diferentes periodos de retorno, grupo 1.

Tr	Factores
años	
2	0.92
5	1.23
10	1.47
20	1.75
50	2.29
100	2.81
200	3.32
500	3.96
1000	4.44
2000	4.91
5000	5.52
10000	6.01

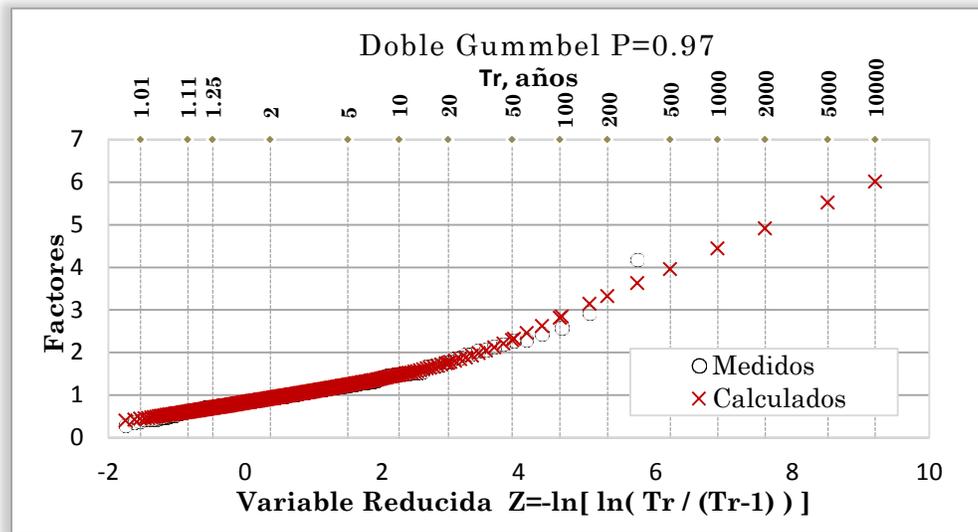


Figura 18. Valores medidos y calculados para diferentes periodos de retorno del Grupo 1.

La obtención de los datos extrapolados para los demás grupos se repite el procedimiento, aplicando las funciones de distribuciones probabilísticas en el programa AX.exe y obteniendo el mejor ajuste, finalmente los valores extrapolados de los grupos se muestran en la tabla 7 para diferentes periodos de retorno.

El ajuste de la función Doble Gumbel cumple en la mayoría de los grupos (grupo 1,2 y 4) debido a su alta presencia de valores altos en los registros de los gastos máximos especialmente del grupo 2 entre los años de 1980 al 2005.

Tabla 7. Factores Extrapolados para diferentes periodos de retorno de los grupos formados.

GRUPOS	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Tr [años]	Doble Gumbel	Doble Gumbel	Gumbel	Doble Gumbel
2	0.92	0.7	0.97	0.92
5	1.23	1.26	1.15	1.26
10	1.47	1.73	1.28	1.52
20	1.75	2.54	1.4	1.86
50	2.29	6.36	1.56	2.19
100	2.81	8.93	1.67	2.34
200	3.32	11.26	1.79	2.47
500	3.96	14.2	1.94	2.66
1000	4.44	16.38	2.06	2.8
2000	4.91	18.53	2.17	2.96
5000	5.52	21.35	2.33	3.17
10000	6.01	23.47	2.44	3.35

El grupo 3 presentó un comportamiento particular, las funciones de distribuciones Lognormal por Máxima Verosimilitud de 2 parámetros, Gumbel y doble Gumbel toman el mejor ajuste obteniendo valores semejantes en los factores extrapolados.

Realizando un análisis de la información, los valores altos están integrados en la función de distribución Gumbel, por lo que dicha función se considera para el presente grupo, esto es debido al margen de error que pueda tener sobre los factores para diferentes periodos de retorno ya que son mayores a partir de los 50 años, la siguiente tabla muestra la comparación de los factores extrapolados para distintos periodos de retorno (Tabla 8).

Tabla 8. Valores extrapolados del Grupo 3 por diferentes funciones de probabilidad.

Tr [años]	Lognormal M. V. 2p	Gumbel	Doble Gumbel
2	0.98	0.97	0.97
5	1.17	1.15	1.17
10	1.29	1.28	1.32
20	1.39	1.4	1.42
50	1.52	1.56	1.55
100	1.61	1.67	1.66
200	1.7	1.79	1.78
500	1.81	1.94	1.93
1000	1.9	2.06	2.04
2000	1.98	2.17	2.16
5000	2.09	2.33	2.31
10000	2.17	2.44	2.43

Las figuras 19, 20 y 21 muestran el comportamiento de la mejor función con respecto a los valores registrados para los grupos 2, 3 y 4 respectivamente.

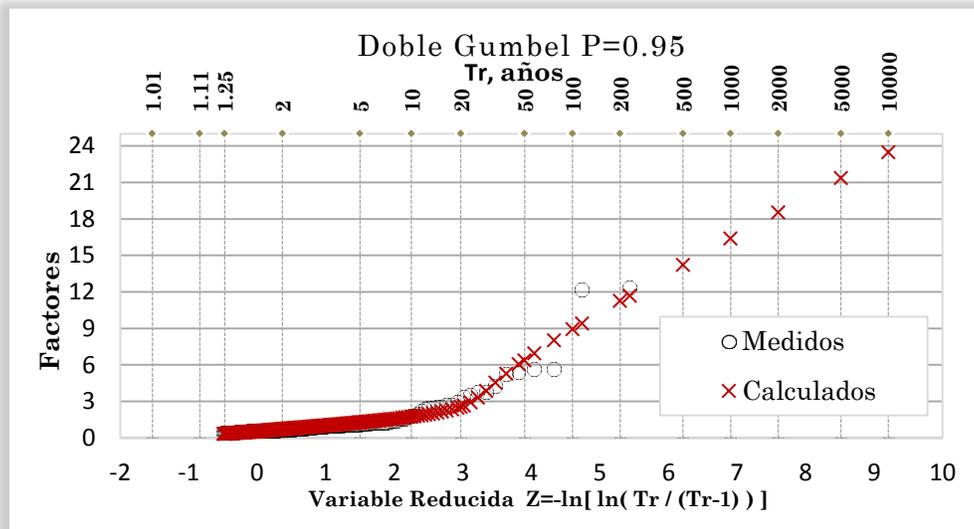


Figura 19. Valores Medidos vs Calculados del Grupo 2, Doble Gumbel.

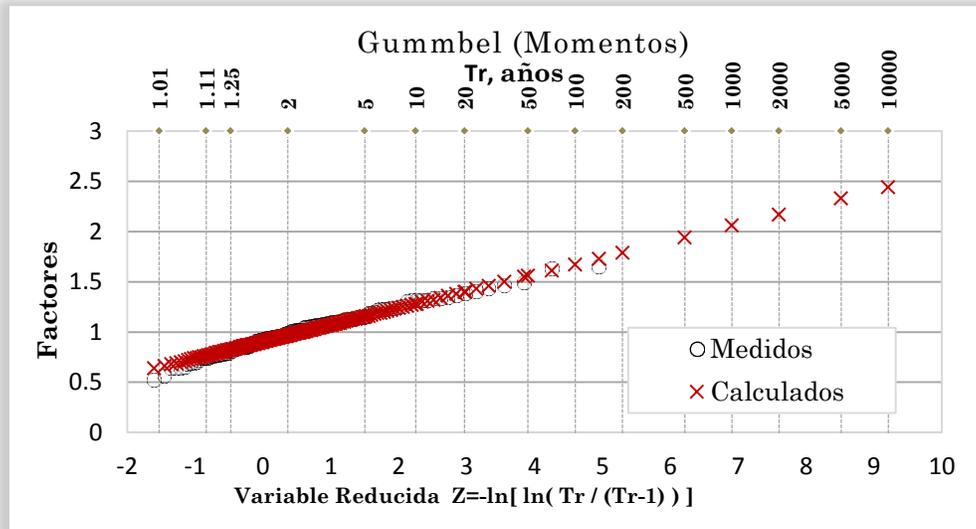


Figura 20. Valores Medidos y Calculados del Grupo 3, Gumbel.

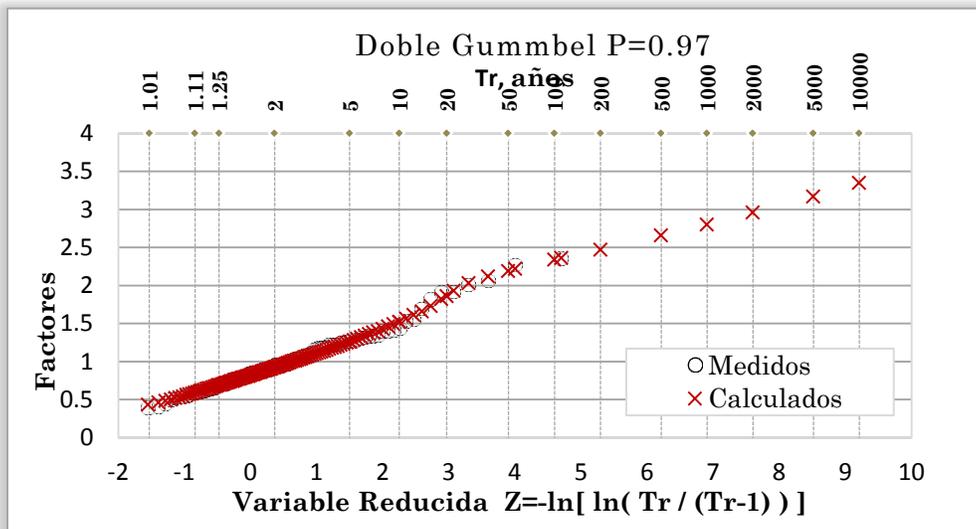


Figura 21. Valores Medidos y Calculados del Grupo 4, Doble Gumbel.

Los valores de la primera población del grupo 1, 2 y 4 obtuvieron resultados de un $P=0.95$ y 0.97 y el grupo 3 con distribución más uniforme tipo Gumbel. Los parámetros de las mejores funciones para cada grupo se muestran a continuación (ver Tabla 9).

Tabla 9. Parámetros de las funciones de distribución Doble Gumbel y Gumbel de cada grupo.

Grupos	P	α_1	β_1	α_2	β_2
Doble Gumbel					
1	0.97	3.907773	0.8119	1.497624	2.1773
2	0.95	2.325403	0.5157	0.322707	4.2825
4	0.97	3.656135	0.8067	6.527709	2.1163
Gumbel					
3	-	5.9948	0.9045	-	-

Dentro del análisis de la primera etapa, los resultados obtenidos de la tabla 8, son los factores que se utilizan para la obtención de los gastos de diseño para diferentes periodos de retorno, sin embargo, para probar su homogeneidad de los grupos formados se recurre a utilizar la prueba de simulación muestral cuyo fin es verificar los valores del registro, generando series de valores aleatorios con los parámetros obtenidos de las función de distribución, con el propósito de demostrar si la región es homogénea al identificar el rango de los valores del CV observados contra los valores sintéticos.

En las siguientes figuras (Figura 22 a 23) se realiza la comparación por la prueba de simulación muestral obteniendo resultado satisfactorios de los grupos, se observa los rangos de los datos aleatorios calculados (serie sintética) satisfacen dentro de los límites de los datos observados tomando 10 generaciones para cada estación.

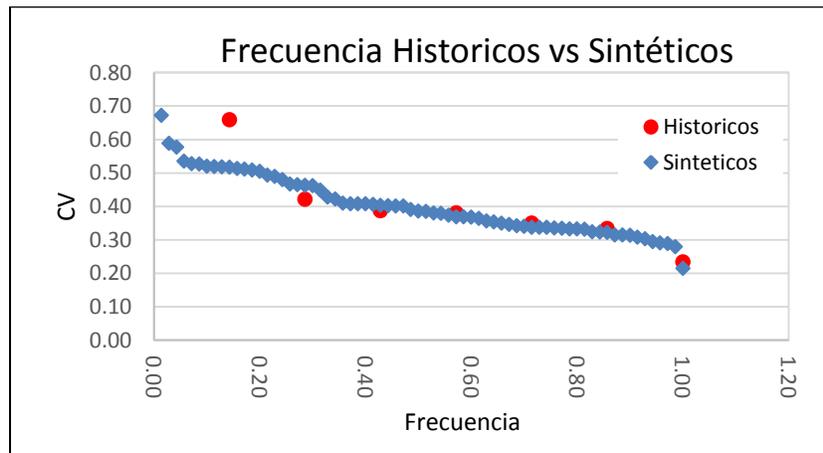


Figura 22. Generación de series sintéticas vs Serie observada del grupo 1.

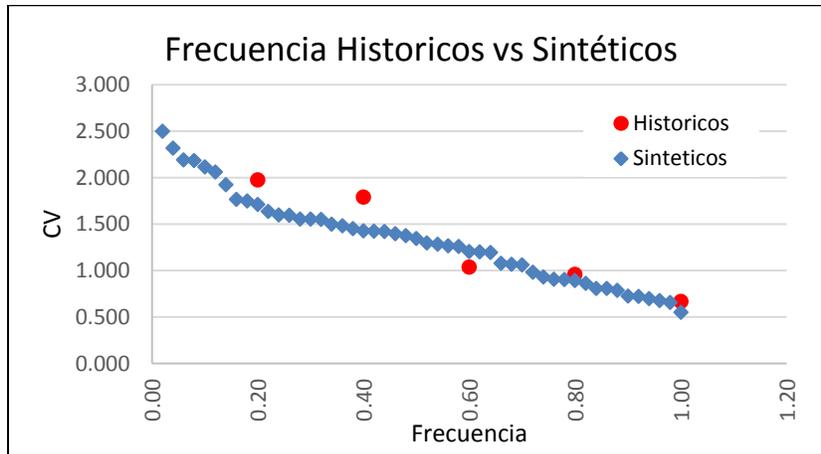


Figura 23. Generación de series sintéticas vs Serie Observada del Grupo 2.

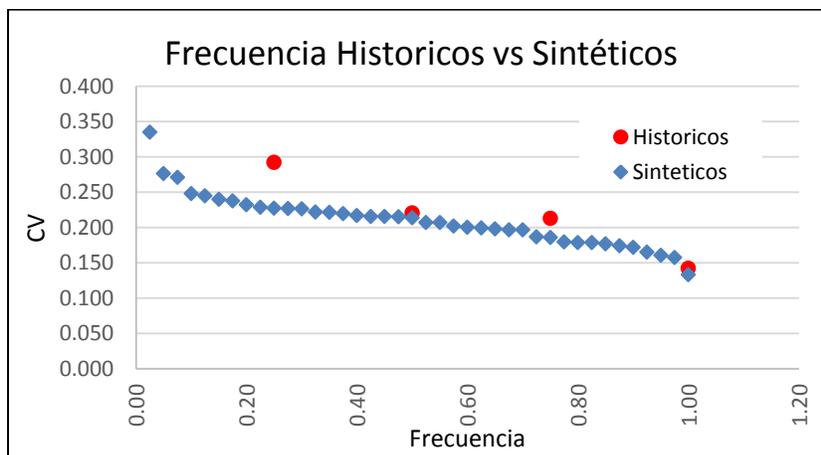


Figura 24. Generación de series sintéticas vs Serie Observada del Grupo 3.

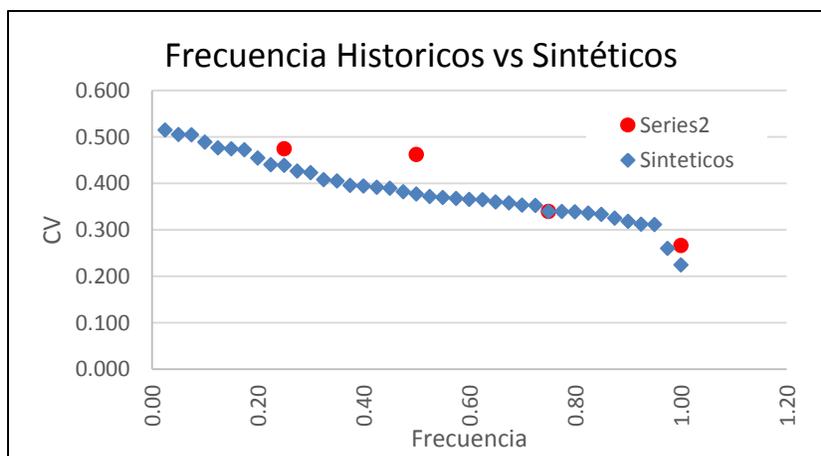


Figura 25. Generación de series sintéticas vs Serie Observada del Grupo 4.

Las ilustraciones anteriores confirman la concordancia y homogeneidad en sus estadísticos de los 4 grupos formados cumpliendo con los límites superiores e inferiores de los números aleatorios (sintéticos) contra los medidos.

5.2 Ecuaciones potenciales para el cálculo de los Gastos Máximos Instantáneos, Etapa Secundaria.

La selección de las características depende de aquellas que pueden ser potencialmente útiles para predecir el escurrimiento superficial, en este caso el máximo escurrimiento instantáneo anual (Domínguez, 1981), por lo que, las características fisiográficas evaluadas (Guzmán, 2015) que se consideran dentro del análisis son; área de la cuenca/Área de la cuenca drenada (A), pendiente del cauce principal (S), tiempo de concentración (T_c), Infiltración potencial máxima (If), Número de curva (NC), longitud del cauce principal (L) y precipitación media máxima anual (P), en la tabla 10 se muestran los valores por cada estación hidrométrica y los grupos formados.

Tabla 10. Variables Fisiográficas de las estaciones de la Región hidrológica 30.

Grupos	Est. Clave	A [km ²]	S [%]	L [km]	T _c [hr]	NC	If [cm]	P [mm]
UNO	30031	169	0.021	30	4	82	6	192.94
	30032	476	0.042	57	5	76	8	190.19
	30042	2,876	0.014	122	14	79	7	104.67
	30055	1,739	0.023	89	9	78	7	141.57
	30057	411	0.020	51	6	79	7	203.72
	30093	3,219	0.021	133	13	80	6	96.00
	30135	2,443	0.026	93	9	79	7	80.06
DOS	30020	1,870	0.013	114	14	73	9	79.88
	30071	1,958	0.014	85	10	75	8	89.41
	30072	2,551	0.007	77	13	75	8	82.59
	30212	1743	0.01	139	17	73	9	96.98
	30156	32	0.071	12	1	69	11	64.41
TRES	30019	47,697	0.007	461	50	74	9	82.24
	30030	15,894	0.011	296	30	72	10	89.49
	30040	5,189	0.021	153	14	75	8	83.64
	30095	41,852	0.007	421	47	74	9	81.97
CUATRO	30066	200	0.048	42	4	76	8	170.38
	30070	410	0.045	52	5	77	8	166.73
	30094	216	0.019	56	7	80	6	173.77
	30096	330	0.011	49	8	84	5	165.39

Dentro de un primer análisis se realiza la calibración, considerando cada variable fisiográfica (VF) con una ecuación potencial que relacione el QMI anual de cada grupo y de la región hidrológica (Global), esto es para identificar el comportamiento del coeficiente de determinación (R^2), y observar las variable que se relacionan mejor ($R^2 \sim 1$). De acuerdo a los estudios, Sutcliffe (1978) del FSR por sus siglas en Ingles (Flood Study Report) considera que existe una relación del gasto máximo anual para estimación de inundaciones por medio de características fisiográficas.

En estudios recientes, en México, la determinación del QMI en cuencas donde no se tienen datos estadísticos las relaciones fisiográficas oscilan de 1 a 4 variables dando comportamientos de Coeficientes de Determinación del orden de 0.800 – 0.999. (Guzmán,

2015 y Alcalá, 2016). La ecuación (5.1) se considera para una variable fisiográfica (VF) representada en su forma general como primera aproximación para la estimación del QMI anual (Gasto de diseño expresado como el gasto máximo instantáneo anual), siendo X la variable fisiográfica y, a_1 y a_2 constantes a optimizar, con ello se observa el comportamiento del coeficiente de determinación ($R^2 \approx 1$).

$$QMI_{calculado} = a_1 X_1^{a_2} \quad (5.1)$$

Para 2 y 3 VF, en la ecuación 5.2 y 5.3 respectivamente, muestra la forma general donde; a_1, a_2, a_3, a_4 son las constantes a optimizar, X_1, X_2 y X_3 son variables fisiográficas (VF).

$$QMI_{calculado} = a_1 X_1^{a_2} X_2^{a_3} \quad (5.2)$$

$$QMI_{calculado} = a_1 X_1^{a_2} X_2^{a_3} X_3^{a_4} \quad (5.3)$$

El análisis hace referencia a la repuesta del coeficiente de determinación (R^2) considerando el siguiente análisis dividido en 4 pasos, en la obtención de las ecuaciones que mejor se ajusten a los valores observados de los QMI anuales de las 4 regiones homogéneas.

1. *Análisis del conjunto de todas las estaciones (análisis global)*; ecuaciones que permiten observar el comportamiento de la región hidrológica de las 20 estaciones seleccionadas (Ecuaciones globales), por lo que se realiza lo siguiente.
 - a) Evaluación de una variable fisiográfica (VF)
 - b) Evaluación de dos VF
 - c) Evaluación de tres VF
 - d) Ecuaciones de interés.
2. *Análisis por grupo utilizando las ecuaciones obtenidas al analizar todas las estaciones (análisis global por grupo)*; Consiste en utilizar las ecuaciones Globales con la mejor respuesta del R^2 para las 4 regiones homogéneas, dicha evaluación permite ser más confiable debido a que consideran las 20 estaciones, del cual se deriva en lo siguiente.
 - e) Evaluación de una VF
 - f) Evaluación de dos VF
 - g) Evaluación de tres VF
 - h) Ecuaciones de interés;
3. *Análisis por cada grupo independiente*; Dicho análisis consiste en obtener las ecuaciones considerando cada estación de cada región homogénea, la evaluación de más de 2 VF solo será válida para aquellos grupos de más de 4 estaciones (grupo 1 y 2), por lo que el análisis queda de la siguiente manera,
 - i) Utilizando una VF (grupo 1 al 4)
 - j) Utilizando dos VF (grupo 1 al 4)
 - k) Utilizando tres VF (grupo 1)
 - l) Ecuaciones de interés.

4. *Ecuaciones finales*; Las ecuaciones de interés obtenidas en los 3 pasos anteriores se analizan, concluyendo en las ecuaciones que representan mejor a los valores observados (QMI anuales medidos).

- m) Comparación y obtención del conjunto de ecuaciones que mejor representen QMI observado en los incisos h) y l).

Restricciones de las constantes a optimizar de las variables fisiográficas (VF), se debe de tomar en cuenta ciertas reglas de correspondencia, permitiendo que la ecuación tenga coherencia, para las variables; *A*, *L*, *S*, *P* y *NC* el exponente a optimizar (a_1 , a_2 , a_3 y a_4) debe ser de signo positivo y, por el contrario *Tc* e *If* deben ser de signos negativos, Con las dichas reglas de correspondencias se realizan las combinaciones de 1, 2 y 3 VF dentro del análisis, observando el comportamiento del R^2 de los QMI observados contra los calculados.

5.2.1 Análisis del conjunto de todas las estaciones (Ecuaciones Globales).

5.2.1.1 Evaluación de una variable fisiográfica, Global

Como primer paso, es obtener los coeficientes de determinación que tengan buena respuesta ($R^2 \sim 1$) del promedio de los gastos máximos anuales (QMI anuales) del conjunto de estaciones registradas en la región hidrológica (20 estaciones hidrométricas) contra los gastos calculados de la ecuación 5.1 de cada una de las variables fisiográficas de interés, esto se realiza al optimizar las constantes aunado a los criterios de correspondencia. El resultado de las optimizaciones resulto en las siguientes figuras.

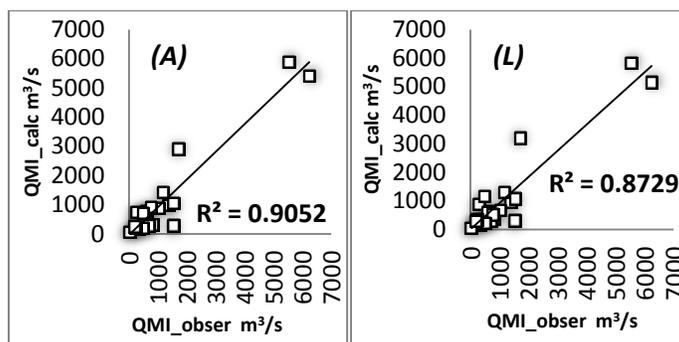


Figura 26. Área de la cuenca drenada y longitud del cauce principal, QMI observados contra QMI calculados del conjunto de estaciones seleccionadas (Forma Global)

Las variables que tuvieron respuestas son *A* y *L* con $R^2 = 0.9052$ y 0.8729 respectivamente, las demás variables (*S*, *P*, *Tc*, *NC* y *If*) no tuvieron resultados favorables ($R \sim 0$).

$$QMI_{global} = 5.84877 * A^{0.641489} \quad (5.4)$$

$$QMI_{global} = 1.386603 * L^{1.359953} \quad (5.5)$$

5.2.1.2 Evaluación de dos variables fisiográficas, Global

En el caso de dos variables fisiográficas, se hacen las combinaciones de las mejores respuestas del punto anterior entre las demás variables para observar su comportamiento.

Tabla 11. Combinaciones 2 VF para la obtención de ecuaciones en su forma global en la región hidrológica.

Combinaciones para 2 VF		
#	Combinaciones	
1	A	S
2	A	L
3	A	Tc
4	A	NC
5	A	P
6	A	If
7	L	S
8	L	Tc
9	L	NC
10	L	P
11	L	If

La tabla 11 muestra las 11 combinaciones para obtener las ecuaciones, donde las variables predominantes son A y L. por lo que al realizar la búsqueda de dichas ecuaciones en la optimización de las constantes de la ecuación 5.2 (a_1 , a_2 y a_3) se tiene las gráficas de la figura 27, donde 7 combinaciones tuvieron respuesta con mejor comportamiento al coeficiente de determinación (R^2).

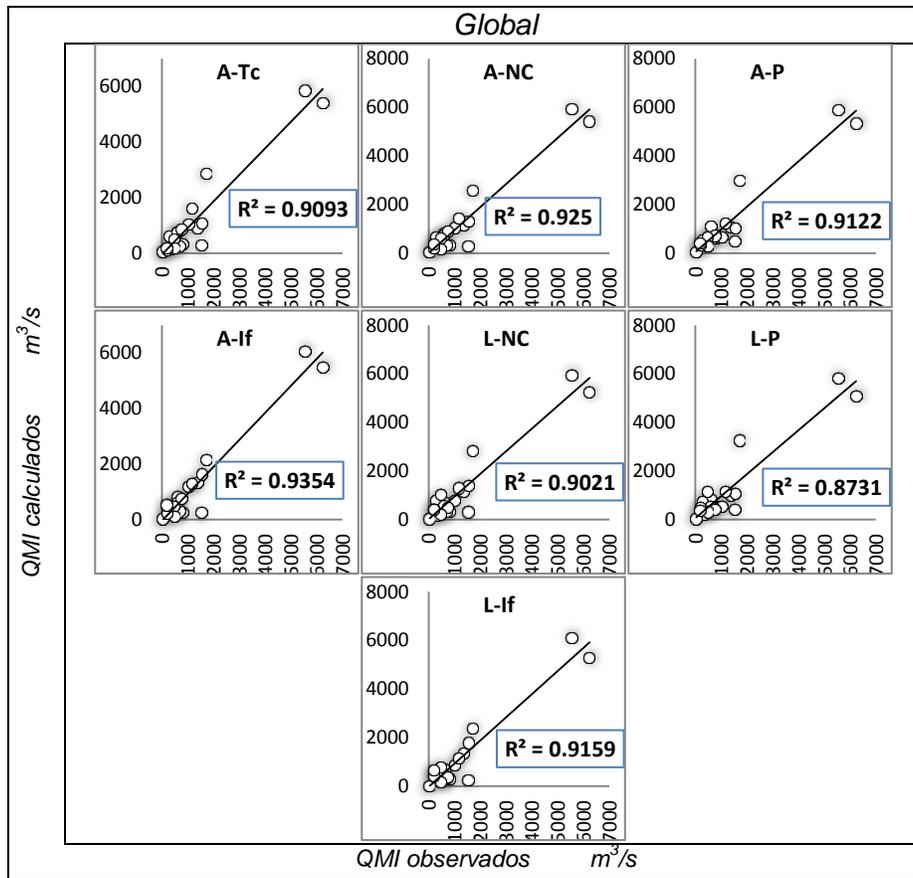


Figura 27. Resumen de las Gráficas con respuesta a la combinación de 2 VF del grupo de estaciones de la región hidrológica (QMI Observados contra QMI calculados).

A continuación las ecuaciones.

$$QMI_{global} = 3.85E - 07 * A^{0.665823} * NC^{3.782869} \quad (5.6)$$

$$QMI_{global} = 0.007975 * A^{0.722311} * P^{1.299886} \quad (5.7)$$

$$QMI_{global} = 179.9686 * A^{0.746151} * If^{-2.06621} \quad (5.8)$$

$$QMI_{global} = 43.54467 * L^{1.614518} * If^{-2.266039} \quad (5.9)$$

$$QMI_{global} = 2.43812 * A^{0.959518} * Tc^{-0.650496} \quad (5.10)$$

$$QMI_{global} = 0.018707 * L^{1.471961} * P^{0.821047} \quad (5.11)$$

$$QMI_{global} = 2.37E - 08 * L^{1.429967} * NC^{4.061118} \quad (5.12)$$

En las ecuaciones 5.6, 5.7 y 5.12 las constantes multiplicativa resulta ser de un valor pequeño, sin embargo al observa los exponente de las variables P y NC, los valores son mayores a 1, por tal motivo la propia estructura de la ecuación trata de equilibrar el valor del QMI anual, en caso contrario las ecuaciones 5.8 y 5.9 donde la variable *If* el exponente menores a -1, los valores de la constante son altos (179.9986 y 43.54467 respectivamente), reflejando el mismo comportamiento. La combinación A-*If* es la que mejor se ajusta con $R^2 = 0.9354$ dentro de la región hidrológica.

5.2.1.3 Evaluación de tres variables fisiográficas, global

Usando la ecuación 5.3, para optimizar las constantes correspondientes considerando las combinaciones de la tabla 12, del cual se utilizaron como variables de interés A, L y P, se tiene en resumen las gráficas de la figura 28, obteniendo solo respuesta en 5 de estas combinaciones.

Tabla 12. Combinaciones 3 VF para la obtención de ecuaciones en su forma global en la región hidrológica.

#	Combinaciones		
1	A	L	If
2	A	L	NC
3	A	L	P
4	A	L	Tc
5	A	P	If
6	A	P	NC
7	A	P	Tc
8	L	P	NC
9	L	P	Tc
10	A	Tc	NC

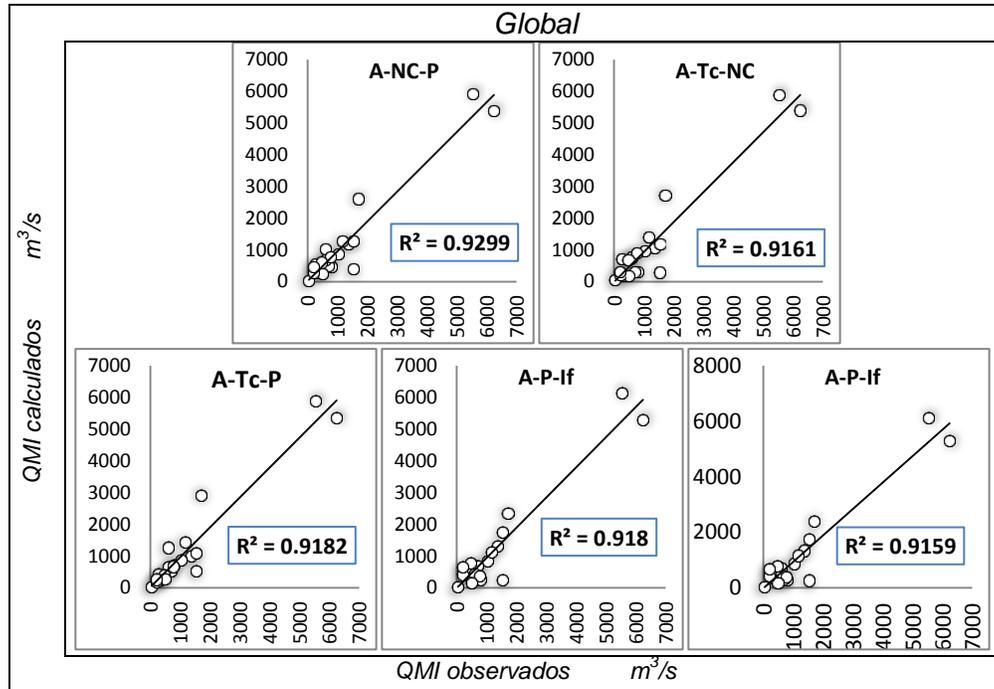


Figura 28. Gráficas con respuesta a la combinación de 2 VF del conjunto de estaciones de la región hidrológica (QMI Observados contra QMI calculados).

Las ecuaciones representativas.

$$QMI_{global} = 2.07E - 08 * A^{0.720286} * NC^{3.515288} * P^{0.791437} \quad (5.13)$$

$$QMI_{global} = 0.00157 * A^{0.64511} * Tc^{-0.020303} * NC^{1.878099} \quad (5.14)$$

$$QMI_{global} = 0.001252 * A^{1.195151} * Tc^{-0.955849} * P^{1.414087} \quad (5.15)$$

$$QMI_{global} = 42.33111 * A^{0.098113} * P^{1.619342} * If^{-2.266313} \quad (5.16)$$

$$QMI_{global} = 39.5882 * A^{0.128286} * L^{1.640824} * If^{-2.294682} \quad (5.17)$$

La combinación A-NC-P es la que mejor respuesta con un $R^2 = 0.9299$. Al observar que el comportamiento del exponente de la variable If es menor a -1, por lo que; la constante multiplicativa resulta ser mayor, en el caso del Tc, su exponente es también negativo sin embargo es mayor a -1, resultando que la constante a_1 sea menor a 1, para el ajuste del QMI anual.

5.2.1.4 Ecuaciones de la Evaluación global.

Las 13 ecuaciones del análisis (5.4 – 5.17) que se obtuvieron en los análisis son las que se eligen para el análisis grupal, de las 4 regiones homogéneas (4 grupos) en la obtención de las ecuaciones por grupo.

5.2.2 Análisis por grupo utilizando las ecuaciones obtenidas al analizar todas las estaciones (Análisis Global por Grupo)

Anteriormente se hizo mención de la ecuaciones globales del cual se debe de realizar el análisis de los 4 grupos formados, ya que los datos QMI anuales para realizar las regiones homogéneas solo se utilizaron pocas estaciones hidrométricas (<7), el cual no es representativo como en su forma global (20 estaciones) debido a ello, se requiere de realizar el análisis para observa su comportamiento.

5.2.2.1 Evaluación de una VF, Análisis Global por Grupo

Para dicha evaluación en los 4 grupos se utilizan las ecuaciones 5.4 y 5.5, obteniendo las gráficas en la figura 29; el grupo 3 con relación con la variable A es donde se observa el mejor comportamiento con $R^2 = 0.9191$; el grupo 1 en relación con la variable L tiene buen comportamiento ($R^2 = 0.8364$).

Se consideran entonces en el análisis final las ecuaciones 5.4 para el grupo 3 y 2, y 5.5 para el grupo 1.

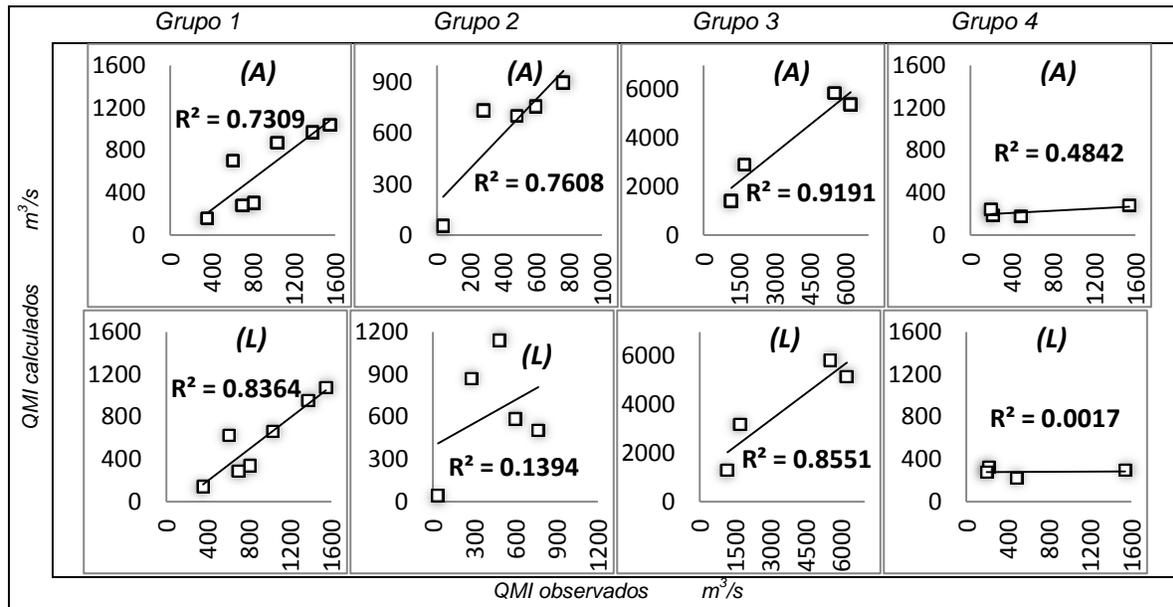


Figura 29. Gráficas de 1 VF utilizando la mejor respuesta de las ecuaciones globales a cada grupo (QMI Observados contra QMI calculados).

5.2.2.2 Evaluación de dos VF, Análisis Global por Grupo

Las ecuaciones 5.6 a 5.12 se usan para el análisis del comportamiento de las regiones homogéneas para 2 VF. Las gráficas del QMI observado contra el QMI calculado se muestran en las figuras 30 y 31.

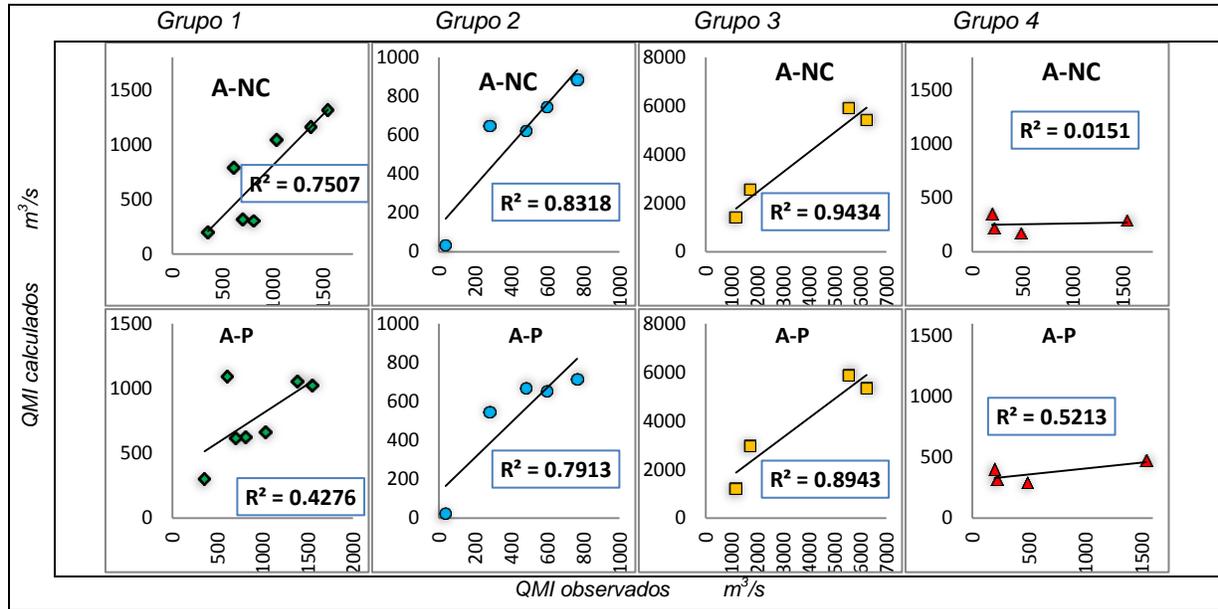


Figura 30. Gráficas de 2 VF utilizando la mejor respuesta de las ecuaciones globales a cada grupo (QMI Observados contra QMI calculados).

La mejor compatibilidad se observa en el grupo 3, dando buenos resultados en combinaciones A-NC, A-Tc y A-If, con R^2 de 0.9434, 0.9333 y 0.9538 respectivamente. En el caso del grupo 4, la combinación A-Tc muestra un buen comportamiento ($R^2 = 0.9147$).

El grupo 1 el mejor ajuste se observa en combinaciones de L-NC y L-If con $R^2 = 0.8429$ y 0.8378 respectivamente, en el caso del grupo 2, la combinación con la mejor respuesta es A-If con $R^2 = 0.8866$.

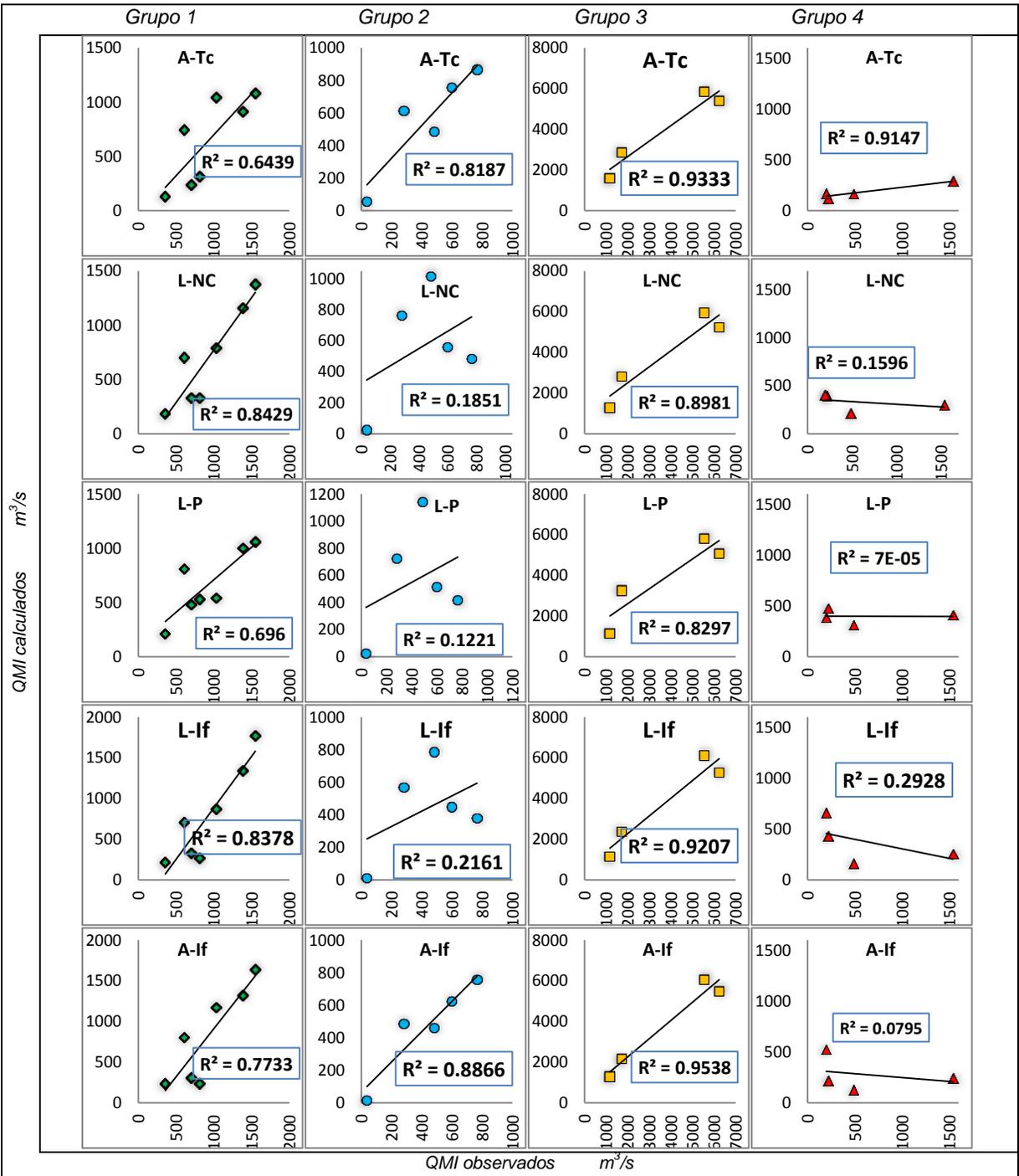


Figura 31. Continuación de gráficas de 2 VF utilizando la mejor respuesta de las ecuaciones globales a cada grupo (QMI Observados contra QMI calculados).

5.2.2.3 Evaluación de tres VF, Análisis Global por Grupo

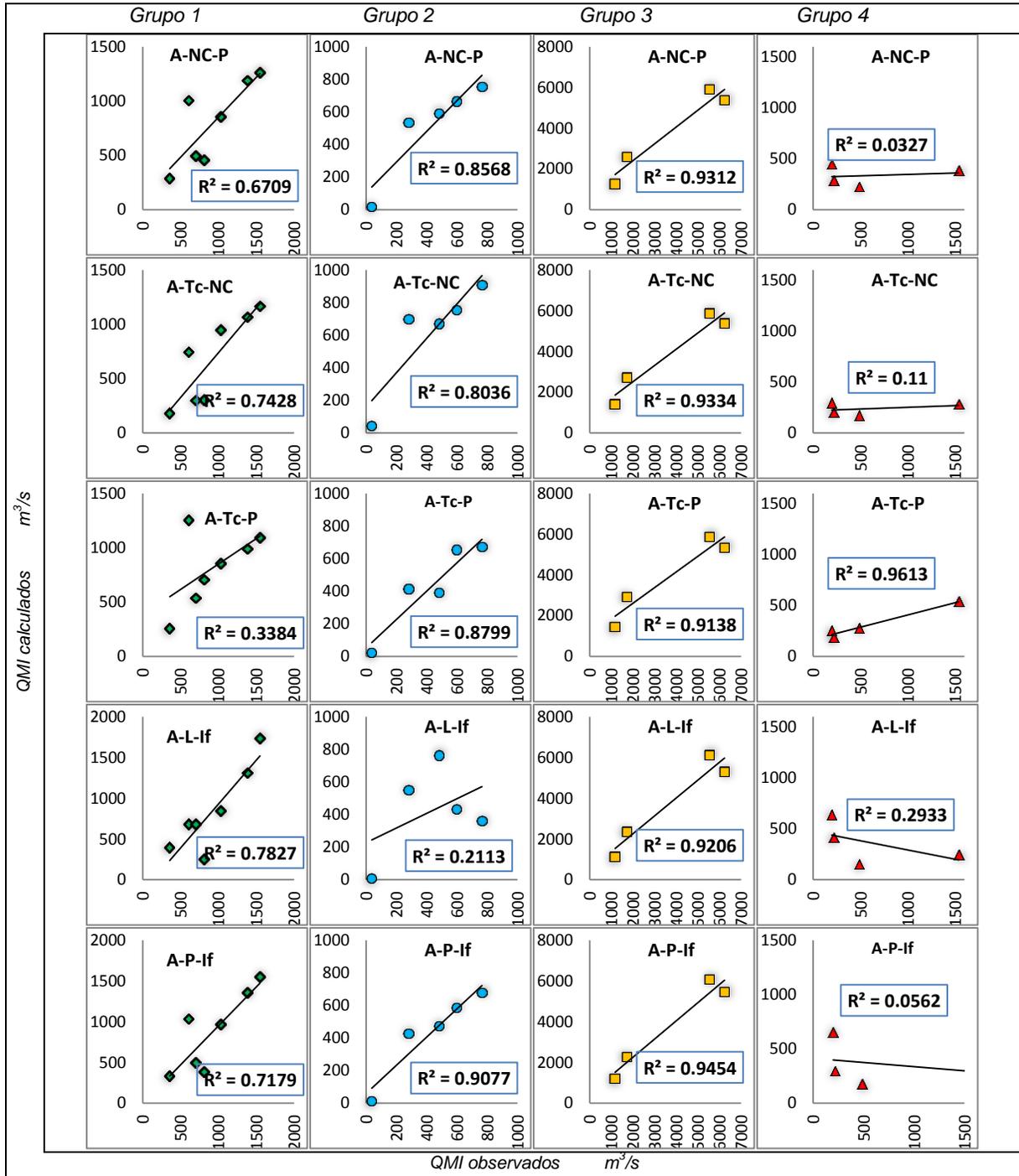


Figura 32. Gráficas de 3 VF utilizando la mejor respuesta de las ecuaciones globales a cada grupo (QMI Observados contra QMI calculados).

Utilizando las ecuaciones correspondiente en su forma global para 3 variables (ecuaciones 5.13 a la 5.17), se tiene las siguientes graficas de la figura 32. Observando comportamiento aceptables en el grupo 3 entre las que destacan combinaciones; A-P-If,

A-Tc-NC y A-NC-P con valores de $R^2 = 0.9454, 0.9334$ y 0.9312 respectivamente, en el grupo 1, la respuesta no fue tan buena, el valor más altos corresponde de $R^2 = 0.7827$ en la combinación A-L-If, el grupo2 $R = 0.9077$ para A-P-If y en el grupo 4 con $R^2 = 0.9613$ para A-Tc-P.

5.2.2.4 Valoración del error porcentual de las mejores combinaciones, forma Global por grupo

Dentro de las combinaciones elegidas en resumen se tiene la tabla 13, el cual resume los coeficientes de determinación (R^2) utilizando las ecuaciones globales (5.4 – 5-17) de la región hidrológica, donde existe mayor compatibilidad en los grupos, el grupo 3 tienen respuestas mayormente favorables y nula en el grupo 4.

Tabla 13. Valores del mejor coeficiente de determinación (R^2) por grupo de la evaluación global.

COMBINACIONES	R^2 EVALUACIÓN GLOBAL				
	Global	G1	G2	G3	G4
A	0.9052		0.7608	0.9191	
L	0.8729	0.8364			
A NC	0.9250				
A P	0.9122			0.9434	
A Tc	0.9093			0.9333	
A If	0.9354		0.8866	0.9538	
L P	0.8731				
L NC	0.9021	0.8429			
L If	0.9159	0.8378			
A NC P	0.9299			0.9312	
A Tc NC	0.9161			0.9334	
A Tc P	0.9182				
A P If	0.918		0.9077	0.9454	
A L If	0.9159	0.7827			

La identificación de las mejores ecuaciones se realiza al comparar el error porcentual de cada grupo y la variabilidad del QMI calculado, por lo que se tiene el análisis de la tabla 14, los errores negativos indican, que el QMI observado es menor que el QMI calculado, las ecuaciones finales de los grupos 1, 2 y 3 son las siguientes.

$$QMI_{global-grupo 1} = 39.5882 * A^{0.128286} * L^{1.640824} * If^{-2.294682} \quad (5.18)$$

$$QMI_{global-grupo2; grupo 3} = 42.33111 * A^{0.098113} * P^{1.619342} * If^{-2.266313} \quad (5.19)$$

$$QMI_{global-grupo2; grupo 3} = 179.9686 * A^{0.746151} * If^{-2.06621} \quad (5.20)$$

Grupo1; de acuerdo a la tabla 14, la relación A-L-If (5.18) conduce a los menores errores para PUYACATENGO, ALMANDRO Y PICHUCALCO; en el caso de SALTO DE AGUA la relación con L-If da un error menor pero ambos son pequeños, en el caso de TAPIJULAPA solo la relación con L es mejor. El mayor error porcentual se presenta para

TEAPA, con el 68.98%, pero en las otras 3 opciones los errores grandes (negrita en la tabla) se presentan en 2 y hasta 3 estaciones.

Tabla 14. Comparación del error porcentual (e%) de las mejores respuesta del (R^2) del grupo 1.

Est. /GRUPO 1	Nombre	QMI observados m ³ /s	QMI calculados m ³ /s			
			L	L-NC	L-If	A-L-If
30031	PUYACATENGO	356.55	143.35	183.84	218.45	399.37
30032	TEAPA	813.17	337.54	332.26	264.84	252.27
30042	SALTO DE AGUA	1381.48	953.59	1158.82	1342.63	1311.34
30055	MACUSPANA	611.66	622.87	703.17	708.03	684.69
30093	TAPIJULAPA	1549.77	1071.30	1378.32	1771.58	1737.24
30135	ALMANDRO	1036.73	661.86	789.32	870.31	844.04
30057	PICHUCALCO	700.51	291.18	333.08	328.55	678.76

Est. /GRUPO 1	Nombre	e%			
		L	L-NC	L-If	A-L-If
30031	PUYACATENGO	59.79	48.44	38.73	-12.01
30032	TEAPA	58.49	59.14	67.43	68.98
30042	SALTO DE AGUA	30.97	16.12	2.81	5.08
30055	MACUSPANA	-1.83	-14.96	-15.76	-11.94
30093	TAPIJULAPA	30.87	11.06	-14.31	-12.10
30135	ALMANDRO	36.16	23.86	16.05	18.59
30057	PICHUCALCO	58.43	52.45	53.10	3.10

Grupo 2, En la tabla 15, las combinaciones A-P-If y A-If (ecuaciones 5.19 y 5.20 respetivamente) muestra los menores errores porcentuales, aunque las estaciones BOMBANA y EL BOQUERON II dichos errores son grandes.

Tabla 15. Comparación del error porcentual (e%) de las mejores respuesta del (R^2) del grupo 2.

Est./GRUPO 2	Nombre	QMI observado m ³ /s	QMI calculado m ³ /s			e%		
			A	A-If	A-P-If	A	A-If	A-P-If
30020	EL BOQUERON II	282.22	734.38	485.65	428.16	-160.21	-72.08	-51.71
30071	SANTA MARIA	598.40	756.36	623.07	585.77	-26.40	-4.12	2.11
30072	LAS FLORES II	766.66	896.26	759.05	677.87	-16.91	0.99	11.58
30212	STO DOMINGO	485.68	701.98	460.82	470.35	-44.54	5.12	3.16
30156	BOMBANA	37.36	54.03	15.62	10.53	-44.61	58.20	71.81

Grupo 3, La tabla 16; las combinaciones A-P-If y A-If muestra mayor compatibilidad de las combinaciones consideradas, los errores porcentuales (e%) varían entre el 1% – 30%. ARCO DE PIEDRA es la que menor compatibilidad tiene en el grupo con QMI mayores al observado, con el menor error de -25.25% en la combinación A-If.

Tabla 16. Comparación del error porcentual (e%) de las mejores respuesta del (R^2) del grupo3.

Est./GRUPO 3	Nombre	QMI observado m^3/s	QMI calculado m^3/s						
			A	A-P	A-Tc	A-If	A-NC-P	A-Tc-NC	A-P-If
30019	BOCA DEL CERRO	5548.19	5865.02	5894.28	5855.89	6053.00	5912.93	5866.66	6063.75
30030	ARCO DE PIEDRA	1725.77	2898.10	2974.39	2850.81	2161.61	2601.66	2717.52	2273.17
30040	ARGELIA	1178.24	1413.36	1213.61	1596.76	1289.33	1271.07	1406.52	1192.93
30095	EL TIGRE	6244.49	5393.23	5340.30	5404.19	5490.45	5367.58	5392.18	5460.42

Est./GRUPO 3	Nombre	e%						
		A	A-P	A-Tc	A-If	A-NC-P	A-Tc-NC	A-P-If
30019	BOCA DEL CERRO	-5.71	-6.24	-5.55	-9.10	-6.57	-5.74	-9.29
30030	ARCO DE PIEDRA	-67.93	-72.35	-65.19	-25.25	-50.75	-57.47	-31.72
30040	ARGELIA	-19.96	-3.00	-35.52	-9.43	-7.88	-19.37	-1.25
30095	EL TIGRE	13.63	14.48	13.46	12.08	14.04	13.65	12.56

5.2.3 Análisis por grupo (grupo independiente).

La evaluación comprende la búsqueda de las ecuaciones de los grupos formados con el mismo número de estaciones hidrométricas (QMI observado) al optimizar de las constantes correspondientes (ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3), por lo que este se limita; El grupo 1 consiste de 7 datos respectivamente las evaluaciones se realizan para 1, 2 y 3 variables fisiográficas (VF), el caso del grupo 2, 3 y 4 lo formación de cada uno considera de 5 o 4 datos las combinaciones corresponden a 1 y 2 VF.

5.2.3.1 Evaluación de una variable fisiográfica, grupo independiente

La evaluación se realiza con la optimización de las constantes de ecuación 5.1, consideración de las variables fisiográficas y las reglas de correspondencia, las gráficas de la figura 33, 34, 35 y 36 del grupo 1, 2, 3 y 4 respectivamente son el resumen de las variables con respuestas entre los QMI observados contra los QMI calculados.

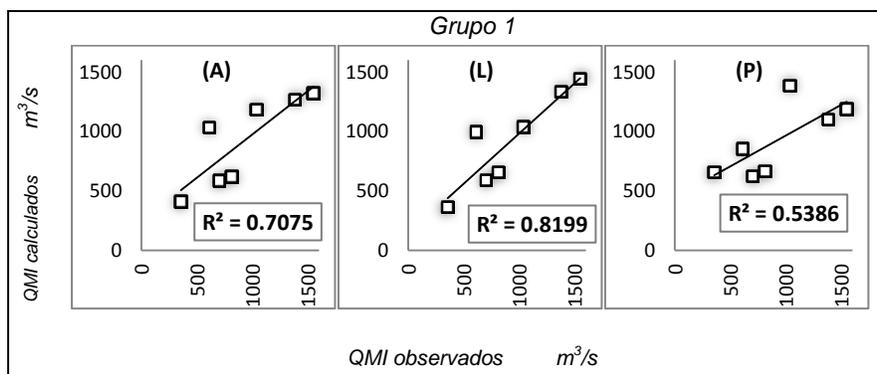


Figura 33. Gráficas de 1 VF utilizando las estaciones del grupo 1 (QMI Observados contra QMI calculados).

La región homogénea del grupo 1, la variables L (longitud del cauce principal), responde a un $R^2 = 0.8199$ con el mejor ajuste, con la expresión 5.21 mostrando el valor de 0.9336 del exponente.

$$QMI_{grupo\ 1} = 15.03368 * L^{0.9336237} \quad (5.21)$$

El grupo 2; la mejor respuesta ser refleja en la variable If con $R^2 = 0.8752$ y A con $R^2 = 0.85$ (ver figura 34), esta última variable representa mejor a los valores medidos del registro.

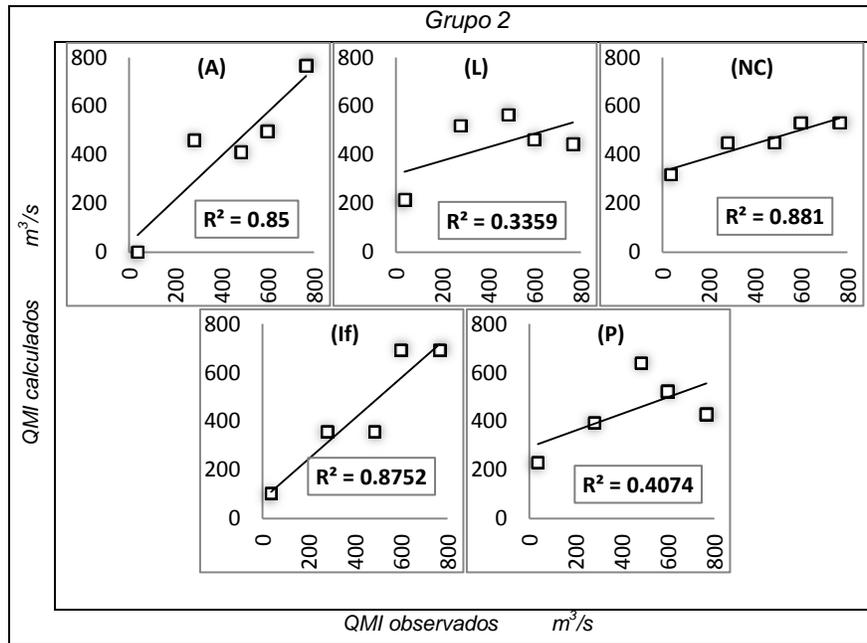


Figura 34. Gráficas de 1 VF utilizando las estaciones del grupo 2 (QMI Observados contra QMI calculados).

La ecuación representativa es la siguiente.

$$QMI_{grupo\ 2} = 0.001897 * A^{1.64576} \quad (5.22)$$

El Grupo 3 (Figura 35), la mejor respuesta es en dos variables (A y L) la variables A tiene la mejor aproximación a los valores del QMI observados con un $R^2 = 0.9313$.

La ecuación 5.23 representa dicha variable para el cálculo del QMI del grupo 3.

$$QMI_{grupo\ 3} = 0.310099442 * A^{0.918224878} \quad (5.23)$$

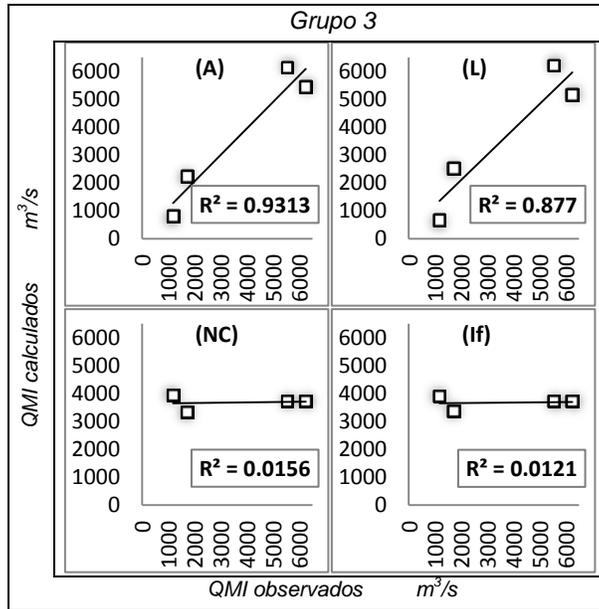


Figura 35. Gráficas de 1 VF utilizando las estaciones del grupo 3 (QMI Observados contra QMI calculados).

El grupo 4, la mejor respuesta se observa en la variable A, con un $R^2 = 0.768$ sin embargo el coeficiente de determinación aún se considera bajo para su análisis. Observando la variable área de la cuenca drenada (A) en la figura 36, los gastos observados (QMI observados) en la mitad de los puntos son mayores que los gastos calculados (QMI calculados), por lo que se recomienda un análisis posterior para dos variables fisiográficas debido a que no es representativo a los valores reales.

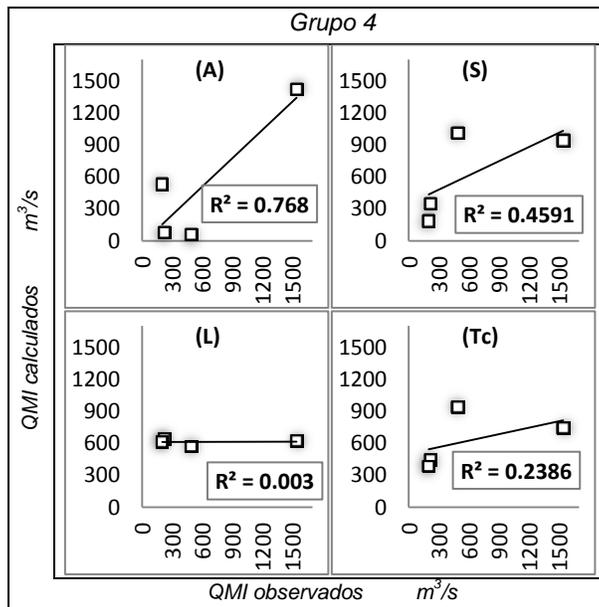


Figura 36. Gráficas de 1 VF utilizando las estaciones del grupo 4 (QMI Observados contra QMI calculados).

5.2.3.2 Evaluación de dos variables fisiográficas, grupo independiente

La correspondencia se realiza grupal para el cálculo del QMI en dos variables fisiográficas, por lo que se realiza combinaciones suficientes para encontrar la ecuación que mejor se adecue a los valores observados, por ello las combinaciones en la tabla 17 para cada grupo homogéneo tomando las variables A, L y P debido a que tienen mayor importancia.

Tabla 17. Combinaciones que se consideran para la obtención de las ecuaciones a cada grupo.

#	combinaciones		#	combinaciones	
1	A	S	9	P	S
2	A	L	10	P	NC
3	A	Tc	11	P	Tc
4	A	NC	12	S	L
5	A	P	13	S	NC
6	L	Tc	14	A	If
7	L	NC	15	L	If
8	L	P			

El resultado de las combinaciones por grupos se obtuvieron las figuras 37, 38, 39 y 40 de los grupos 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

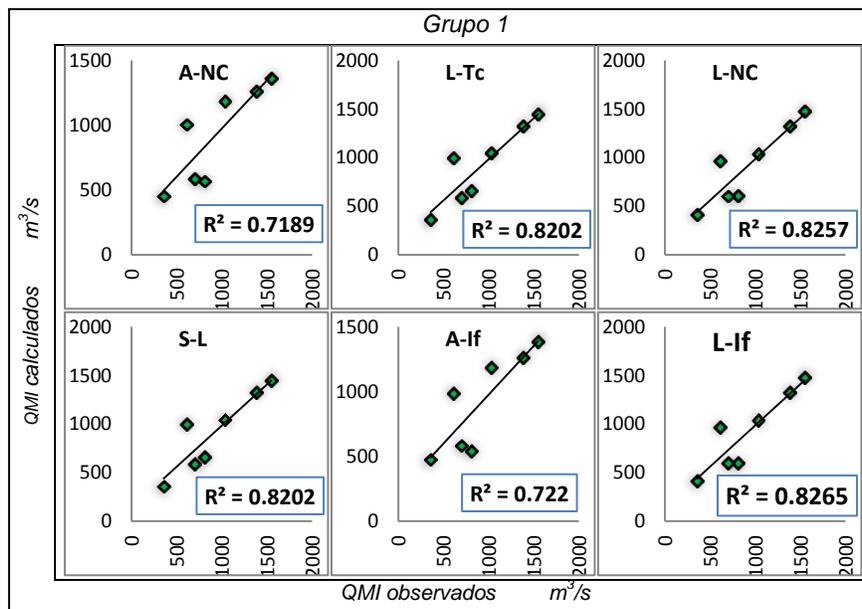


Figura 37. Gráficas del grupo 1 con respuesta a combinaciones de 2 VF (QMI Observados contra QMI calculados).

El grupo 1, el resultado compren de 6 combinaciones, con las mejores respuestas; L-If y L-NC con $R^2 = 0.8265$ y 0.8257 respectivamente, las ecuaciones 5.24 y 5.25 corresponden a dichas combinaciones.

$$QMI_{grupo\ 1} = 48.040282 * L^{0.90797793} * If^{-0.54739894} \quad (5.24)$$

$$QMI_{grupo\ 1} = 0.00042728 * L^{0.90616736} * NC^{2.42458044} \quad (5.25)$$

El grupo 2, al observar las gráficas de la figura 35, la combinación más representativa es A-P con un $R^2 = 0.9415$ con la ecuación 5. 26.

$$QMI_{grupo\ 2} = 6.48176026E - 08 * A^{1.92885837} * P^{1.818562176} \quad (5.26)$$

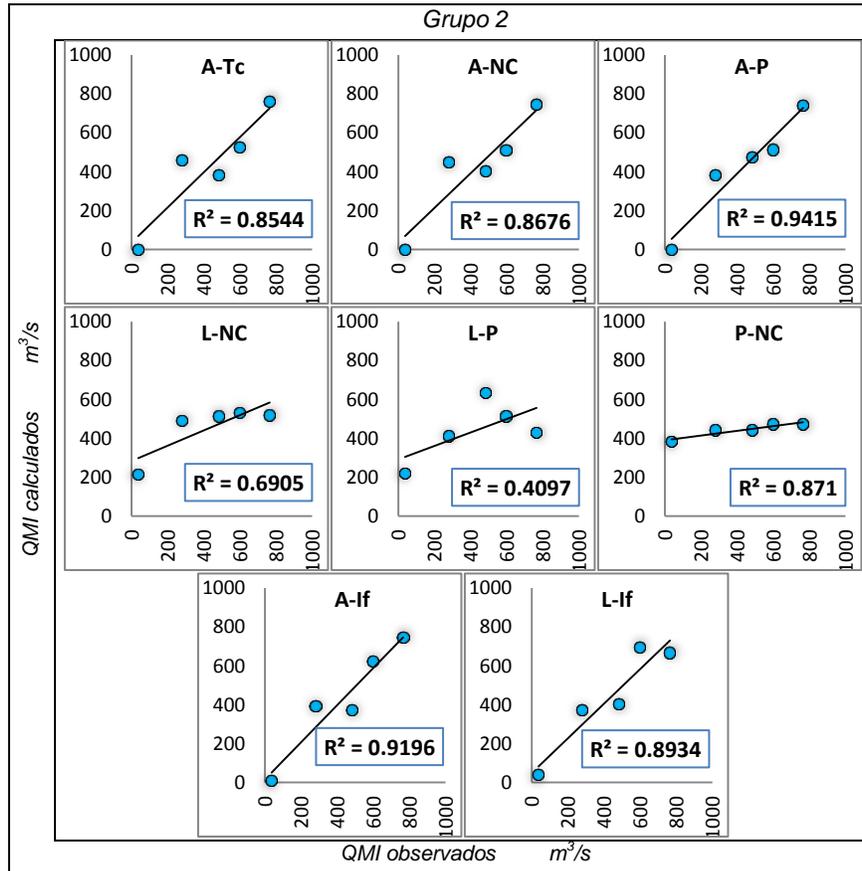


Figura 38. Gráficas del grupo 2 con respuesta a combinaciones de 2 VF (QMI Observados contra QMI calculados).

El caso de grupo 3 (Figura 39), las 6 combinaciones resultantes responde a una buena aproximación a los valores QMI observados, sin embargo, los mejores comportamientos se observan en L-Tc y A-lf, con las ecuaciones 5.27 y 5.28 observando $R^2 = 0.9775$ y 0.9574 respectivamente.

$$QMI_{grupo\ 3} = 113401617414.845 * L^{9.3045385} * Tc^{-8.69458517} \quad (5.27)$$

$$QMI_{grupo\ 3} = 4745.51926 * A^{0.782352519} * If^{-3.733051418} \quad (5.28)$$

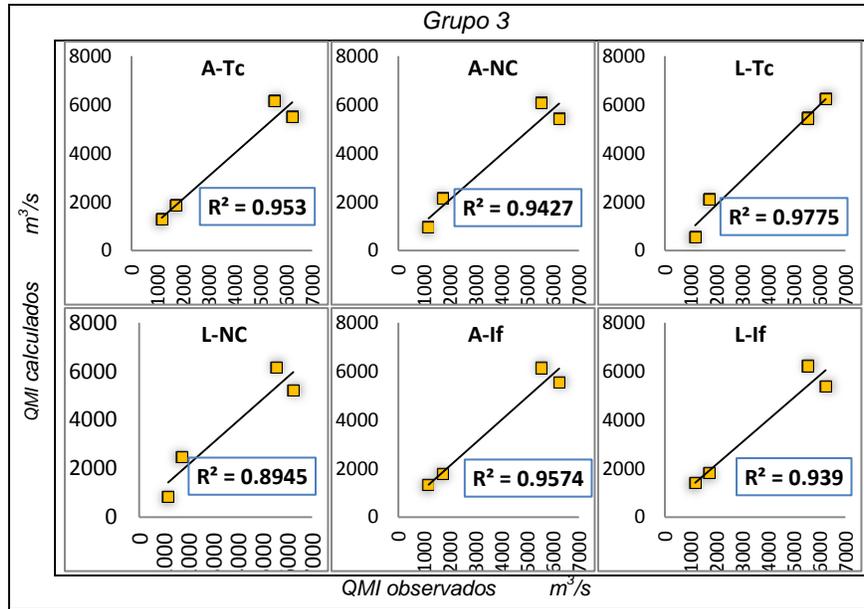


Figura 39. Gráficas del grupo 3 con respuesta a combinaciones de 2 VF (QMI Observados contra QMI calculados).

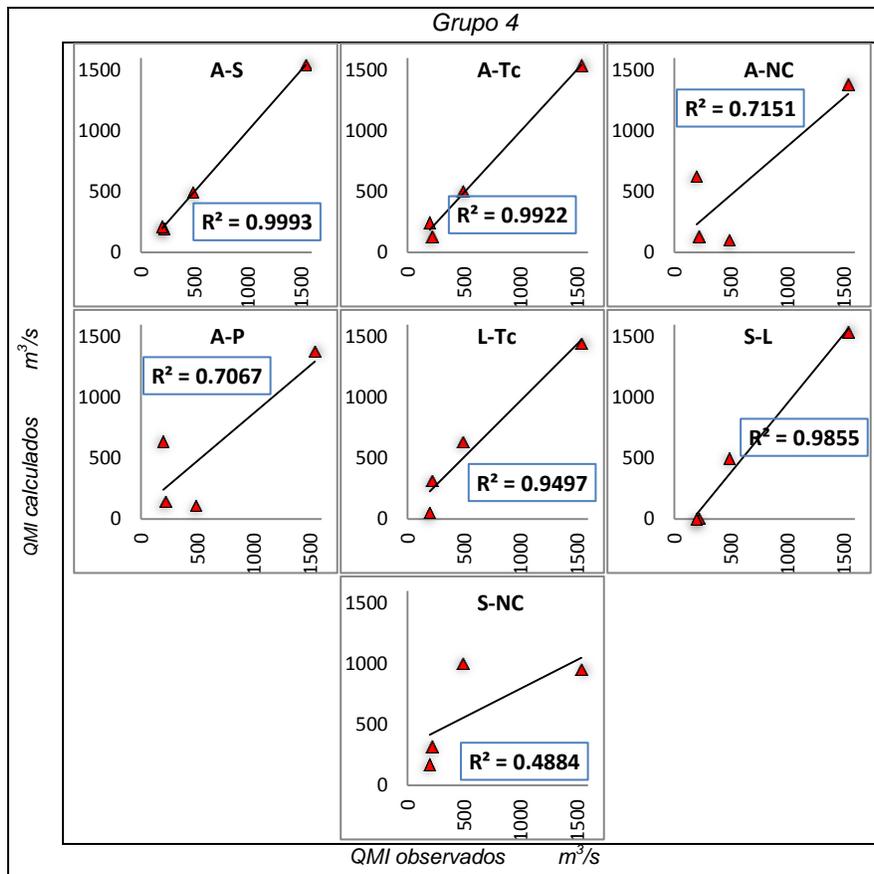


Figura 40. Gráficas del grupo 4 con respuesta a combinaciones de 2 VF (QMI Observados contra QMI calculados).

El grupo 4, las gráficas de la figura 40, las combinación A-S es la que mejor representa los valores observados obteniendo una respuesta del coeficiente de determinación aceptable ($R^2 = 0.9993$) con la siguiente ecuación (ecuación 5.29).

$$QMI_{grupo\ 4} = 2.18608547 * A^{1.68126256} * S^{1.146798378} \quad (5.29)$$

5.2.3.3 Evaluación de tres variables fisiográficas, grupo independiente

La evaluación comprende el grupo 1 solo se analiza este grupo por el mayor número de estaciones hidrométricas (7 datos), cumpliendo con las posibles combinaciones considerando las variables de importancia A, L y P mostrados en la tabla 18.

Tabla 18. Combinaciones 3 VF que se consideran para la obtención de las ecuaciones a los grupo 1 y 2.

#	combinaciones		
1	A	S	L
2	A	S	P
3	A	S	NC
4	A	L	Tc
5	A	L	NC
6	A	L	P
7	A	NC	P
8	A	Tc	NC
9	S	L	P
10	L	NC	P
11	L	Tc	P
12	A	Tc	P
13	A	L	If
14	A	P	If

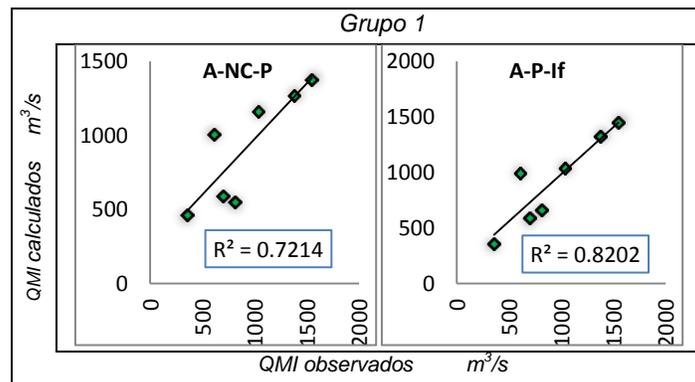


Figura 41. Gráficas del grupo 1 con respuesta a combinaciones de 3 VF (QMI Observados contra QMI calculados).

De las 14 combinaciones el grupo 1 responde solo a 2 de ellas con la mejor combinación A-P-If (figura 41), la siguiente ecuación es quien la representa (ecuación 5.30), correspondiendo a un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.8202$.

$$QMI_{grupo\ 1} = 146.12973107 * A^{0.42792475} * P^{0.094562361} * If^{-0.88322192} \quad (5.30)$$

5.2.3.4 Valoración del error porcentual de las mejores combinaciones por grupo independiente

El resumen de las ecuaciones en la tabla 19 se presenta el coeficiente de determinación de las mejores respuestas en los 4 grupos homogéneos, por lo que se realiza la evaluación de los errores porcentuales para definir las ecuaciones de interés entre los QMI observados contra los QMI calculados. El grupo 4 en la evaluación de las combinaciones solo se considera una ecuación, en los demás grupos se realizan las observaciones para la mejor opción.

Tabla 19. Valores del R^2 a las mejores respuestas de las combinaciones de cada grupo.

Combinaciones	grupo 1	grupo 2	grupo 3	grupo 4
L	0.8199			
A		0.850	0.9313	
If				
L If	0.8265			
L NC	0.8257			
A P		0.9415		
L Tc			0.9775	
A If			0.9574	
A S				0.9993
A P If	0.8202			

Tomando en cuenta el número de cuencas que comprende cada grupo, se seleccionaron las que están marcadas con azul, para competir con las que se obtuvieron a partir de los datos de 20 cuencas (ecuaciones globales), el resumen muestra los errores porcentuales de cada grupo con las combinaciones con mejor respuesta (tabla 20, 21, 22 y 23).

Grupo 1; la tabla 20 de las mejores combinaciones con sus respectivos errores porcentuales, se concluye con las siguientes expresiones (ecuación 5.33 y 5.34) con mejor respuesta en las combinaciones "L y L-If", dichas combinación en las estaciones TAPIJULALAPA, PICHUCALCO, ALMANDRO, PUYATENGO y SALTO DEL AGUA las respuestas de los errores están por debajo del 20%, TEAPA tiene comportamientos del 19 al 25 % de los errores, el caso de la estación MACUSPANA contempla los mayores errores del -57% al -62%.

$$QMI_{grupo\ 1-G} = 15.033689 * L^{0.933623} \quad (5.33)$$

$$QMI_{grupo\ 1-G} = 48.040282 * L^{0.90797793} * If^{-0.54739894} \quad (5.34)$$

Tabla 20. Valores del error porcentual del grupo 1, respuesta de los gasto (QMI) observados vs calculados, ecuaciones de interés finales.

Est. /GRUPO 1	Nombre	QMI observados m³/s	QMI calculados m³/s			
			L	L-NC	L-If	A-P-If
30031	PUYACATENGO	356.55	363.09	410.39	415.00	473.24
30032	TEAPA	813.17	653.64	603.94	602.42	533.88
30042	SALTO DE AGUA	1381.48	1333.46	1325.25	1324.30	1268.45
30055	MACUSPANA	611.66	995.40	967.47	964.73	998.73
30093	TAPIJULAPA	1549.77	1444.38	1476.46	1480.21	1393.80
30135	ALMANDRO	1036.73	1037.77	1039.01	1037.76	1153.29
30057	PICHUCALCO	700.51	590.60	601.40	600.02	587.55
Est. /GRUPO 1	Nombre	QMI observados m³/s	e%			
			L	L-NC	L-If	A-P-If
30031	PUYACATENGO	356.55	-1.84	-15.10	-16.39	-32.73
30032	TEAPA	813.17	19.62	25.73	25.92	34.35
30042	SALTO DE AGUA	1381.48	3.48	4.07	4.14	8.18
30055	MACUSPANA	611.66	-62.74	-58.17	-57.72	-63.28
30093	TAPIJULAPA	1549.77	6.80	4.73	4.49	10.06
30135	ALMANDRO	1036.73	-0.10	-0.22	-0.10	-11.24
30057	PICHUCALCO	700.51	15.69	14.15	14.34	16.12

Grupo 2; la tabla 21 muestra los resultados propios de las mejores combinaciones, observando que el comportamiento al mejor ajuste es A-P (ecuación 5.35), cabe mencionar que los errores porcentuales de la estación *BOMBANA* no concibe resultados favorables que determinen el comportamiento similar de lo observado, por lo que dicha ecuación tiene restricciones para cuencas pequeñas.

$$QMI_{grupo\ 2-G} = 6.48176E - 08 * A^{1.92885837} * p^{1.818562176} \quad (5.35)$$

Tabla 21. Valores del error porcentual del grupo 2, respuesta de los gasto (QMI) observados vs calculados, ecuaciones de interés finales.

Est./GRUPO 2	Nombre	QMI obser	QMI calc	
			If	A-P
30020	EL BOQUERON II	282.22	356.52	382.22
30071	SANTA MARIA	598.40	691.75	512.68
30072	LAS FLORES II	766.66	691.75	739.28
30212	STO DOMINGO	485.68	356.52	474.90
30156	BOMBANA	37.36	103.19	0.10
Est./GRUPO 2	Nombre	QMI obser	e%	
			If	A-P
30020	EL BOQUERON II	282.22	-26.33	-35.43
30071	SANTA MARIA	598.40	-15.60	14.32
30072	LAS FLORES II	766.66	9.77	3.57
30212	STO DOMINGO	485.68	26.59	2.22
30156	BOMBANA	37.36	-176.21	99.73

Grupo 3; la tabla 22 muestra la mejor respuesta en la combinación A-If donde los errores porcentuales están por debajo del 15 %, la estación *ARCO DE PIEDRA* presenta el mejor ajuste para dicha combinación sin embargo la confiabilidad de una sola variable representa mejor al grupo, en este caso la variable "A" en relación con los gastos observados, muestra compatibilidad en *BOCA DEL CERRO*, *ARCO DE PIEDRA* y *EL TIGRE* con errores del -10.4%, -29.4% y 12.9% respectivamente observando el mayor error en la estación *ARGELIA* del 32% sin embargo la diferencia de gastos es la menor del grupo (378 m³/s),

$$QMI_{grupo\ 3-G} = 0.3100994 * A^{0.9182248} \quad (5.36)$$

Tabla 22. Valores del error porcentual del grupo 3, respuesta de los gasto (QMI) observados vs calculados, ecuaciones de interés finales.

Est./ GRUPO 3	Nombre	QMI observados m ³ /s	QMI calculados m ³ /s		
			A	L-Tc	A-If
30019	BOCA DEL CERRO	5548.19	6129.26	5447.33	6137.14
30030	ARCO DE PIEDRA	1725.77	2234.49	2121.94	1778.34
30040	ARGELIA	1178.24	799.44	577.94	1317.01
30095	EL TIGRE	6244.49	5435.95	6253.18	5540.49
Est./ GRUPO 3	Nombre	QMI observados m ³ /s	e%		
			A	L-Tc	A-If
30019	BOCA DEL CERRO	5548.19	-10.47	1.82	-10.62
30030	ARCO DE PIEDRA	1725.77	-29.48	-22.96	-3.05
30040	ARGELIA	1178.24	32.15	50.95	-11.78
30095	EL TIGRE	6244.49	12.95	-0.14	11.27

En el caso del grupo 4 se obtuvo una ecuación que representa a dicho grupo (ecuación 5.36), los valores calculados en la tabla 23 se observan comportamientos aceptable del QMI calculados, por lo que se considera para su evaluación final.

$$QMI_{grupo\ 4-G} = 2.18608547 * A^{1.68126256} * S^{1.146798378} \quad (5.37)$$

Tabla 23. Valores del error porcentual grupo 4, combinación A-S.

Est./ GRUPO 4	Nombre	QMI observados m ³ /s	QMI calculados	e%
			A-S	
30066	TZIMBAC	489.7809143	496.5378029	-1.36
30070	SAYULA	1542.649217	1541.519842	0.07
30094	PLATANAR	218.9103125	195.2424542	12.12
30096	PAREDON	198.5305238	212.7270167	-6.67

Sin embargo hay que considerar criterios para evaluar cuencas para este grupo, debido se consideran 4 datos (QMI de las estaciones hidrométricas) para la obtención de la ecuación potencial.

5.2.4 Ecuaciones finales, de la Región hidrológica

Las evaluaciones correspondientes, representan las ecuaciones finales dentro de las evaluaciones, que se muestran en la tabla 24, donde se observan los valores del coeficiente de determinación de las mejores respuestas aunado a las comparaciones de sus respectivos QMI calculados.

Tabla 24. Ecuaciones finales, para los grupos homogéneos, con su respectivo coeficiente de determinación.

Mejores combinaciones			evaluación	ecuaciones	Coeficiente de determinación			
					grupo 1	grupo 2	grupo 3	grupo 4
A	L	If	global	5.18	0.7827			
A	P	If		5.19		0.9077	0.9453	
	A	If		5.20		0.8866	0.9538	
		L	grupál	5.33	0.8199			
		A		5.36			0.9313	
	L	If		5.34	0.8265			
	A	P		5.35		0.9415		
	A	S		5.37				0.9993

5.2.4.1 Grupo 1 Ecuaciones finales

La tabla 24 muestra que las ecuaciones finales, donde las ecuaciones 5.18, 5.33 y 5.34 corresponden al grupo 1, observando comportamientos mayormente estables del coeficiente de determinación en la evaluación grupál.

Observando los gastos calculados contra lo medidos en la tabla 25 y 26, el mayor error porcentual se ubica en la relación de la longitud del cauce principal (L) con un -62% en la estación *MACUSPANA* con relación a los QMI observados, sin embargo; en las demás estación tiene el mejor comportamiento con errores menores del 20%, concluyendo que es apta para su evaluación, el cual corresponde la ecuación 5.33 para el grupo 1, con la limitación de que para el cálculo del QMI con áreas que se encuentren cerca de la media (1619m³/s) se ocupara la ecuación 5.18 (A-L-If).

Tabla 25. Combinaciones finales del grupo 1, Gastos calculados.

Coeficiente de Variación	Est. /GRUPO 1	Nombre	Área de la cuenca km ²	QMI observados m ³ /s	Global m ³ /s	Grupál m ³ /s	
					A-L-If (5.18)	L (5.33)	L-If (5.34)
0.381	30031	PUYACATENGO	169	356.55	399.37	363.09	415
0.659	30032	TEAPA	476	813.17	252.27	653.64	602.42
0.233	30042	SALTO DE AGUA	2,876	1381.48	1311.34	1333.46	1324.3
0.334	30055	MACUSPANA	1,739	611.66	684.69	995.4	964.73
0.422	30093	TAPIJULAPA	3,219	1549.77	1737.24	1444.38	1480.21
0.387	30135	ALMANDRO	2,443	1036.73	844.04	1037.77	1037.76
0.350	30057	PICHUCALCO	411	700.51	678.76	590.6	600.02
<u>0.395</u>		<u>Media</u>	<u>1,619.00</u>	<u>921.41</u>			

Tabla 26. Combinaciones finales del grupo 1, errores porcentuales.

Est. /GRUPO 1	Nombre	Área de la cuenca km ²	QMI observados m ³ /s	Global e%	Grupal e%	
				A-L-If	L	L-If
30031	PUYACATENGO	169	356.55	-12.01	-1.84	-16.39
30032	TEAPA	476	813.17	68.98	19.62	25.92
30042	SALTO DE AGUA	2,876	1381.48	5.08	3.48	4.14
30055	MACUSPANA	1,739	611.66	-11.94	-62.74	-57.72
30093	TAPIJULAPA	3,219	1549.77	-12.1	6.8	4.49
30135	ALMANDRO	2,443	1036.73	18.59	-0.1	-0.1
30057	PICHUCALCO	411	700.51	3.1	15.69	14.34

Ecuaciones finales Grupo 1 correspondientes.

$$QMI_{grupo\ 1-G} = 15.033689 * L^{0.933623} \quad (5.33)$$

$$QMI_{global-grupo\ 1} = 39.5882 * A^{0.128286} * L^{1.640824} * If^{-2.294682} \quad (5.18)$$

5.2.4.2 Grupo 2, Ecuación final

Las ecuaciones 5.19, 5.20 y 5.35 (tabla 27 y 28) son las representativas para la evaluación final del grupo 2, observando los errores porcentuales (e%), donde la mejor combinación es A-If, con comportamientos estables en SANTA MARIA, LAS FLORES II Y STO DOMINGO, la estación EL BOQUERON II tiene el mayor error porcentual en un -72.08% y BOMBANA con un 58.2%, observando que en la primera corresponde a el menor CV y la segunda con la menor área del grupo, en las demás combinaciones (A-P-If y A-P) los errores porcentuales tienen más variaciones, tal es el caso de STA MARIA y LAS FLORES en la combinación A-P y A-P-If respectivamente.

Por lo que la ecuación final es 5.20 es la que representa al grupo.

$$QMI_{global-grupo2; grupo\ 3} = 179.9686 * A^{0.746151} * If^{-2.06621} \quad (5.20)$$

Tabla 27. Combinaciones finales del grupo 2, Gastos calculados.

Coeficiente de Variación	Est./GRUPO 2	Nombre	Área de la cuenca km ²	QMI obser m ³ /s	Global m ³ /s		Grupal m ³ /s
					A-P-If (5.19)	A-If (5.20)	A-P (5.32)
0.668	30020	EL BOQUERON II	1,870	282.22	428.16	485.65	382.22
0.958	30071	SANTA MARIA	1,958	598.40	585.77	623.07	512.68
1.976	30072	LAS FLORES II	2,551	766.66	677.87	759.05	739.28
1.791	30212	STO DOMINGO	1743	485.68	470.35	460.82	474.90
1.037	30156	BOMBANA	32	37.36	10.53	15.62	0.10
<u>1.286</u>		<u>Media</u>	<u>1,630.80</u>	<u>434.06</u>			

Tabla 28. Combinaciones finales del grupo 2, errores porcentuales.

Est./GRUPO 2	Nombre	Área de la cuenca km ²	QMI obser m ³ /s	Global e%		Grupal e%
				A-P-If	A-If	A-P
30020	EL BOQUERON II	1,870	282.22	-51.71	-72.08	-35.43
30071	SANTA MARIA	1,958	598.40	2.11	-4.12	14.32
30072	LAS FLORES II	2,551	766.66	11.58	0.99	3.57
30212	STO DOMINGO	1743	485.68	3.16	5.12	2.22
30156	BOMBANA	32	37.36	71.81	58.20	99.73

Dentro de las restricciones del uso de la ecuación 5.20 deben considerarse, áreas de cuenca y CV similares al promedio del grupo para una mayor confiabilidad del gasto de diseño.

5.2.4.3 Grupo 3, Ecuación final

Las ecuaciones 5.19, 5.20 y 5.36 son las que mejor representan al grupo 3, obteniendo errores porcentuales que oscilan entre el 9.10% y 31.7 %, la ecuación que representa mejor al grupo es A-If, observando buenos comportamientos en las estaciones BOCA DEL CERRO, ARGELIA y EL TIGRE, en caso de ARCO PIEDRA corresponde al -25.25%.

Tabla 29. Combinaciones finales del grupo 3, Gastos calculados.

Coeficiente de Variación	Est./GRUPO 3	Nombre	Área de la cuenca km ²	QMI obser m ³ /s	Global m ³ /s		Grupal m ³ /s
					A-P-If (5.19)	A-If (5.20)	A (5.36)
0.213	30019	BOCA DEL CERRO	47,697	5548.19	6063.75	6053.00	6129.26
0.221	30030	ARCO DE PIEDRA	15,894	1725.77	2273.17	2161.61	2234.49
0.292	30040	ARGELIA	5,189	1178.24	1192.93	1289.33	799.44
0.142	30095	EL TIGRE	41,852	6244.49	5460.42	5490.45	5435.95
<u>0.217</u>		<u>Media</u>	<u>27,658.00</u>	<u>3,674.17</u>			

Tabla 30. Combinaciones finales del grupo 3, errores porcentuales.

Est./GRUPO 3	Nombre	Área de la cuenca km ²	QMI obser	Global e%		Grupal e%
				A-P-If	A-If	A
30019	BOCA DEL CERRO	47,697	5548.19	-9.29	-9.10	-10.47
30030	ARCO DE PIEDRA	15,894	1725.77	-31.72	-25.25	-29.48
30040	ARGELIA	5,189	1178.24	-1.25	-9.43	32.15
30095	EL TIGRE	41,852	6244.49	12.56	12.08	12.95

Ecuación final del grupo 3.

$$QMI_{global-grupo2; grupo3} = 179.9686 * A^{0.746151} * If^{-2.06621} \quad (5.20)$$

5.2.4.4 Grupo 4, Ecuación final

En el grupo 4 solo se tuvo una respuesta aceptable de las combinaciones realizadas (A-S), debido a ellos se tienen ciertas restricciones, por lo que es conveniente realizar análisis de la información, dicho grupo tienen la característica que contempla las menores áreas de cuenca de la región hidrológica, entre las restricciones es realizar evaluaciones empíricas en sitio. Sin embargo la ecuación mostrada (5.37) proporciona una aproximación aceptable.

Tabla 31. Combinación Final del grupo 4 gastos calculados y errores porcentuales.

Coeficiente de Variación	Est./ GRUPO 4	Nombre	Área de la cuenca km ²	QMI observados	QMI calculados	e%
					A-S (5.37)	
0.475	30066	TZIMBAC	200	489.78	496.54	-1.36
0.462	30070	SAYULA	410	1542.65	1541.52	0.07
0.266	30094	PLATANAR	216	218.91	195.24	12.12
0.339	30096	PAREDON	330	198.53	212.73	-6.67

Ecuación final del grupo 4.

$$QMI_{grupo\ 4-G} = 2.18608547 * A^{1.68126256} * S^{1.146798378} \quad (5.37)$$

Capítulo 6

Caso de estudio, recomendaciones y conclusiones.

6.1 Caso de estudio

Las siguientes ecuaciones dan una aproximación de los valores del promedio de los gastos máximos anuales en la RH 30.

Grupo 1:

$$QMI_{grupo\ 1-G} = 15.033689 * L^{0.933623} \quad (5.33)$$

$$QMI_{global-grupo\ 1} = 39.5882 * A^{0.128286} * L^{1.640824} * I f^{-2.294682} \quad (5.18)$$

Grupo 2 y 3:

$$QMI_{global-grupo2; grupo\ 3} = 179.9686 * A^{0.746151} * I f^{-2.06621} \quad (5.20)$$

Grupo 4:

$$QMI_{grupo\ 4-G} = 2.18608547 * A^{1.68126256} * S^{1.146798378} \quad (5.37)$$

Para valorar la confiabilidad de los modelos matemáticos la comprobación se hace mediante el análisis de algunas estaciones en zonas donde no se tiene suficiente información de gastos máximos instantáneos anuales.

Para de uso de las ecuaciones en los casos de estudio se tiene el siguiente procedimiento.

- Ubicación de la estación hidrométrica de la provincia fisiográfica a la que pertenece y obtención de las características fisiográficas de interés (VF).
- Sustitución de los valores en la ecuación del grupo o zona a la que pertenece, obteniendo el gasto de diseño.
- Obtención del gasto para el diseño de avenidas, multiplicando por el factor correspondiente para diferentes periodos de retorno según sea el caso.

En la comparación, se recopila la información de las media de los gastos máximos instantáneos de la estación seleccionada en el registro de BANDAS (valores entre 5 a 19 datos) y el escurrimiento en la sustitución de las VF de la ecuación correspondiente, realizando una comparación del QMI observado contra el QMI calculado.

Para ejemplificar se usan dos casos de estudios, las estaciones 30097 y 30053 del grupo 3 y 2 respectivamente (ver figura 42). Por lo que se utiliza la ecuación 5.20 y las variables fisiográficas, área de la cuenca drenada (A) y la infiltración potencial máxima (If) para ambos casos.

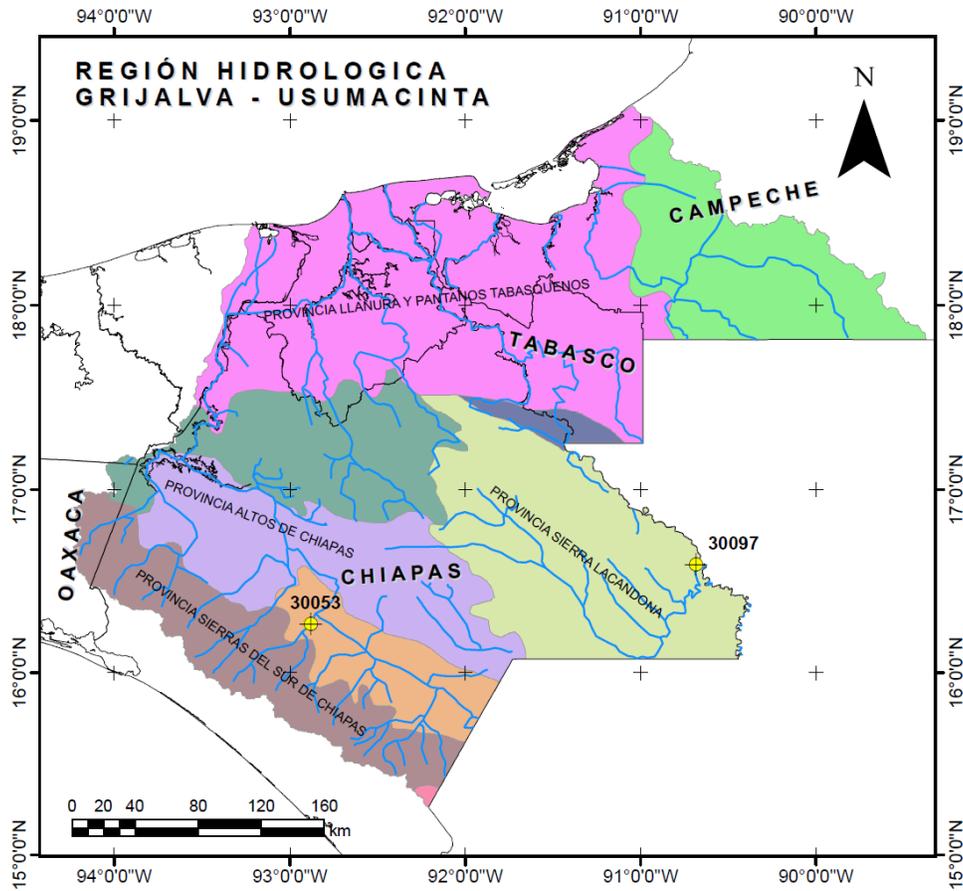


Figura 42. Estaciones 30053 y 30097, casos de estudio.

La información correspondiente a dichas estaciones se muestra en la tabla 32.

Tabla 32. Valores estadísticos, infiltración potencial máxima (I_f) y área de la cuenca drenada (A) de las estaciones seleccionadas.

	Grupo 2	Grupo 3
	STA ISABEL	AGUA VERDE
Estación	30053	30097
Min [m^3/s]	400.50	3577.30
Max [m^3/s]	1405.00	5520.00
Media [m^3/s]	825.71	4143.86
desv	313.81	785.86
CV	0.38	0.19
I_f [cm]	7.50	7.50
A [km]	1873.00	17483.00

Ocupando la media de los gastos máximos que corresponden a 825.7 y 4143.8 [m^3/s] de las estaciones 30053 y 30097 respectivamente, se obtiene mediante la ecuación 5.20 el QMI calculado del grupo 2 y 3, obteniendo valores cercanos con errores del 31% al 38% , (tabla 33).

Tabla 33. Valores del gasto de diseño con la ecuación 5.20 y la relación de gasto observados contra los medidos.

Est.	30053	30097
QMI observ	825.71	4143.86
QMI calc	597.96	3166.02
QMI obser/QMI cal.	1.38	1.31

La información obtenida en los casos de estudios representan una aproximación confiable debido a que en el análisis de las ecuaciones finales los errores porcentuales oscilan entre el 9% y 25% para el grupo 3 y en el grupo 2 del 1% al 70%. Comprobando que existe una respuesta confiable en los QMI calculados. Usando los factores extrapolados para diferentes periodos de retorno, en cada caso de estudio se tiene.

Tabla 34. QMI observados contra QMI calculados, de las estaciones 30053 y 30097.

GRUPOS	QMI obs	QMI cal	QMI obs	QMI cal
Tr [años]	30053	30053	30097	30097
2	578.00	418.57	4019.54	3071.04
5	1040.39	753.43	4765.44	3640.92
10	1428.48	1034.47	5304.14	4052.51
20	2097.30	1518.82	5801.40	4432.43
50	5251.52	3803.03	6464.42	4938.99
100	7373.59	5339.78	6920.25	5287.25
200	9297.49	6733.03	7417.51	5667.18
500	11725.08	8491.03	8039.09	6142.08
1000	13525.13	9794.58	8536.35	6522.00
2000	15300.41	11080.20	8992.18	6870.26
5000	17628.91	12766.45	9655.19	7376.83
10000	19379.41	14034.12	10111.02	7725.09

Dicha información corresponde a los valores de los QMI de diseño para diferentes periodos de retorno según sea el caso en el diseño de avenidas, cabe mencionar que los valores son menores a 20 datos, dichas estaciones no se hacen uso para la evaluación de las regiones o grupos homogéneos en la etapa primaria del capítulo 5.

6.2 Recomendaciones

Las ecuaciones son válidas para aproximar los gastos de diseño; entre los puntos a destacar se consideran los siguientes.

- Las ecuaciones son válidas para aquellas cuencas ubicadas en zonas de las provincias fisiográficas analizadas según sea el caso en la región hidrológica 30, sin embargo, en provincias fisiográficas como; Karst y Lomeríos de Campeche así como parte de las Llanuras y pantanos Tabasqueños donde mayormente sea planicie y no tenga aportaciones de la sierra norte de Chiapas y Sierra Lacandona no es apta para su evaluación, debido a que muchos de los ríos dependen de las fluctuación aguas arriba del cauce, tal es el caso de las hidroeléctricas del Grijalva, considerando que parte de dicha provincias, la planicie del lugar afecta a la región

con pendientes muy pequeñas y cauces muy grandes aunado a que no existe suficiente información hidrométrica, por lo que no se consideran aptos para la evaluación de los gastos de diseño.

- Se considera conveniente actualizar cada 5 a 10 años los valores de los gasto máximos instantáneos anuales por lo que se debe de replantear nuevas constantes en las ecuaciones finales.
- La ecuación del grupo 4, es la que menor errores porcentuales obtuvo con respecto a lo datos de los QMI observados oscilando por debajo del 12%, sin embargo al regionalizar solo se consideraron 4 estaciones hidrométricas en la ecuación final, permitiendo que existan comportamiento alejados, para evitar que los errores sean mayores se considera un análisis de la información en campo.
- Las grupos 1, 2 y 3 tienen mayor estabilidad para obtener resultados confiables, sin embargo, hay que considerar cierto criterio para obtener los gastos de diseño, entre ellos es considerar que existen errores porcentuales al evaluar las ecuaciones correspondiente a cada grupo, en la siguiente tabla se muestran los rangos de errores.

Tabla 35. Error porcentual de los QMI anuales calculados con las ecuaciones regionales.

	ECUACIÓN	RANGO e%
grupo 1	5.33	1 al 62
	5.18	3 al 68
grupo 2	5.20	1 al 72
grupo 3	5.20	10 al 25
grupo 4	5.37	0.1 al 12

La determinación de los gastos de diseño en el grupo 1, serán válidos para aquellas cuencas que se encuentre ubicadas en la sierra norte de Chiapas y que los escurrimientos se dirijan hacia las llanuras y pantanos Tabasqueños sin que se unan al río Grijalva. Esto permite obtener resultados confiables para el cálculo de los gastos de diseño.

El Grupo 2 y 3, la ecuación es global, por lo que se consideran aquellas cuencas que aporten al Río Grijalva y Usumacinta, considerando que las provincias fisiográficas deben ser aquellas que se ubican en la zona Sur de la región hidrométrica tal como; depresión central de Chiapas, altos de Chiapas, sierra lacandona y sierra sur de Chipas, con la restricción para cuencas pequeñas menores a 1500km², debido a que se encuentran en zonas donde las cuencas son de mayor amplitud en toda la región hidrológica, por tal motivo los errores se elevan en un 72% en el grupo 2, ya que la estación *BOMBANA* tan solo tiene un área de cuenca de 32 km².

6.3 Conclusiones finales

La variabilidad de la información dentro de la región hidrológica 30, muestra cierta compatibilidad al usar un método de regionalización por la delimitación de las provincias fisiográficas facilitando el análisis. Sin embargo no se llega a un cálculo con muy buena resolución en la evaluación de los gastos con relación a las características o variables

fisiográficas (VF), por lo que siendo una de las regiones de mayor importancia en el país, solo se consideran solo 20 estaciones de las más de 150 existente en dicha región.

En estudios de regionalización tal como Guzmán (2015) hacen mención de la variable Volumen de escurrimiento (V), que implica la multiplicación del área de la cuenca drenada (A) por la precipitación media máxima anual (P), en el presente análisis no se considera debido a que en algunos casos las agrupaciones solo contienen 4 estaciones hidrométricas, esto quiere decir que solo son 4 datos del gasto máximo instantáneo anual, permitiendo que la optimización se vea obligada a utilizar la menor cantidad de variables fisiográficas para obtener resultados satisfactorios por lo que en algunos grupos no se consideran combinaciones de 3 o más variables, tal es el caso del grupo 3 y 4.

Se ha demostrado en trabajos de regionalización Alcalá (2016), Guzmán (2015) que existe una relación entre la precipitación (P) y el área de la cuenca (A) en la obtención de los gasto de diseño, por lo que en ambos estudios realizan la combinación de dichas variables. Para la región de estudio las variables predominantes son área de la cuenca drenada (A), infiltración potencial máxima (If) y longitud del cauce principal (L), esto corresponde a que existe relación entre el tipo de suelo y área de la cuenca que a su vez, depende mucho de la longitud del cauce principal.

En estudios preliminares, Guzmán (2015) utiliza la ecuación regional 6.01, calcula la media de los gasto máximo instantáneo (QMI) de la región hidrológica de estudio con una relación confiable sobre los valores observados ($R^2 = 0.94$), utilizando algoritmos genéticos. Al considerar y comparar los errores porcentuales que se obtienen con dicha ecuación contra las ecuaciones obtenidas del presente estudio, se observa en la tabla 35 que son mayores en su mayoría, por lo que, las ecuaciones del presente análisis son de mayor confiabilidad.

$$QMI_{Guzman-RH30} = 3.6623 * V^{0.8805} * tc^{0.1621} * If^{-2.9502} \quad (6.01)$$

Tabla 36. Valores de los errores porcentuales de los gastos de diseño de los estudios de Domínguez y Guzmán (2015) y el presente análisis.

GRUPO	Estación	Nombre	Media QMI [m³/s]	Guzmán QMI [m³/s]	Guzmán %e	RH-30 [m³/s]	RH-30 %e	Área de la C. [km²]
1	30031	PUYACATENGO	356.545	218.582	38.694	399.370	12.011	169
	30032	TEAPA	813.168	238.352	70.688	252.270	68.977	476
	30042	SALTO DE AGUA	1381.479	1202.957	12.923	1311.340	5.077	2,876
	30055	MACUSPANA	611.662	938.085	53.367	684.690	11.939	1,739
	30057	PICHUCALCO	700.508	339.841	51.486	678.760	3.105	411
	30093	TAPIJULAPA	1549.768	1916.728	23.678	1737.240	12.097	3,219
	30135	ALMANDRO	1036.733	766.042	26.110	844.040	18.587	2,443
2	30020	EL BOQUERON II	282.219	309.235	9.573	485.650	72.083	1,870
	30071	SANTA MARIA	598.397	476.644	20.346	623.070	4.123	1,958
	30072	LAS FLORES II	766.655	585.452	23.636	759.050	0.992	2,551
	30156	BOMBANA	37.361	355.827	852.403	460.820	1133.425	1743
	30212	STO DOMINGO	485.68	2.567	99.471	15.620	96.784	32

3	30019	BOCA DEL CERRO	5548.186	6754.493	21.742	6053.000	9.099	47,697
	30030	ARCO DE PIEDRA	1725.773	1865.171	8.077	2161.610	25.255	15,894
	30040	ARGELIA	1178.243	1119.597	4.977	1289.330	9.428	5,189
	30095	EL TIGRE	6244.49	5942.771	4.832	5490.450	12.075	41,852
4	30066	TZIMBAC	489.781	97.246	80.145	496.540	1.380	200
	30070	SAYULA	1402.627	186.123	86.730	1541.520	9.902	410
	30094	PLATANAR	218.91	270.911	23.755	195.240	10.813	216
	30096	PAREDON	198.531	659.162	232.020	212.730	7.152	330

Las fluctuaciones de los escurrimientos registrados en regiones costeras o de eventos ciclónicos permiten observar que mucha de la información hidrométrica tiene comportamientos poco constantes en la serie temporal, es por ello que en dichas regiones las mejores funciones de distribución de los grupos formados se ajusta a las de dos poblaciones tal como, los grupos 1, 2 y 4. En el grupo 3, las áreas de las cuencas son las de mayor amplitud en la región de estudio, esto permite que la distribución de los escurrimientos se torne más estable, reflejando coeficientes de determinación menores.

Bibliografía

Alcalá V., Domínguez R., 2016, Tesis "Estimación regional de gasto de diseño; aplicación a la región hidrológica 27, 28 y 29 de la república Mexicana", Tesis M.I., Universidad Nacional autónoma de México, Fac. De Ingeniería, Posgrado de Ingeniería, México.

Aparicio M., 1987, Fundamentos de hidrología de superficie, edición 2015, Escurrimiento, Relación lluvia escurrimiento, Probabilidad y Estadística en hidrología., Editorial LIMUSA, 27-46, 203-282.

Chávez J. Ariadna del socorro, 2009, aplicación de regionalización para la determinación de caudales en el puente Carrasquillo, Tesis M.I., Universidad de Piura, Fac. De Ingeniería, 87-112.

Chow, 1994, Chow V. T. , Maidment D. R., Mays L . W., "Hidrología aplicada", Editorial Mc Graw Hill, Mexico.

Burnash, R.J.C.; Ferral, R.L. and McGuire, R.A., 1973, A Generalized Streamflow Simulation System: Conceptual Modelling for Digital Computers U.S. Department of Commerce, California.

Carabias Lillo, Julia (1999), Programa de manejo - Reserva de la biósfera La Sepultura, México .Consultado el 18 de febrero de 2009, México.

Cervantes-Zamora et al. 1990, Provincias Fisiográficas de México escala 1:4 000 000, En: Clasificación de regiones naturales de México 1, Tomo II, Sección IV, 10.1 Atlas nacional de México (1990-1992). Instituto de geografía México.

Crawford, N.A. and R.K. Linsley, 1966, Digital Simulation in hydrology; the Stanford Watershed Simulation Model IV. Technical Report no. 39. Department of Civil Engineering, Stanford University. Stanford. Calif.

CONABIO, 2016, Portal de geoinformación, Sistema nacional de Información sobre la biodiversidad, provincias fisiográficas de México, México.

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, 2014, Consejo de Cuenca de los Ríos Grijalva y Usumacinta, "programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía en el consejo de cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta", México.

CONAGUA, Comisión Nacional del agua, 2006, Estadística del agua en México edición 2006, sistema nacional de la información sobre, cantidad, calidad, usos y conservación del agua (SINA), ISBN 968-817-758-758-X, 28-29.

Diario Oficial de la federación DOF,2009, Acuerdo por el que se da a conocer los estudios técnicos de aguas nacionales Superficiales de las subregiones hidrológicas alto Grijalva, medio Grijalva y Bajo Grijalva de la región hidrológica, No. 30 GRIJALVA-USUMACINTA. (http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5141106), 1-21.

Domínguez R., Arganis J., et. al., 2008, Manual del Modelo para Pronósticos de escurrimientos, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

Domínguez R., Gracia Sanchez J., Carrizosa Eliseo, Esquivel Gabriela, Arganis Maritza, 2015, Instituto de Ingeniería (II), Manual de Diseño de Obras Civiles Cap. A.1.4 Perdidas Sección A: Hidrotecnia, Tema 1 de Hidrología, México.

Dominguez R.,1983, Design floods for mixed urban/rural catchments, Universidad Nacional autonoma de México, report No. IT 221, hydraulics research station, Wallingford England, United Kingdom.

Escalante Sandoval C., Lilia R., 2008, Técnicas Estadísticas en hidrología, Universidad Nacional Autónoma de México, Faculta De Ingeniería, Departamento de Ingeniería Hidráulica, México.

Estrela Teodoro M., Francisco Cabezas C-R., Ferico E.,1999, La Evaluación de los recursos hídricos en el libro banco del agua en España, Ingeniería del agua. Vol. 6, Num 2, 125-138.

Galván Andrés, Domínguez R., 2011, tesis “Construcción de mapas de precipitación máxima diarias. Aplicación a algunos estados de la república Mexicana, Instituto de Ingeniería UNAM, México.

Guzmán H y Domínguez R, 2015, Tesis “Regionalización de datos de escurrimiento de las regiones hidrológicas de México para la estimación de avenidas de diseño”, Tesis M.I., Universidad Nacional autónoma de México, Fac. De Ingeniería, Posgrado de Ingeniería, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2017, Recursos Naturales, fisiografía, carta fisiográfica, antecedentes y clasificación fisiográfica, www.inegi.org.mx

Jiménez, E. M. 1996. Programa Ax.exe, Área De Riesgos Hidrometeorológicos. Centro Nacional de Prevención y Desastres, México.

Sutcliffe, 1975, Methods Flood estimation, A guide to the flood studies report, Institute of Hydrology Crowmarsh Gifford, Wallingford, Oxfordshire OX 10 8BB, United Kingdom.

Landson Leo, Waren A D., Jain A. y Ratner M., 1978, Design and Testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS).US.

Marshall & A C Bayliss, 1994, Flod estimation for small catchments, report No. 124, Institute of Hydrology Crowmarsh Gifford, Wallingford, Oxfordshire OX 10 8BB, United Kingdom.

Martínez Rodríguez Elena, 2005, Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal, Real centro universitario, España, Anuario Jurídico y Económico Escorialense, X X X V I I I (2005) 315-332.

Mills Paul, oliver Nicholson and Duncan Reed, Flood Studies update- Technical Research report, Physical Catchment Descriptors, Volume IV, reports Compass Informatics, DWR consults and OPW.

Morales María Esther Fajardo, 2007, Un repaso a la regionalización y el regionalismo: Los primeros procesos de integración regional en América Latina, Regionalización y regionalismo, CONfines. ISSN: 1870-3569. 65-69.

Naden, P. & Polarsid, M., 1990. Derivation of river network variables from digitised data and their use in flood estimation. Report to MAFF, Institute of Hydrology, Wallingford, United Kingdom.

Pilar T. Andrea Gallardo, Gabriel A. Peñaranda, 2006, “Regionalización de caudales mínimos por métodos estadísticos de la cuenca Magdalena Cauca”, Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería ambiental y sanitaria, Bogotá D.C.

Secretaria de recursos hidráulicos, 1971, boletín hidrológico, región hidrológica No 30 Grijalva – Usumacinta, datos hidrométricos de corrientes, material de acarreo de suspensión e hidrométricos de vasos, datos hasta diciembre de 1971. subsecretaria de planeación dirección general de estudios, dirección de hidrología, México.

Steel, R. G. D. and Torrie, J.H., Principles and Procedures of Statistics with Special reference to the biological Sciences., McGraw Hill, 1960, pp. 187,287

Tucci, Carlos E; 2002, Regionalización de caudales. Brasil.

Yohhan Alfredo, 2013, Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Maipo mediante la aplicación del software “cold Region hydrological model”, Tesis L.G., Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Pregrado, Geografía.