



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**OBTENCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA MEDIA ANUAL EN LA
CUENCA DEL RÍO TUXPAN, MEDIANTE LA NOM-011-CONAGUA-2015
Y EL MODELO HIDROLÓGICO HBV**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JOSÉ LUIS GONZÁLEZ MENDOZA

DIRECTOR DE TESIS

SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

DOCTORA EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

CO-DIRECTOR DE TESIS

LILIANA GARCÍA ROMERO

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Morelia, Michoacán, noviembre de 2016

A mis padres José Luis y Jaquelin

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por regalarme el don de la vida, la salud y la inteligencia.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, mi alma máter.

A la Facultad de Ingeniería Civil, por formarme como profesionalista y por el invaluable apoyo y sabiduría que me ha brindado.

A la Dra. Sonia Tatiana Quispe, por haber sido un apoyo incondicional como tutora, por hacer de mí un profesional, por todas sus atenciones, la dedicación prestada, la motivación y los consejos.

A la Maestra Liliana García Romero por regalarme un gran aprendizaje, por su amistad, su asesoría, su disposición, tiempo y apoyo incondicional.

A todos los profesores que me impartieron clases durante mi carrera profesional, por cada conocimiento transmitido y motivarme a alcanzar metas.

A mis padres por haber sido un ancla en todo momento, apoyarme con sus consejos, darme todo su amor y su apoyo incondicional, por regalarme la oportunidad de crecer profesionalmente y creer en mí siempre.

A mi hermana Yarazén, por ser un ejemplo de vida, por apoyarme, protegerme y cuidarme siempre; a mi hermano Jesús, por enseñarme a seguir sueños y no darse por vencido nunca; a mi hermana Jacqueline por iluminar mi camino con su alegría, su cariño y su eterna amistad.

A mis tíos por ser siempre un ejemplo de rectitud y trabajo constante, a mis primos por impulsarme a ser un ejemplo para todos ellos.

A mis amigos, Jesús Alberto quien ha sido un apoyo desde mi niñez y una motivación para ser mejor siempre; a Adalid Ávila y Luis Lescas quienes con sus bromas, risas y su singular alegría hicieron esta etapa más amena.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ESTADO DEL ARTE	4
2.1	Modelos hidrológicos.....	5
2.1.1	Clasificación.....	7
2.1.1.1	Naturaleza de los algoritmos empleados.....	7
2.1.1.1.1	Modelos empíricos.....	7
2.1.1.1.2	Modelos de base física	7
2.1.1.1.3	Modelos conceptuales	8
2.1.1.2	Técnicas involucradas en el proceso de modelamiento	8
2.1.1.2.1	Modelos determinísticos.....	8
2.1.1.2.2	Modelos estocásticos.....	8
2.1.1.3	Representación espacial.....	8
2.1.1.3.1	Modelos agregados.....	8
2.1.1.3.2	Modelos distribuidos.....	9
2.1.1.3.3	Modelos semi-distribuidos.....	9
2.1.1.4	Escala temporal	10
2.1.1.4.1	Basado en eventos	10
2.1.1.4.2	Proceso continuo	10
2.2	Modelos lluvia-escurrimiento	10
2.2.1	Modelo del método Racional	10
2.2.2	Modelo SHE	11
2.2.3	Modelo de Témez.....	11
2.2.4	Modelo Sacramento	12
2.2.5	Modelo GR4J	12

2.2.6	Modelo GR2M	13
2.2.7	Modelo HBV	13
2.3	Modelación hidrológica.....	15
2.3.1	Calentamiento	15
2.3.2	Calibración.....	15
2.3.3	Validación.....	16
2.4	NOM-011-CONAGUA-2015	16
2.5	Selección de modelos y herramientas	17
3.	ANTECEDENTES	19
4.	OBJETIVOS	25
4.1	General.....	25
4.2	Particulares.....	25
5.	HIPÓTESIS.....	26
6.	JUSTIFICACIÓN.....	27
7.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
7.1	Análisis y caracterización de la zona en estudio	29
7.2	Recopilación de datos e información.....	29
7.2.1	Método de Thornthwaite.....	30
7.3	Consistencia de datos.....	31
7.3.1	Test de Helmert.....	31
7.3.2	Prueba de las Secuencias	32
7.3.3	Prueba t de Student	32
7.3.4	Prueba de Anderson.....	33
7.4	Deducción de datos faltantes de precipitación.....	34
7.4.1	Método del inverso de la distancia al cuadrado	34
7.5	Norma Oficial Mexicana 011-CONAGUA-2015	35

7.5.1	Precipitación anual en la cuenca.....	35
7.5.2	Coeficiente de escurrimiento.....	35
7.5.2.1	Parámetro K.....	36
7.5.3	Metodologías de aplicación NOM-011-CONAGUA-2015.....	40
7.5.3.1	Homogenización mediante isolíneas de coeficiente de escurrimiento y precipitación. 40	
7.5.3.2	Rasterización del coeficiente de escurrimiento.....	41
7.5.3.3	Polígonos de Thiessen.....	42
7.6	Modelo hidrológico HBV.....	43
7.6.1	Rutinas del modelo HBV.....	43
7.6.1.1	Módulo de humedad del suelo.....	43
7.6.1.2	Módulo de evapotranspiración.....	44
7.6.1.3	Balance de humedad en el suelo.....	44
7.6.1.4	Cálculo del escurrimiento subsuperficial.....	45
7.6.1.5	Cálculo del balance y el escurrimiento subterráneo.....	45
7.6.1.6	Cálculo del escurrimiento total.....	46
7.6.2	Herramienta de modelación EVALHID.....	47
7.6.3	Calibración del modelo.....	49
7.6.3.1	Algoritmo de calibración SCE-UA.....	49
7.6.4	Validación del modelo.....	51
7.7	Análisis de resultados.....	52
8.	RESULTADOS.....	54
8.1.	Caracterización de la zona de estudio.....	54
8.2.	Información meteorológica.....	62
8.2.1.	Selección de estaciones principales.....	62
8.2.2.	Homogeneidad o consistencia de datos.....	64

8.2.3.	Independencia de las series de precipitación	66
8.2.4.	Estimación de datos faltantes de las series de precipitación.....	67
8.2.5.	Estimación de datos faltantes en las series de temperatura	69
8.2.6.	Evapotranspiración.....	69
8.3.	Información hidrométrica o de gasto	70
8.4.	Modelación hidrológica.....	71
8.4.1.	Modelación hidrológica con la NOM-011-CONAGUA-2015.....	71
8.4.1.1.	Obtención del parámetro K.....	71
8.4.1.2.	Homogenización mediante isolíneas.....	76
8.4.1.3.	Rasterización de coeficiente de escurrimiento	80
8.4.1.4.	Polígonos de Thiessen	83
8.4.1.5.	Resumen resultados NOM-011-CONAGUA-2015.....	85
8.4.2.	Modelación hidrológica con HBV	85
8.4.2.1.	Calentamiento.....	88
8.4.2.2.	Calibración.....	88
8.4.2.2.1.	Zona 18460.....	89
8.4.2.2.2.	Zona 18459.....	91
8.4.2.2.3.	Zona La Sabaneta y Pucuató	93
8.4.2.2.4.	Zona Mata de Pinos (Agostitlán)	95
8.4.2.3.	Validación	98
8.4.2.4.	Disponibilidad hídrica media anual	98
8.5.	Resumen disponibilidad hídrica media anual	101
9.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	104
9.1.	Análisis NOM-011-CONAGUA-2015	104
9.2.	Análisis del modelo hidrológico HBV	105
9.3.	Análisis en conjunto	106

9.4. Análisis en otro sitio	107
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110
11. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	113
12. BIBLIOGRAFÍA.....	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 7.1. Valores de K_a	30
Tabla 7.2. Rango del número de Secuencias (u) para un registro homogéneo.	32
Tabla 7.3. Valores de K	36
Tabla 7.4. Parámetros del modelo lluvia-escorrentamiento HBV	46
Tabla 7.5. Indicadores de ajuste, Fuente: Moriasi et. al., 2007	52
Tabla 8.1. Datos principales de las estaciones meteorológicas	63
Tabla 8.2. Resultados Secuencias y Helmert para la estación 16002.....	64
Tabla 8.3. Resultados T student para la estación 16002	65
Tabla 8.4. Resultados pruebas de homogeneidad para estaciones meteorológicas	65
Tabla 8.5. Resultados independencia de las series de precipitación mediante los Límites de Anderson	66
Tabla 8.6 Matriz de Correlación de las estaciones principales	68
Tabla 8.7 Precipitación media mensual y media anual de las estaciones principales	68
Tabla 8.8 Temperaturas medias mensuales de las estaciones principales	69
Tabla 8.9 Evapotranspiración potencial promedio mensual para las estaciones principales por Thornthwaite	70
Tabla 8.10 Disponibilidad hídrica anual mediante la homogenización con isolíneas (1952-2010).....	79
Tabla 8.11 Disponibilidad hídrica anual mediante la rasterización del coeficiente de escorrentamiento (1952-2010).....	82
Tabla 8.12 Influencia de los polígonos de Thiessen sobre la cuenca	83
Tabla 8.13 Disponibilidad hídrica anual mediante polígonos de Thiessen (1952-2010)	84

Tabla 8.14 Superficie de las microcuencas y coordenadas de las estaciones ficticias (Zona 18460).....	89
Tabla 8.15 Superficie de las microcuencas y coordenadas de las estaciones ficticias (Zona 18459).....	91
Tabla 8.16 Superficie de la microcuenca y coordenada de la estación ficticia (Zona La Sabaneta y Pucuato).....	93
Tabla 8.17 Superficie de la microcuenca y coordenada de la estación ficticia (Zona Mata de Pinos, Agostitlán).....	95
Tabla 8.18 Periodos de calibración.....	97
Tabla 8.19 Valor alcanzado por las funciones objetivo en la etapa de calibración	97
Tabla 8.20 Resultados de los parámetros para el modelo HBV	97
Tabla 8.21 Valores de los indicadores de ajuste de Moriasi et al. 2007	98
Tabla 8.22 Clasificación de rendimiento de los indicadores de ajuste de Moriasi	98
Tabla 8.23 Disponibilidad hídrica media anual por subcuencas de modelación mediante HBV	99
Tabla 8.24 Resumen de disponibilidad hídrica media anual NOM-011-CONAGUA-2015 y HBV	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema general del modelo HBV.	14
Figura 7.1. Ejemplo de mapa de usos de suelo y vegetación.	37
Figura 7.2. Ejemplo de mapa de tipo de suelo de acuerdo a la clasificación NOM-011- CONAGUA-2015.	37
Figura 7.3. Mapa de USV ₁	38
Figura 7.4. Mapa de USV ₂	38
Figura 7.5. Mapa de USV ₃	38
Figura 7.6. Mapa de USV ₄	38
Figura 7.7. Mapa tipo de suelo en valores	38
Figura 7.8. Mapa USV ₁ x tipo de suelo	39
Figura 7.9. Mapa USV ₂ x tipo de suelo	39
Figura 7.10. Mapa USV ₃ x tipo de suelo	39
Figura 7.11. Mapa USV ₄ x tipo de suelo.....	39
Figura 7.12. Mapa de K.....	39
Figura 7.13. Isolíneas precipitación	40
Figura 7.14. Isolíneas coeficiente de escurrimiento.....	40
Figura 7.15. Mapa de K.....	41
Figura 7.16. Isolíneas precipitación	41
Figura 7.17. Mapa formato raster de coeficiente de escurrimiento.....	41
Figura 7.18. Polígonos de Thiessen	42
Figura 7.19. Procesos generales de la herramienta EVALHID	48
Figura 8.1. Localización de la cuenca por división política	55

Figura 8.2. Localización de la cuenca por región hidrológica.....	56
Figura 8.3. Zona de estudio: cuenca del Río Tuxpan, Michoacán	56
Figura 8.4. Relieve de la cuenca	57
Figura 8.5. Presas y cuerpos de agua	58
Figura 8.6. Red de drenaje de la cuenca	58
Figura 8.7. Relieve en la cuenca	59
Figura 8.8. Uso de suelo y vegetación de la cuenca.....	59
Figura 8.9. Tipo de suelo de la cuenca	60
Figura 8.10. Tipos de rocas.....	61
Figura 8.11. Climas en la cuenca	62
Figura 8.12. Estaciones meteorológicas.....	63
Figura 8.13. Autocorrelograma para la estación 16002.....	66
Figura 8.14 Estaciones hidrométricas.....	71
Figura 8.15 Uso de suelo y vegetación de la cuenca.....	72
Figura 8.16 Tipo de suelo de la cuenca de acuerdo a la NOM-011-CONAGUA-2015	72
Figura 8.17 Mapa de tipo de suelo con valores.....	74
Figura 8.18 Mapas binarios de uso de suelo y vegetación (USV).....	74
Figura 8.19 Mapas USV x tipo de suelo	75
Figura 8.20 Mapas con valores de K.....	75
Figura 8.21 Mapa del parámetro K en función del tipo y uso de suelo	76
Figura 8.22 Mapa de isolíneas de precipitación para el año 1952.....	77
Figura 8.23 Mapa de isolíneas de coeficiente de escurrimiento para el año 1952	77
Figura 8.24 Mapa de isolíneas de disponibilidad hídrica para el año 1952	78

Figura 8.25 Disponibilidad hídrica anual mediante la homogenización con isolíneas (1952-2010).....	79
Figura 8.26 Mapa de isolíneas de precipitación para el año 1980.....	80
Figura 8.27 Mapa de coeficiente de escurrimiento rasterizado para el año 1980	81
Figura 8.28 Mapa de disponibilidad hídrica (1980) mediante la rasterización del coeficiente de escurrimiento	81
Figura 8.29 Disponibilidad hídrica anual mediante la rasterización del coeficiente de escurrimiento (1952-2010).....	82
Figura 8.30 Polígonos de Thiessen	83
Figura 8.31 Disponibilidad hídrica anual mediante polígonos de Thiessen (1952-2010)	84
Figura 8.32 Resumen disponibilidad hídrica anual (1952-2010) métodos NOM-011-CONAGUA-2015.....	85
Figura 8.33 Microcuencas en la cuenca del río Tuxpan	86
Figura 8.34 Zonas de calibración	87
Figura 8.35 Estaciones ficticias.....	88
Figura 8.36 Zona de calibración 18460.....	89
Figura 8.37 Gráfico comparativo de caudal mensual entre EVALHID y el aforo 18460.....	90
Figura 8.38 Gráfico comparativo de caudal anual entre EVALHID y el aforo 18460.....	90
Figura 8.39 Gráfico comparativo de caudal medio mensual entre EVALHID y el aforo 18460.....	90
Figura 8.40 Zona de calibración 18459.....	91
Figura 8.41 Gráfico comparativo de caudal mensual entre EVALHID y el aforo 18459.....	92
Figura 8.42 Gráfico comparativo de caudal anual entre EVALHID y el aforo 18459.....	92
Figura 8.43 Gráfico comparativo de caudal medio mensual entre EVALHID y el aforo 18459.....	92
Figura 8.44 Zona de calibración La Sabaneta y Pucuató	93

Figura 8.45 Gráfico comparativo de caudal mensual entre EVALHID y el aforo La Sabaneta y Pucuato.....	94
Figura 8.46 Gráfico comparativo de caudal anual entre EVALHID y el aforo La Sabaneta y Pucuato.....	94
Figura 8.47 Gráfico comparativo de caudal medio mensual entre EVALHID y el aforo La Sabaneta y Pucuato	94
Figura 8.48 Zona de calibración Mata de Pinos (Agostitlán).....	95
Figura 8.49 Gráfico comparativo de caudal mensual entre EVALHID y el aforo Mata de Pinos (Agostitlán)	96
Figura 8.50 Gráfico comparativo de caudal anual entre EVALHID y el aforo Mata de Pinos (Agostitlán)	96
Figura 8.51 Gráfico comparativo de caudal medio mensual entre EVALHID y el aforo Mata de Pinos (Agostitlán).....	96
Figura 8.52 Resultados Disponibilidad hídrica media anual mediante HBV	100
Figura 8.53 Resumen de disponibilidad hídrica media anual NOM-011-CONAGUA-2015 y HBV	103
Figura 9.1 Resultados disponibilidad hídrica NOM-011-CONAGUA-2015	104
Figura 9.2 Resultados disponibilidad hídrica con HBV y caudales aforados	105
Figura 9.3 Disponibilidad hídrica media anual NOM-011-CONAGUA-2015 y HBV	106
Figura 9.4 Resultados NOM-011-CONAGUA-2015 y HBV cuenda del Río Tepalcatepec	107
Figura 9.5 Análisis de sensibilidad NOM-011-CONAGUA-2015.....	108
Figura 9.6 Resultados NOM-011-CONAGUA-2015 y HBV cuenca del Río Cajón	109

RESUMEN

La gestión de los recursos hídricos en México es un área en desarrollo, por ello es importante tener herramientas que permitan la correcta evaluación de la disponibilidad hídrica que se tiene en las cuencas, en nuestro país la NOM-011-CONAGUA-2015 es la que rige la metodología para obtener la cantidad de agua disponible para uso humano en cuencas no aforadas; esta norma usa un modelo hidrológico empírico, basado en variables como la precipitación, el área y un coeficiente de escurrimiento. En el mundo es cada vez más común el uso de modelos matemáticos para el cálculo de la relación precipitación-escurrimiento, por ello se busca la implementación de nuevas metodologías en nuestro país, que generen menos incertidumbre y que ayuden a controlar el déficit y excedente que genera la explotación del recurso. Debido a ello se decide utilizar el modelo hidrológico HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia en los años 70 para simulación de escurrimiento y predicción hidrológica. El objetivo general del trabajo será evaluar la metodología mexicana y el modelo HBV. La cuenca del río Tuxpan ubicada en el norte del estado de Michoacán, posee una superficie de 1 197km², pertenece a la región hidrológica Balsas, y es una de las que alimenta al sistema Cutzamala, la gestiona el “Consejo de Cuenca del Valle de México”, pero pertenece al “Organismo de Cuenca del Balsas”, la disponibilidad hídrica mediante la NOM-011-CONAGUA-2015 resulta el 44% de lo obtenido con el modelo HBV para un periodo histórico de 58 años (1952-2010).

ABSTRACT

The water resources management in Mexico is a developing area, therefore is important to have tools that allow the correct evaluation of the hydric resource availability in the basins. In our country the NOM-011-CONAGUA-2015 is the one that governs the methodology to get the water availability for human use in unknown capacity basins; this rule uses an empirical hydrological model, based on variables like precipitation, the area and a runoff coefficient. Nowadays the use of mathematic models is becoming more common to calculate the relation rainfall-run-off, therefore it's necessary to implement new methodologies in our country, that generates less uncertainty and help to control the deficit that generates the resource exploitation. Because of this is decided to use the hydrological model HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) developed by the Meteorological and Hydrological Institute of Sweden in the 70's for the simulation of the runoff and hydrological prediction. The overall objective of the work will be the evaluation of the Mexican methodology and the HBV model. River Tuxpan basin is located at north of the Michoacan state, has an area of 1 197km², it belongs to the hydrologic Balsas region, and is one that feeds the Cutzamala system, is managed by the "Consejo de Cuenca del Valle de México", but belongs to the "Organismo de Cuenca del Balsas", water availability by NOM-011-CONAGUA-2015 is 44% of the result obtained with HBV model for a historical period of 58 years (1952-2010).

PALABRAS CLAVE

Hidrología superficial, modelos hidrológicos, disponibilidad hídrica, HBV, NOM-011-CONAGUA-2015

1. INTRODUCCIÓN

México cuenta con una extensión superficial de aproximadamente 2 millones de Km², sin embargo, cerca del 50% de esta superficie es de terrenos montañosos y el 50% restante le corresponde a terrenos de topografía más o menos plana. Y es en éstas áreas, donde se encuentran asentados los grandes núcleos poblacionales y se desarrollan la mayor parte de las actividades económicas, para dichas labores, han sido de vital importancia los recursos hidrológicos. Sin embargo, la disponibilidad y distribución del agua en el territorio nacional es irregular, debido a la gran diversidad fisiográfica y climática.

En México se presenta un promedio anual de 780 mm de precipitación pluvial, que corresponde a un volumen de 1 532 000 millones de m³. En la zona norte y en el altiplano (a los cuales les corresponde el 52 % del territorio) la media anual es inferior a los 500 mm, y en sólo una porción del sureste (7% del territorio) la precipitación alcanza valores superiores a los 2,000 mm anuales. La distribución orográfica y climática originan, en gran medida, que la mayor parte del territorio sea de zonas semiáridas. Se considera que el 50 % del escurrimiento anual total se concentra en los ríos más caudalosos ubicados en el sureste del país, cuya región hidrológica comprende sólo el 20 % de la superficie total del territorio. De esta forma, el agua se encuentra disponible en escurrimientos superficiales, cuyo volumen promedio se estima en 410,164 millones de m³ anuales. Estos escurrimientos se distribuyen en 320 cuencas hidrológicas, en la vertiente del Pacífico, las cuencas más importantes son las de los ríos Yaqui, Fuerte, Mezquital, Lerma, Santiago y Balsas; y en la vertiente del Golfo de México, sobresalen las de los ríos Bravo, Pánuco, Papaloapan, Grijalva y Usumacinta (Quintero & Reyes, 2009).

Para aprovechar este recurso, en México se cuenta con un sistema de presas para almacenamiento de 125,000 millones de m³, y los lagos y lagunas tienen una capacidad de almacenamiento de 14,000 millones de m³ que en total corresponde al 34% del escurrimiento anual. De la capacidad total de almacenamiento de agua en presas, el 33% se utiliza para riego principalmente en las regiones semiáridas del norte y el 37% se usa en la generación de energía eléctrica, principalmente en el sur del país; y el resto para otros usos (Lomelí, 2006).

El escurrimiento superficial se define como aquella parte de la lluvia, del agua de deshielo y/o del agua de irrigación que no llega a infiltrarse en el suelo, sino fluye hacia un cauce fluvial, desplazándose sobre la superficie del mismo.

El escurrimiento superficial también comprende el agua que llega al cauce fluvial con relativa rapidez justo debajo de la superficie. Junto con el escurrimiento superficial, este flujo, que se denomina interflujo o flujo subsuperficial, constituye el volumen de agua que en hidrología se conoce generalmente como escurrimiento.

El motivo principal del estudio del proceso de escurrimiento es la necesidad de estimar la cantidad de agua que alcanza rápidamente el cauce fluvial. La escorrentía es el elemento más importante de la predicción de crecidas y puede consistir de agua pluvial o del agua generada por el derretimiento de la nieve y del hielo. Las condiciones en la cuenca hidrológica determinan la proporción de lluvia o nieve que se transforma en escurrimiento.

Empleamos los términos cuenca, cuenca de drenaje y cuenca hidrográfica para describir el área que contribuye a la escorrentía. En términos generales, la escorrentía comienza en la divisoria de las aguas que marca el perímetro de la cuenca. Toda la escorrentía dentro de una cuenca drena en un único sitio, es decir, la salida o desagüe de la cuenca.

Las cuencas hidrográficas forman parte de la compleja y vasta biodiversidad con la que México cuenta; por cuenca hidrográfica entendemos al espacio formado por el escurrimiento de un conjunto de ríos, que se encuentra determinado por elevaciones (no necesariamente de gran altitud) que funcionan como parteaguas de estos.

Las cuencas se pueden clasificar según su desembocadura como exorreicas, endorreicas y arreicas (Cotler, et al., 2007); las primeras se caracterizan por descargar su escorrentía superficial hacia el mar, las cuencas endorreicas drenan hacia un cuerpo de agua interior, como un lago, mientras que las cuencas arreicas se caracterizan por presentar un drenaje superficial que se infiltra antes de encontrar un cuerpo colector.

También se clasifican en dos tipos: cerradas o abiertas. Para el primer caso, imaginemos un plato (que puede ser plano, para los parteaguas de escasa altitud como en el caso de

Tabasco; u hondo para aquellas cuencas con elevaciones considerables, como lo es la del Valle de México). El espacio interno del plato es la cuenca y los escurrimientos de los ríos confluyen en su interior, ya sea en aguas superficiales o subterráneas.

Para el caso de las cuencas abiertas, podemos pensar en un cucharón, el cual no mantiene en su interior las aguas de los ríos y las desaloja a otros cuerpos fuera de la cuenca, incluso, hacia el mar.

Y así como el plato y el cucharón tienen diseños y materiales particulares que determinan sus especificaciones, la cuenca también tiene características derivadas de su altura, sus caudales, la magnitud de su área, su topografía, sus relieves, su forma y el clima prevaleciente, entre otros factores. Producto de estas características, las cuencas contienen en su interior ecosistemas diversos que se traducen en un complejo conjunto de interacciones entre el agua que almacenan y su entorno.

Existen diversas metodologías que son empleadas en México y el mundo para conocer el escurrimiento superficial en las cuencas hidrográficas, algunas de ellas muy complejas y otras más sencillas, pero finalmente el objetivo es el mismo: conocer el agua que se encuentra disponible en las cuencas para su aprovechamiento en actividades humanas, como el abastecimiento, irrigación, obras de drenaje, entre otras; y poder así, hacer la mejor distribución del recurso, pero ¿cuáles de estas metodologías serán las más adecuadas?, ¿acaso algunas dan mejores resultados que otras?, es objetivo de este trabajo realizar algunos análisis que ayudarán a la mejor comprensión de este tipo de cuestionamientos.

En México la NOM-011-CONAGUA-2015 es la que presenta la metodología para obtener la disponibilidad de aguas nacionales, la cual presenta el método indirecto denominado precipitación-escurrimiento, el cual se utilizará para obtener la disponibilidad hídrica media anual en una región, al igual que con el modelo hidrológico HBV, desarrollado en Suecia en los años 70; con el fin de generar evaluaciones y comparativas entre los dos modelos hidrológicos.

2. ESTADO DEL ARTE

La disponibilidad hídrica o escurrimiento natural es el volumen medio anual de agua superficial que se capta por la red de drenaje natural de la propia cuenca hidrológica. (CONAGUA, 2015)

Los métodos indirectos para conocer el escurrimiento en una cuenca son necesarios ya que rara vez se encuentra un caso en que los datos básicos son suficientemente abundantes y de adecuada seguridad, para realizar el más acertado diseño de las obras que conduzcan al aprovechamiento óptimo del recurso hídrico.

El caso más generalizado que se presenta en la evaluación de los recursos hídricos especialmente en cuencas pequeñas o localizadas en áreas apartadas de los centros más poblados y con mejores recursos de información, es que los registros son muy cortos o discontinuos, o bien, no existen del todo, lo que obliga al hidrólogo a aplicar métodos de transferencia de datos que como tales siempre representan solo una aproximación de la realidad (Rodríguez & Saborío, 1983).

Un modelo hidrológico a nivel de cuenca es un conjunto de descripciones matemáticas de componentes del ciclo hidrológico que utilizan principios físicos básicos colectivamente con datos experimentales (Tellez, 2016), los cuales surgen como respuesta a la necesidad de disponer de herramientas de gestión de los recursos hídricos, y buscan establecer una caracterización precisa de los procesos hidrológicos.

La estructura del modelo y la arquitectura del mismo son determinadas dependiendo del objetivo por el cual el modelo es desarrollado. Por ejemplo, un modelo hidrológico es diferente si es tratado para control de avenidas, generación hidroeléctrica, operación de embalses, gestión de recursos hídricos o ecológicos, etc. Dependiendo del tipo de modelo, la información que se requiera puede cambiar siendo los más representativos los datos hidrometeorológicos, geomorfológicos, agrícolas, pedológicos, geológicos e hidrológicos. Los hidrometeorológicos se refieren a la lluvia, nieve, temperatura, humedad, velocidad de viento

y evaporación. Los datos geomorfológicos incluyen mapas topográficos, redes fluviales, áreas y longitudes de drenaje, pendientes y áreas de cuenca; Los agrícolas contienen coberturas vegetales y usos de suelo; en cuanto a los pedológicos se tienen en cuenta el tipo, textura, estructura y condición del suelo, así como tamaño de sus partículas, diámetro, porosidad y contenido de humedad; Los geológicos representan la estratigrafía y litología; y finalmente los datos hidrológicos son aquellos tales como profundidad del flujo, caudal de descarga, flujo base, interflujo, interacciones corriente-acuífero y niveles freáticos (Singh & Woolhiser, 2002). Cabe destacar que debido a la gran variedad de modelos no todos ellos requieren la totalidad de los datos mencionados anteriormente, cada uno de éstos pueden requerir parte de los datos mencionados dependiendo de los objetivos de la modelación y su grado de simplificación.

2.1 Modelos hidrológicos

La modelación hidrológica es una herramienta fundamental de la hidrología, ya que nos permite tener un mejor conocimiento de las propiedades, características y comportamientos más habituales de las cuencas hidrográficas debido a las particularidades, patrones y combinaciones de los factores hidroclimáticos, así como ayudan a ganar una mejor comprensión de los fenómenos hidrológicos que generan éstas y cómo sus cambios pueden afectar estos fenómenos, mediante la simulación de la representación simplificada de un sistema real, y así poder estimar, predecir y analizar futuros eventos que se puedan producir en las cuencas, para utilizar los resultados obtenidos en diferentes tipos de estudios futuros, ya sea de predicción y/o control de avenidas, análisis de infraestructuras existentes, análisis y gestión de recursos hídricos, estudios de los impactos de cambios del uso de suelo, control de la calidad de las aguas, estudios de cambio climático, gestión de aguas subterráneas, ordenación del territorio, estudios hidráulicos, de suelos, de carreteras, entre otros.

Desde la década de los sesenta del siglo pasado, se han venido desarrollando cantidad de modelos hidrológicos debido a la necesidad de representar los procesos y comportamientos hidrológicos que se dan en las cuencas hidrográficas y en el medio en general.

Estos modelos han tenido una evolución gradual con el paso del tiempo teniendo desde modelos agregados considerando la cuenca como un todo hasta los distribuidos haciendo una gran discretización espacial, así como desde los de tipo caja negra en donde sólo se era consciente de las entradas al sistema y de sus salidas, mas no de los procesos que se producían dentro. Siguiendo a esto se desarrollaron los denominados de caja gris donde se conoce con cierto grado de simplificación todos los procesos y comportamientos internos del sistema y evolucionar posteriormente a los llamados caja blanca para los cuales se saben casi a ciencia cierta y con buena claridad estos procesos y comportamientos dentro del modelo utilizado desde el inicio en la precipitación hasta la descarga final del sistema.

A medida que los avances tecnológicos se iban acrecentando y con la aparición y desarrollo de las computadoras aproximadamente hace tres décadas, muchos más modelos han surgido, tanto nuevos como actualizaciones y modificaciones de los previamente existentes, haciendo posible que se puedan representar los sistemas de una forma más real y completa, realizando simulaciones hidrológicas complejas, incluyendo una mayor cantidad de parámetros, variables y ecuaciones.

En general los modelos hidrológicos presentan los siguientes elementos:

- ϕ Variables de entrada (Inputs): Series de datos a partir de las cuales las ecuaciones del modelo realizan los cálculos pertinentes, tales como precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc.
- ϕ Parámetros: Son las características del sistema que en general permanecen constantes en el tiempo. Velocidad de infiltración, coeficientes de descarga, capacidad de campo, etc.
- ϕ Variables de estado: Definen el estado del sistema en cada momento. Humedad del suelo, almacenamiento en los tanques, etc.
- ϕ Ecuaciones: Expresiones matemáticas que reflejan la simplificación del sistema.
- ϕ Salidas (outputs): Flujos de salida y/o variables de interés de la cuenca. Flujos intermedios, flujo final, infiltración, etc.

2.1.1 Clasificación

Existe una gran variedad de clasificación de los modelos hidrológicos, sin embargo se pueden resumir en cuatro principales categorías según (Daniel, et al., 2011) las cuales son: naturaleza de los algoritmos empleados, técnicas involucradas en el proceso de modelamiento, representación espacial y escala temporal.

2.1.1.1 Naturaleza de los algoritmos empleados

2.1.1.1.1 Modelos empíricos

Los modelos empíricos o también llamados de caja negra, son la representación de un sistema real con explicaciones matemáticas utilizando datos experimentales sin realmente tratar de explicarlo mediante leyes físicas generales. Se basan en relaciones de entrada-salida y no se preocupan por describir los procesos y comportamientos internos del sistema. Este tipo de modelo es desarrollado mediante investigación y experimentación, contiene parámetros que pueden tener poco sentido físico. El método racional, el número de curva del Soil Conservation Service (SCS, 1972), GR4J (Perrin, Michel, & Andréassian, Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, 2003) y modelos estocásticos de series de tiempo, son ejemplos de esta clase.

2.1.1.1.2 Modelos de base física

En los modelos de base física o también llamados de caja blanca o teóricos, se conocen todos los procesos y comportamientos internos del sistema. Las leyes que rigen el sistema son totalmente conocidas, utilizan las ecuaciones físicas básicas tales como conservación de la masa, momento y energía para describir éstos procesos hidrológicos. Pueden permitir diferentes predicciones de un sistema bajo cualquier condición, se asume que la recolección de datos requeridos es posible. Sin embargo estos modelos son difíciles de desarrollar ya que sólo pueden ser utilizados en sistemas físicos limitados o para investigaciones específicas (Jajarmizadeh, Harun, & Salarpour, 2012). Ejemplos de estos modelos son SHE (Abbott, et al., 1986a y 1986b) y TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979)

2.1.1.1.3 Modelos conceptuales

Los modelos conceptuales o también llamados de caja gris, se encuentran en un intermedio entre los empíricos y los de base física. Generalmente consideran leyes físicas, pero con una gran simplificación, utilizan técnicas matemáticas y utilizan almacenamientos o tanques para representar los balances de agua. Ejemplos de estos modelos son el HBV, SAC-SMA (Burnash et al., 1973) y SOCONT (Schaepli, et al 2005).

2.1.1.2 Técnicas involucradas en el proceso de modelamiento

2.1.1.2.1 Modelos determinísticos

Son modelos matemáticos en los que los resultados son obtenidos mediante relaciones conocidas entre estados y eventos, no dan aleatoriedad, permiten una sola salida de una simulación con un conjunto de valores de entrada y de parámetros. Aplican ecuaciones diferenciales parciales no lineales para cada parámetro dadas ciertas condiciones con las que describen el proceso hidrológico y presentan el interior de los procesos, lo cual permite un mejor entendimiento del sistema hidrológico (Jajarmizadeh, Harun, & Salarpour, 2012).

2.1.1.2.2 Modelos estocásticos

Este tipo de modelos carece de bases físicas y tienen la mayoría de sus datos de entrada y/o parámetros representados por distribuciones estadísticas y probabilísticas las cuales determinan un rango de resultados los cuales tienen cierto grado de aleatoriedad e incertidumbre. Como los modelos de regresión lineal, autoregresivos y ARIMA.

2.1.1.3 Representación espacial

2.1.1.3.1 Modelos agregados

Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos subsuperficiales y subterráneos. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, afirmación que es válida para cuencas pequeñas (Cabrera, s.f.).

Los modelos agregados consideran la cuenca como un todo, donde los parámetros y variables son constantes en el espacio. La ventaja de estos modelos es que no necesitan de la calibración de muchos parámetros y tienen unas expresiones matemáticas sencillas, sin embargo, no muestran la variabilidad interna del sistema, sino que sus resultados son la representación de su situación media. El modelo de precipitación-escorrentía de Témez es un claro ejemplo de modelo agregado, así como el HEC-HMS (USACE, 2000) y el Stanford Watershed Model (Crawford & Linsley, 1966).

2.1.1.3.2 Modelos distribuidos

Con el fin de tener una mayor representatividad de la cuenca, los modelos distribuidos la discretizan en un gran número de elementos pequeños regulares e irregulares, grillas o mallas donde el flujo de agua va pasando de un punto o nodo hacia el siguiente y así el agua drena por toda la cuenca, teniendo variabilidad espacial de parámetros, variables y resultados, permitiendo así interacción entre los diferentes procesos en cada una de las celdas generadas. Este tipo de modelos representa de muy buena manera la heterogeneidad de la cuenca capaz de obtener resultados en cada celda, sin embargo, requiere de una gran cantidad de datos que puede que no existan o se encuentren incompletos, mayor cantidad de parámetros para calibrar, mucho tiempo para ajustarlos y recursos computacionales considerables. Ejemplos de este tipo de modelos son TETIS (Vélez, 2001), SHE y TOPMODEL.

2.1.1.3.3 Modelos semi-distribuidos

Cuando las cuencas ya no son pequeñas, muchas características de ella no se pueden asumir como homogéneas en toda su superficie con lo que se pueden discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico y analizar cada una de forma independiente para posteriormente combinar sus efectos.

Para evitar las dificultades de los modelos distribuidos, se desarrollaron los modelos semi-distribuidos los cuales son un término medio entre los agregados y los distribuidos, en la que la cuenca es dividida en diferentes subcuencas o unidades de mayor tamaño que las grillas de los modelos distribuidos, que a su vez son tratadas como una sola unidad al juntarse. Su estructura tiene una mejor base física que los modelos agregados y requiere menor cantidad

de datos de entrada que los distribuidos. Ejemplos de modelos semi-distribuidos son el HBV (también clasificado como conceptual) y el HYPE (Arheimer et al., 2008).

2.1.1.4 Escala temporal

2.1.1.4.1 Basado en eventos

Los modelos basados en eventos simulan el sistema para un sólo evento específico en un pequeño intervalo de tiempo que puede ser desde una hora o menos hasta muchos días (Jajarmizadeh, Harun, & Salarpour, 2012).

2.1.1.4.2 Proceso continuo

Los modelos de proceso continuo realizan simulaciones para uno o varios eventos en grandes intervalos de tiempo que pueden ser bastantes años. Una de las grandes ventajas de este tipo de modelos es que pueden tener más éxito para cuencas no aforadas y para el estudio de las características a largo plazo de un sistema (Tellez, 2016).

2.2 Modelos lluvia-escurrecimiento

2.2.1 Modelo del método Racional

Se considera como un modelo empírico que utiliza la fórmula:

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad [2.1]$$

donde Q es el gasto máximo, C el coeficiente de escurrecimiento que es adimensional y equivalente al cociente del escurrecimiento entre la lluvia, i la intensidad de la lluvia y A el área de cuenca.

La designación de método Racional se debe a su concepción teórica elemental, pues cuando una intensidad de lluvia i ocurre, durante un cierto lapso t, una parte a de cuenca contribuye con escurrecimiento, la más cercana a su salida y en una proporción C de la lluvia. Al avanzar el tiempo t hasta llegar al Tc (tiempo de concentración), a se convierte en A y se llega al gasto máximo $Q = C \cdot i \cdot A$.

El método Racional es una descripción muy simple del proceso lluvia-escurrecimiento, en la cual los efectos de la lluvia y del área de cuenca son tomados explícitamente y los efectos

de las condiciones físicas de la cuenca se toman en cuenta de manera indirecta a través del T_c y del valor de C . La infiltración y otras pérdidas no se consideran de una manera física real, sino indirecta global en el coeficiente de escurrimiento C . El almacenamiento temporal del escurrimiento sobre el terreno y en los cauces, así como las variaciones temporales y espaciales de la lluvia son ignoradas completamente (Campos, 2008).

2.2.2 Modelo SHE

Es un sistema de base física distribuida producido conjuntamente por el Danish Hydraulic Institute, el Instituto Británico de Hidrología y SOGREAH (Francia) con el apoyo financiero de la Comisión de las Comunidades Europeas. El SHE se basa-físicamente en el sentido de que los procesos hidrológicos de movimiento del agua se modelan ya sea por las representaciones de diferencias finitas de las ecuaciones diferenciales parciales de la masa, cantidad de movimiento y conservación de la energía, o por ecuaciones empíricas derivadas de la investigación experimental independiente. La distribución espacial de los parámetros de entrada de captación, las precipitaciones y la respuesta hidrológica se logra en la horizontal por una red de malla ortogonal y en la vertical por una columna de capas horizontales en cada cuadrado de la cuadrícula. Cada uno de los procesos principales de la fase terrestre del ciclo hidrológico se modela en un componente separado de la siguiente manera: la interceptación, por el procedimiento contable Rutter; evapotranspiración, por la ecuación de Penman-Monteith; por tierra y el flujo del canal, por la simplificación de las ecuaciones de St. Venant; la zona de flujo insaturado, por la ecuación de Richards unidimensional; la zona de flujo saturado, por la ecuación de Boussinesq de dos dimensiones; deshielo, mediante un método de balance de energía (Abbott, et al., 1986a y 1986b). Este modelo reproduce el uso y manejo de las aguas superficiales y las aguas subterráneas conjuntiva para conocer la recarga y la evapotranspiración.

2.2.3 Modelo de Témez

El modelo de Témez (Témez, 1977) pertenece al grupo de los denominados modelos agregados de simulación de cuencas (Estrela, 1992). El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos de transporte de agua que tienen lugar en un sistema

hidrológico durante las diferentes fases del ciclo hidrológico. Todo el proceso está gobernado por el principio de continuidad y de balance de masas, y regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance.

El modelo realiza una valoración global, ya que no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos, que se sustituyen por un valor medio, por lo que se limita su aplicación a cuencas pequeñas o intermedias en las que existe cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica. Para su aplicación en cuencas de mayor tamaño es necesario realizar una subdivisión en cuencas más pequeñas, por lo que el modelo puede funcionar como modelo semiagregado (Paredes et al., 2014).

2.2.4 Modelo Sacramento

El modelo hidrológico Sacramento, denominado en muchos casos SAC-SMA model, fue desarrollado por Burnash y Ferral en la década de los 70 (Burnash, et al., 1973). Según se indica en el documento de explicación del modelo, el modelo Sacramento es un intento de parametrizar las características de humedad en el suelo tal que: se distribuya la humedad en varios niveles de forma lógica, tenga unas características de percolación racionales y permita una efectiva simulación del caudal del río. Este modelo permite la estimación de la escorrentía de una cuenca a partir de la precipitación, la evapotranspiración potencial, la superficie de la cuenca y un conjunto de parámetros. Además, como sistema conceptual que es, intenta representar en detalle el ciclo hidrológico mediante la división del terreno en diferentes compartimentos, o estanques, que representan diferentes procesos del ciclo. Dentro de los modelos precipitación escorrentía el modelo Sacramento se puede clasificar como conceptual, continuo, determinístico, de entradas agrupadas, número alto de parámetros y sólo cuantitativo.

2.2.5 Modelo GR4J

El modelo GR4J es un modelo hidrológico global con cuatro parámetros desarrollados por Perrin et al. (2003). Se trata de un modelo empírico, pero su estructura es similar a los modelos conceptuales. Tiene en cuenta la humedad y está compuesto por dos depósitos

(producción y de enrutamiento). Los hidrogramas unitarios también se asocian para tener en cuenta el comportamiento hidrológico de la cuenca.

2.2.6 Modelo GR2M

GR2M es un modelo agregado que simula caudales en intervalos temporales. El modelo transforma la precipitación en escorrentía mediante la aplicación de dos funciones: una función de producción y una función de transferencia.

Su estructura consta de dos depósitos: el depósito de suelo y el depósito de agua gravitacional. Las variables que interfieren en el modelo son la precipitación media de la cuenca, es la escorrentía superficial, la evapotranspiración actual, la percolación profunda, el almacenamiento del depósito de suelo al inicio del periodo de análisis, el almacenamiento del depósito de agua gravitacional al inicio del periodo de análisis, este modelo concluye en resultados de caudal a la salida de la cuenca (Paredes et al., 2014).

2.2.7 Modelo HBV

El modelo hidrológico HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) es de gran tradición en países nórdicos, tiene una larga historia y ha sido aplicado en más de 30 países, su primera aplicación data de los primeros años de la década de los 70 (Bergström, 1976) desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia (SMHI) para simulación de escurrimiento y predicción hidrológica, a su vez con el tiempo el modelo ha sido modificado y mejorado sin alterar demasiado el planteamiento original (Lindström G. , 1997). Una de las versiones más empleadas en investigación y educación es la llamada HBV light (Seibert, 2005), aunque la estructura principal del modelo y las representaciones de los procesos presentados en este estudio están basadas en la versión modificada del modelo HBV desarrollado por el Instituto de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Stuttgart, Alemania (Lindström, 1997; Hundecha & Bárdossy, 2004; Ehret, 2002; Das et al., 2006). Posee un número no muy elevado de parámetros por lo que es favorable siendo así un modelo robusto y versátil.

Es de tipo semidistribuido conceptual y consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación

efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de escurrimiento. El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual (Paredes et al., 2014).

En la siguiente figura, se ilustran los procesos generales de la versión utilizada del HBV. Esta incluye un módulo que procesa los datos de precipitación como lluvia o como nieve basándose en la temperatura de cada paso de tiempo. La lluvia y la nieve fundida (si existe) son procesadas en el módulo de humedad del suelo donde se evalúa la precipitación efectiva que contribuye a la esorrentía superficial. La parte restante de la precipitación contribuye a la humedad almacenada en el suelo, que a su vez puede evaporarse siempre y cuando el contenido de agua existente en el subsuelo sea lo suficientemente grande. La salida principal del modelo es el escurrimiento total en el punto de desagüe de la cuenca, que consta de tres componentes: escurrimiento superficial, interflujo y flujo base (contribución del flujo subterráneo).

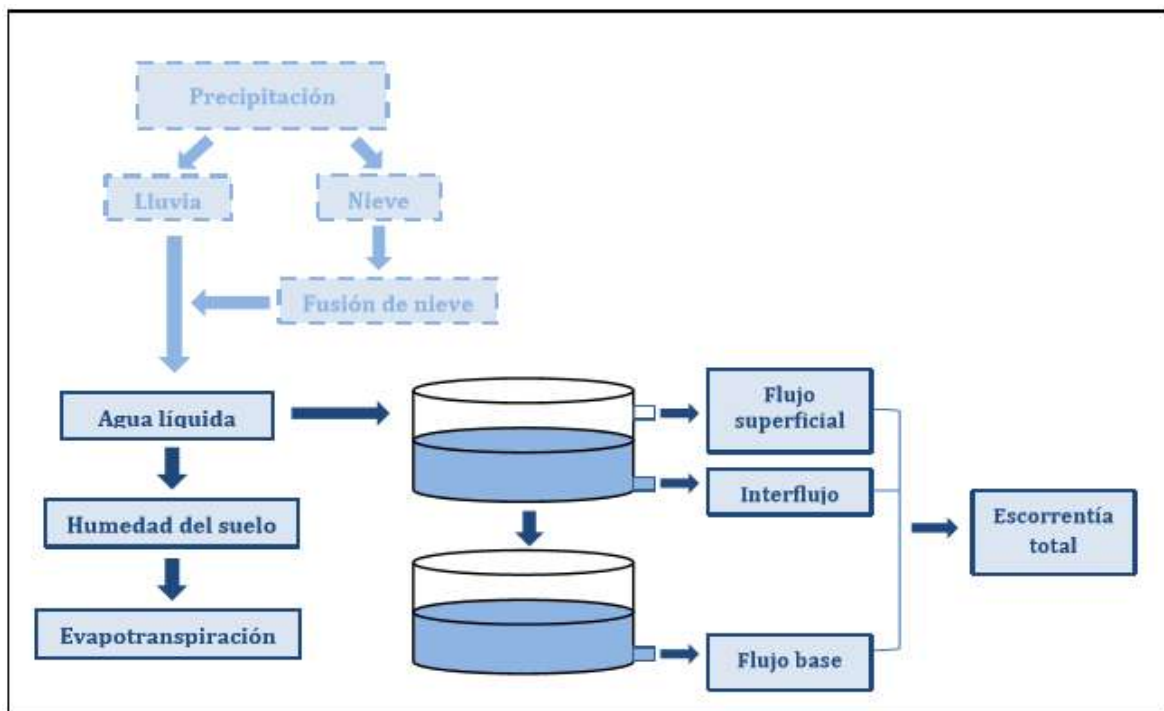


Figura 2.1. Esquema general del modelo HBV.

Fuente: Paredes, et al., 2014

2.3 Modelación hidrológica

2.3.1 Calentamiento

El período de calentamiento es la etapa en la cual se realiza la simulación en un pequeño intervalo de tiempo previo a la calibración, en donde se busca inicializar el modelo para neutralizar el efecto y/o reducir la influencia de las condiciones iniciales que son desconocidas, para así al final del calentamiento obtener unos valores que serán utilizados como condiciones iniciales para la calibración, pueden ser tales como humedad inicial, altura de nieve, altura de lámina de agua, etc.

2.3.2 Calibración

La calibración es el proceso de ajustar los valores de los parámetros para así optimizar el desempeño del modelo de acuerdo a un conjunto de criterios predefinidos. Cada modelo utiliza uno o más grupos de parámetros que son usados para determinar el comportamiento básico del sistema modelado (Wilby, 1997). En esta etapa se intenta lograr la mejor concordancia entre las predicciones del modelo y las observaciones de respuesta actual de la cuenca, al identificar los parámetros efectivos con los cuales la diferencia entre estas predicciones y observaciones sea menor posible.

Para poder hallar estos parámetros se puede realizar de dos maneras, la primera mediante calibración manual o también llamada prueba y error, en donde se realiza un ajuste manual a criterio propio, suele ser un proceso lento y en algunos casos no muy efectivo; la segunda es mediante la calibración automática en la que se optimiza utilizando técnicas numéricas de optimización, es un método más eficaz y conciso, aunque el tiempo que se tarda en arrojar los resultados depende del modelo, de la cantidad de parámetros y la escala temporal.

Para evaluar las diferencias entre los resultados de la simulación se hace uso de índices de eficiencia y función objetivo los cuales son explicados más adelante.

2.3.3 Validación

Una vez que el modelo esté calibrado éste debe ser verificado para identificar su precisión, se realiza la simulación utilizando un período diferente al de la etapa anterior para evaluar que tan correctos son los parámetros arrojados en el proceso de calibración y comprobar si el modelo es estable. Si el modelo se encuentra bien calibrado, éste debe arrojar buenos resultados en cuanto a índices de eficiencia y función objetivo, ya que estos representan la bondad del ajuste del modelo en cuanto a los datos simulados y los observados. Existen tres tipos de validación siendo en el tiempo, en el espacio y en el espacio-tiempo, en donde las dos últimas son exclusivas de los modelos distribuidos (Tellez, 2016).

2.4 NOM-011-CONAGUA-2015

En México la Norma Oficial Mexicana 011 de la Comisión Nacional del Agua (2015) parte del concepto de que los recursos hídricos accesibles para su aprovechamiento por el hombre tienen su origen en la precipitación pluvial, que al ocurrir sobre “tierra firme”, se divide en dos fracciones:

- ∅ La primera fracción escurre superficialmente por las redes de drenaje natural como arroyos y ríos, hasta desembocar al mar o a cuerpos interiores de agua.
- ∅ La fracción complementaria se infiltra y circula a través de acuíferos, que a su vez descargan a cuerpos y cursos superficiales, a través de manantiales o subterráneamente al mar.

La Norma Oficial Mexicana tiene como objetivo establecer el método base para determinar la disponibilidad hídrica media anual de las aguas nacionales superficiales y del subsuelo, para su explotación, uso o aprovechamiento. Esta Norma se aplicará en los estudios para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales en cuencas hidrológicas y en acuíferos. El método se considerará como el requerimiento técnico mínimo obligatorio y no excluye la aplicación adicional de métodos complementarios o alternos más complicados y precisos, cuando la información disponible así lo permita, en cuyo caso la Comisión revisará conjuntamente con los usuarios y determinará cuáles son los resultados que prevalecen.

En caso de que en una cuenca hidrológicas sea clasificada como grande (área mayor de 3000 km²), se deberá subdividir en función de la problemática regional que enfrente el uso del recurso, de la importancia de sus afluentes, localización de los diferentes usuarios e información hidrométrica y climatológica disponible.

“En caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información de registros hidrométricos o ésta sea escasa, para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural se aplica el método indirecto denominado: precipitación-escurrimiento. El cual se tratará como otro modelo hidrológico de tipo empírico, el cual se basa específicamente en considerar el área de la cuenca multiplicada por la precipitación media anual que a su vez se ve afectada por un coeficiente de escurrimiento que se basa en el uso y cobertura del suelo, el tipo de suelo, y considera la evapotranspiración” (CONAGUA, 2015).

2.5 Selección de modelos y herramientas

Los recursos naturales, tales como el agua y sus cuencas, se distribuyen sobre espacios concretos; por tanto, son susceptibles de ser representados en mapas, una vez inventariados y clasificados. El inventario y clasificación de cuencas se basa en dos tipos de datos. Los obtenidos en el campo (estaciones hidro-meteorológicas de aforos, determinación de variables para estimar el balance hídrico, consumo de agua), y los derivados de la percepción remota (fundamentalmente cobertura del terreno, relieve y suelos, acuíferos), también verificados en campo. En la actualidad, la forma más conveniente de almacenar y analizar este conjunto de datos es mediante los sistemas de información geográfica (SIG), que además permiten la elaboración y manipulación de mapas. Entonces, es posible relacionar en forma coherente y sistemática los datos de localización de los recursos hídricos, con sus características descriptivas cuantitativas y cualitativas. Este hecho ofrece una visión integral y territorial del dato (en su localización geográfica, y en sus características temáticas), lo cual permite mejorar las técnicas analíticas, incluyendo las estadísticas y las geo-estadísticas (Bocco, 2007).

Existen módulos informáticos que sirven para el desarrollo de modelos precipitación-escurrimiento en cuencas complejas como el software EVALHID (Evaluación de los Recursos

Hídricos) que sirve para evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las cuencas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca, la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida.

Para el desarrollo de este trabajo se eligieron dos modelos hidrológicos, el primero basado en la normativa mexicana, el método indirecto precipitación-escorrentía, debido a que es un modelo sumamente sencillo de utilizar, debido a que las variables que intervienen tales como el uso, cobertura y tipo de suelo se pueden conocer gracias a los datos vectoriales proporcionadas por instituciones, ya que es la metodología oficialmente aplicada en México. El segundo modelo será el modelo hidrológico HBV, el cual al ser de un número de parámetros relativamente pequeño, en comparación con los necesarios en los llamados de caja blanca, es posible calibrar gracias a las herramientas disponibles; otra razón es que funciona como un modelo semidistribuido, lo que se considera de gran relevancia debido a que es importante integrar herramientas en México que tomen en cuenta los cambios de las variables del ciclo hidrológico de un punto a otro de la cuenca.

3. ANTECEDENTES

En la segunda mitad del siglo XX la derivación del agua para diversos usos creció de modo acelerado, al grado que ahora existen porciones importantes de la superficie continental del planeta, en las cuales el ambiente ha sufrido daños graves; en casos extremos, irreparables.

Además, las autoridades nacionales de la Secretaría de Recursos hidráulicos, actualmente Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), detectaron que en diversas regiones, entidades federativas y localidades del país, los volúmenes del fluido concesionado superan el escurrimiento y la recarga de los acuíferos, situación que genera escasez del recurso, conflictos entre los usuarios y diversos efectos perjudiciales.

Así es como la NOM-011-CONAGUA-2015 sienta las bases para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales en cuencas hidrológicas y en acuíferos (El correcto uso del agua de acuerdo a su disponibilidad, 2016).

En el documento se exponen diferentes métodos, aceptados por la CONAGUA, para conocer el funcionamiento y capacidad de las cuencas con la finalidad de explotarlo adecuadamente. Ello dependerá de cada región del país, la cantidad de lluvias y la permeabilidad del suelo.

En este capítulo se describirán los antecedentes en tres partes organizadas de manera cronológica en cada una de ellas, la primera respecto a los estudios previos realizados con el método indirecto precipitación-escurrimiento establecido por CONAGUA, la siguiente parte constará de los estudios que se han hecho con el modelo hidrológico HBV y en una tercera parte se describen estudios con objetivos similares a los que se persiguen en el presente proyecto.

En México, el cálculo de la disponibilidad hídrica media anual, mediante la NOM-011-CONAGUA se ha utilizado para generar estudios de diferente índole, desde cambios de uso de suelo, cálculo de los volúmenes disponibles por diferentes instituciones como CONAGUA o la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), así como estudios

comparativos con otros modelos matemáticos para la optimización de resultados, a continuación citaremos algunos de estos trabajos para dar una perspectiva sobre el uso del método indirecto: precipitación escurrimiento para el cálculo de volumen de escurrimiento medio anual.

El Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (2006) para América Latina y el Caribe (PHI-LAC) junto con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), mediante los autores Javier Aparicio Mijares, Jaqueline Lafragua Contreras, Alfonso Gutiérrez López, Roberto Mejía Zermeño y Ernesto Aguilar Garduño, presentaron el documento técnico “Elaboración del balance hidrológico integrado por cuencas hidrográficas”, en el cual citan la recomendación de usar la metodología mostrada en la NOM-011-CNA-2000 para el cálculo del coeficiente de escurrimiento.

Un artículo de AGROCIENCIA publicado en 2011, de los autores M. Lourdes Figueroa-Jáuregui, L. Alicia Ibáñez-Castillo, Ramón Arteaga-Ramírez, J. Luis Arellano-Monterrosas, Mario Vázquez-Peña. Titulado “cambio de uso de suelo en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, México” el cual tiene como fin analizar los cambios de uso del suelo y sus efectos sobre los procesos de degradación y los procesos hidrológicos en la cuenca endorreica de San Cristóbal de las Casas, en los Altos de Chiapas, México (Figueroa, et al., 2011). En este estudio se obtuvieron conclusiones mediante el uso de la NOM-011-CONAGUA-2000, en donde se observa que los volúmenes de escurrimiento anual tendieron a aumentar de 76.85 millones m³ en 1975 a 78.12 en 1993, 79.48 en 2000 y 82.0 en 2009.

La Comisión Nacional del Agua también tiene que hacer estudios basándose en su normativa, tal es el caso de la Subdirección General Técnica encargada de la Gerencia de Aguas Subterráneas que a su vez tiene a su cargo la Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos hace estudios como:

- Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Sauz-Encinillas (0807), Estado de Chihuahua.
- Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (2650) Nogales Estado de Sonora.

- Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Marqués de Comillas (0713), Estado de Chiapas.
- Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Puerto Vallarta, Estado de Jalisco.
- Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero La Piedad (1623), Estado de Michoacán.

En este tipo de estudios, el método indirecto precipitación-escorrimento, objeto de estudio en el presente trabajo, fue utilizado para calcular el volumen de escurrimiento superficial debido a la lluvia, necesario para que junto con otras variables se pueda calcular el volumen de infiltración y la recarga vertical.

Con motivo de la revisión de la Cuenta Pública 2012 y en cumplimiento de las disposiciones normativas aplicables, la Auditoría Superior de la Federación (ASF, 2012) evaluó la Política Hídrica Nacional en el periodo 1989-2012, con objeto de identificar su evolución y determinar su pertinencia y eficacia para atender el problema hídrico definido a partir de la creación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que junto con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), utilizaron la metodología de la NOM-011-CNA-2000, versión anterior a la que rige actualmente, para calcular la disponibilidad media de agua superficial en las XIII regiones hidrológico-administrativas de la República Mexicana. La cual resultó de 290,332.6 Hm³, cifra que significó el 94.6% respecto del volumen de escurrimiento medio anual que fue de 307,041.0 Hm³.

El modelo hidrológico HBV, fue desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para predecir la esorrentía a centrales hidroeléctricas en 1970 (Bergström, 1976), pero el alcance de sus aplicaciones se ha ido incrementando continuamente. El modelo ha estado sujeto a modificaciones a lo largo del tiempo y, aunque su filosofía básica no ha cambiado, existen nuevos códigos que se encuentran en constante desarrollo por diferentes grupos y que varían en su complejidad.

Al igual que la metodología anterior este modelo tiene diferentes aplicaciones como en el artículo publicado en la edición de diciembre de 1997, de Journal of Hydrology, titulado

“Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model”, por los autores Göran Lindström, Barbro Johansson, Magnus Persson, Marie Gardelin, Sten Bergström; del Swedish Meteorological and Hydrological Institute, en Norrköping, Suiza (Lindström et al., 1997). En el cual se hace una reevaluación del modelo HBV con el objetivo de mejorar su potencial para hacer el uso de datos distribuidos espacialmente y para mejorar el rendimiento del modelo.

En 2006 en El Salvador la Ing. Adriana María Erazo Chica en 2006, desarrolló un proyecto denominado “Calibración preliminar del modelo HBV a nivel mensual en la cuenca del Río Grande de San Miguel para estimación de datos faltantes de caudal en series históricas” (Erazo, 2006). Donde mediante calibración de cierto periodo de años se realizó, la estimación de datos de las series de caudales medios mensuales de las estaciones Villerías, Moscoso, El Delirio, Vado Marín y Las Conchas. Con la corrida “sanmiguel70”, se completaron los datos desde 1970 hasta 1995 y con la corrida “sanmiguel03”, se completaron los datos desde 1996 a 2006.

En 2010 la revista Journal of Hydrology publicó un artículo titulado “Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall–runoff model: Implications for parameter estimation” por los autores Nibret A. Abebe, Fred L. Ogden, Nawa R. Pradhan pertenecientes al Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming, Laramie, USA (Abebe et al., 2010). En el cual se aplicó el modelo en una cuenca de 1,924km², cerca de Collins, Mississippi. Se aplicó la sensibilidad individual de los parámetros calibrando el modelo mediante el algoritmo multi-objetivo Shuffled Complex Evolution (MOSCEN). Este análisis concluyó que los parámetros tienen periodos específicos en los que muestran mayor identificabilidad y juegan un papel crucial en la representación del flujo.

En el 2015 en el Programa de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle, en Santiago de Cali, Colombia; Felipe Estrada Barbosa y Juan Sebastián López Torres, presentaron un trabajo titulado “Modelación Hidrológica del Río Palo utilizando el modelo hidrológico HBV para simular escenarios de variabilidad climática asociados al fenómeno en su fase fría la niña” (Estrada & López, 2015).

En marzo de 2016 Andrés Felipe Tellez Rojas (Tellez, 2016), en la Maestría Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, en España; presentó el trabajo “Modelación Hidrológica del Sistema de Explotación Gállego-Cinca de la Confederación Hidrológica Ebro mediante el modelo Precipitación-Escorrentía HBV”. En el cual se logró una correcta calibración y parametrización general del modelo hidrológico obteniendo buenos resultados y a su vez se encontró una clara afección y alteración del régimen natural de caudales en el sistema de explotación, primero debido a la gran cantidad de zonas agrarias en donde la mayoría se ubican en el subsistema del río Cinca y segundo a la cantidad de embalses existentes situados casi en su totalidad en el subsistema del río Gállego produciendo regulaciones de caudales bien considerables.

La Universidad Politécnica de Valencia, en España, desarrolló la herramienta EVALHID (Paredes et al., 2014) que permite obtener la disponibilidad de varios modelos lluvia-escorrentía, incluye el modelo HBV; la cual se usará en este trabajo para obtener la disponibilidad hídrica en la zona de estudio. En México el uso de los modelos precipitación-escorrentía no ha sido muy vasto, pero en los últimos años se ha investigado más usando Témez agregado y puede funcionar como semi-distribuido (Témez, 1977), también se ha utilizado la herramienta Patrical desarrollada en la Universidad Politécnica de Valencia y el modelo en Stella (Olaiz et al., 2003) de simulación de la distribución de agua superficial en la cuenca, el cual ha sido usado en la región hidrológica Lerma-Chapala.

En agosto de 2015, se presentó un proyecto de tesis en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la M.C. Liliana García Romero, que lleva por título “Evaluación del efecto del cambio climático en los escurrimientos superficiales en la cuenca del Río Tuxpán, Michoacán”. Para este trabajo realizó la modelación hidrológica con diferentes herramientas utilizando el software EVALHID, mediante la implementación de modelos como Témez y HBV, también se modeló con la herramienta PATRICAL y la Norma Oficial Mexicana. Siendo éste el antecedente de más referencia que tendrá este trabajo, dado que se utilizó la misma zona de estudio (García L. R., 2015).

En mayo de 2016 el Ingeniero Civil Daniel S. Nieto Estrada presentó un trabajo de tesis para la Universidad Michoacana de Sana Nicolás de Hidalgo titulado “Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del Río Tepalcatepec, NOM-011, HBV”. En el cual se muestra un trabajo que busca los mismos fines que el presente proyecto, por lo cual se considera uno de los antecedentes previos más importantes, que servirá de base para fines comparativos y de evaluación de presente proyecto (Nieto, 2016).

4. OBJETIVOS

4.1 General

Evaluar la metodología propuesta por el modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) respecto a la metodología planteada por la Norma Oficial Mexicana 011 de la Comisión Nacional del Agua en su versión 2015, para su aplicación en México.

4.2 Particulares

Obtener la disponibilidad hídrica media anual con la metodología propuesta por la Norma Oficial Mexicana 011 de la CONAGUA

Obtener la disponibilidad hídrica media anual en la cuenca del río Tuxpan mediante el diseño y puesta en marcha de un modelo parametrizado utilizando la metodología del Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV).

Desarrollar diferentes metodologías, espaciales y puntuales, para la obtención del coeficiente de escurrimiento que exige la metodología de la NOM-011-CONAGUA-2015.

Presentar una metodología para la obtención del parámetro K (parámetro en función del uso y tipo de suelo) necesario para la determinación del coeficiente de escurrimiento presente en la NOM-011-CONAGUA-2015, para cuencas con diferentes usos y tipos de suelo mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica.

Realizar un análisis de sensibilidad de las variables que intervienen en la metodología de la NOM-011-CONAGUA-2015.

Evaluar los resultados obtenidos con las metodologías de los modelos hidrológicos mencionados.

5. HIPÓTESIS

El modelo hidrológico HBV representa el ciclo hidrológico de una forma más precisa respecto a los resultados generados por la NOM-011.

6. JUSTIFICACIÓN

Es necesario tener certeza del volumen neto de escurrimiento superficial que puede aprovecharse en cualquier zona de nuestro país; para así combatir problemáticas como el déficit o aprovechamiento de los excedentes en cuencas. Existen zonas que son más propensas a la explotación, debido a que existe mayor frecuencia de lluvia, terrenos que drenan con mayor facilidad el agua, etc., es por ello necesario lograr una correcta evaluación de los recursos hídricos en este tipo de zonas.

El sistema Cutzamala (Bunge, Martínez, & Bedolla, 2012) es un conjunto de obras hidráulicas instaladas en 14 municipios de los estados de Michoacán y México, cuya finalidad actual es abastecer de agua a la gran cuenca del Valle de México. Desde 1993, se concluyeron las diferentes etapas de construcción de este sistema con capacidad para bombear 19 m³/s de agua, a través de una distancia de 170 kilómetros y una diferencia de altura de 1,100 metros. La cantidad de agua que suministra el Sistema Cutzamala al Valle de México representa un poco más del 20% del volumen total que esta megalópolis consume.

La cuenca del río Tuxpan es una de las pertenecientes al sistema Cutzamala, ésta se encuentra dentro del estado de Michoacán y de la región hidrológica del río Balsas, es una de las subcuencas del sistema Cutzamala con mayor precipitación acumulada, además de que es la que tiene mayor superficie y la más industrial. La industria manufacturera, pero también la construcción, el comercio y el turismo, son las actividades económicas más importantes en toda la región. Las principales actividades consumidoras de agua en esta zona son la agrícola, la acuícola y el consumo doméstico. Al ser esta zona regulada por el Consejo de Cuenca del Valle de México, pero perteneciente a otro Organismo de Cuenca, surge una interrogante, ¿se hace una correcta evaluación de los recursos hídricos sobre esta zona?, es por ello necesario generar estudios que permitan conocer la correcta distribución del agua en este sitio.

La metodología que se utiliza en México para obtener la disponibilidad hídrica anual se basa en un método empírico que implica variables como el uso y el tipo de suelo; los modelos

empíricos como su nombre lo dice, son basados en la experiencia y observación de hechos, que llevan a concluir el comportamiento del agua en determinada zona. En las últimas décadas las herramientas para el desarrollo adecuado de la evaluación de los recursos hídricos han aumentado considerablemente, tal es el caso de los modelos matemáticos implementados a la hidrología. Como ya se sabe, las matemáticas son exactas, por lo que proporcionan resultados invariables de acuerdo a los datos proporcionados. El problema recae en esta situación, los datos necesarios para evaluar los recursos hídricos son tomados en campo, lo que muchas veces resulta en la falta o nula información para desarrollar los modelos matemáticos. Sin embargo, mediante simulaciones y calibraciones de los modelos hidrológicos se puede llegar a resultados certeros.

Los modelos empíricos son necesarios para generar estudios en zonas con poca información, pero es primordial que México se adecúe a los estándares mundiales y avance en tecnología y herramientas; proponer nuevas metodologías e ir desarrollando un avance significativo en la gestión integral de recursos hídricos es primordial para nuestro país.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología a desarrollará considerando una superficie delimitada, conocida como cuenca hidrográfica, y realizar una modelación hidrológica superficial a escala anual mediante dos metodologías, la primera considerando lo establecido en la versión 2015 de la Norma Oficial Mexicana 011 de la Comisión Nacional del Agua (NOM-011-CONAGUA-2015) para la obtención del escurrimiento superficial en cuencas. La otra será utilizando el modelo lluvia-escurrimiento HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) (Bergström, 1976; Lindström et al., 1997).

7.1 Análisis y caracterización de la zona en estudio

Se realizará un análisis geográfico de la zona en estudio, delimitación y caracterización de las condiciones actuales del sitio con la ayuda de sistemas de información geográfica (SIG), y bases de datos proporcionadas por instituciones oficiales como el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y el Conocimiento Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), como también el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).

7.2 Recopilación de datos e información

Es necesario conocer el tipo de información que se requiere para desarrollar las dos metodologías anteriormente mencionadas, para hacer una recopilación de datos e información, se tiene que investigar dónde, cómo y cuáles herramientas son las que pueden dar la información más actual y completa.

- Datos de precipitación y temperatura: Serán obtenidos a partir de las estaciones climatológicas ubicadas cerca o dentro de la cuenca. Para lo cual se utilizará la base de datos de Clima Computarizado (CLICOM).
- Evapotranspiración: Se empleará el método de Thornthwaite para la generación de estos datos mediante las variables de precipitación y temperatura, mismo que se describirá más adelante

- Datos de escurrimiento. La Comisión Nacional del Agua a través del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) proporciona información de estaciones hidrométricas, las cuales aforan caudales en puntos específicos.
- Capas de uso de suelo y cobertura vegetal: La página web del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) proporciona mapas en forma vectorial con este tipo de información.

7.2.1 Método de Thornthwaite

Este método, (Aparicio, 1992) calcula el uso consuntivo o evapotranspiración a escala mensual como una función de las temperaturas medias, utilizando la expresión siguiente:

$$U_j = 1.6K_a \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a \quad [7.1]$$

donde

- U_j uso consuntivo en el mes j , en cm.
- T_j temperatura media en el mes j , en °C.
- a, I constantes.
- K_a constante que depende de la latitud y el mes del año (Tabla 1).

Las constantes I (índice de eficiencia de temperatura) y a se calculan de la siguiente manera:

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad [7.2]$$

donde

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514} \quad [7.3]$$

- j número de mes.

Tabla 7.1. Valores de K_a

Latitud, Grados	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.01
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

$$a = 675x10^{-9}I^3 - 771x10^{-7}I^2 + 179x10^{-4}I + 0.492 \quad [7.4]$$

7.3 Consistencia de datos

Cuando los registros de lluvia, temperaturas o escurrimiento mensuales o anuales son utilizados para la simulación y obtención de parámetros del ciclo hidrológico, tales series o muestras deben ser analizadas y validadas estadísticamente a través de esta etapa conocida como consistencia de datos y así garantizar que dichas estimaciones sean confiables. En resumen, se requiere que las series sean homogéneas o consistentes, libres de tendencia y que se hayan originado por un proceso estocástico, cuya componente aleatoria siga una determinada distribución de probabilidades (Adeloye & Montaseri, 2002).

Las pruebas estadísticas aplicadas se dividen en dos grupos: generales y específicas. Las primeras fueron las tres siguientes: de Helmert, de las Secuencias y t de Student que detectan si la serie o registro es homogéneo debido a que no tiene persistencia o tendencia, cambio en la media o bien no oscila demasiado.

7.3.1 Test de Helmert

La prueba de Helmert (Escalante & Reyes, 2002) es bastante simple, consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada dato de la serie original con respecto a su media. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, una secuencia (S) se ha formado. Por el contrario, si una desviación es seguida por otra de signo contrario, un cambio (C) será registrado. La serie es homogénea cuando la diferencia entre el número de secuencias y el de cambios es cero, o bien será dentro de unos límites debidos a un error probable, los cuales dependen de la longitud del registro, es decir;

$$(S - C) = 0 \pm \sqrt{n-1} \quad [7.5]$$

7.3.2 Prueba de las Secuencias

El procedimiento consiste en definir la mediana de la serie que se analiza, para lo cual los datos se ordenan según su magnitud, si el número de valores (n) es impar, la mediana es el valor central; si n es par corresponde a la media aritmética de las dos magnitudes centrales. Con base en la mediana se marca en la serie original con (+) si el dato es mayor y con (-) si es menor; las secuencias o sucesión (u) de los valores de (+) o (-) son contabilizadas y se concluye que la serie es homogénea si u está en el intervalo que se muestra en la tabla 2 de acuerdo al tamaño de la muestra (n). Si se obtiene un alto valor de u la inhomogeneidad se puede deber a un exceso de oscilación de la serie, en cambio si u es reducido puede haber tendencia o cambio en la media.

Tabla 7.2. Rango del número de Secuencias (u) para un registro homogéneo.
Fuente: Campos Aranda, Procesos del ciclo hidrológico (1998)

n	u	n	u	n	u	n	u
12	5 a 8	22	9 a 14	32	13 a 20	50	22 a 30
14	5 a 10	24	9 a 16	34	14 a 21	60	26 a 36
16	6 a 11	26	10 a 17	36	15 a 22	70	31 a 41
18	7 a 12	28	11 a 18	38	16 a 23	80	35 a 47
20	8 a 13	30	12 a 19	40	16 a 25	100	45 a 57

7.3.3 Prueba 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 una serie Q_i^j para $i = 1, 2, \dots, n_j$, del sitio j , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$, entonces, el estadístico de prueba se define con la expresión 7.6:

$$t_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad [7.6]$$

Donde

\bar{X}_1, S_1^2 , son la media y varianza de la primera parte del registro de tamaño n_1 .

\bar{X}_2, S_2^2 , son la media y varianza de la segunda parte del registro de tamaño n_2 .

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

Si y solo si el valor absoluto t_d es mayor que el de distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie Q_t^j se considera no homogénea (Escalante & Reyes, 2002).

7.3.4 Prueba de Anderson

Respecto a los test específicos se aplicó el de los límites de Anderson, el cual consiste en elaborar un autocorrelograma para diferentes desfases temporales. Primeramente se determinan los coeficientes de autocorrelación (r_k) con la ecuación 7.7 (Madrigal, 2015).

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (X_i^j - \bar{X}^j)(X_{i+k}^j - \bar{X}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (X_i^j - \bar{X}^j)^2} \quad [7.7]$$

Donde:

j muestra de datos

k desfase (años)

n número de datos de la muestra

Una vez obtenidos los valores de autocorrelación para desfases desde 1 hasta $n/3$, se obtienen los límites de Anderson para un límite de confianza del 95% con la expresión 7.8:

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - k} \quad [7.8]$$

7.4 Deducción de datos faltantes de precipitación

Es frecuente que en un registro de precipitación falten los datos de un cierto periodo, debido a la ausencia del operador o fallas del aparato registrador. En estos casos se pueden estimar los datos faltantes si se tienen registros simultáneos de algunas estaciones situadas cerca de la estación en cuestión y uniformemente repartidas (Aparicio, 1992). Una forma de hacerlo es mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado.

7.4.1 Método del inverso de la distancia al cuadrado

Siendo éste uno de los métodos más recientes, su importancia radica en la fácil aplicación en un S.I.G. Este método sería similar al de la Media Aritmética, pero con el agregado de una ponderación por distancia. Pizarro y Ramírez (2000) señalan que dicha ponderación, al tener un factor cuadrático, recibe una influencia bastante fuerte del monto pluvial de las estaciones más cercanas y al considerar una serie o variedad de puntos de estimación, puede formar concentraciones concéntricas de los montos estimados en torno a las estaciones.

La información para la aplicación de este método no va más allá de poseer la ubicación exacta de los puntos de medición, además de la información pluvial. Entre los inconvenientes que se vislumbran, está el que sólo considera distancias, pero no direccionalidad de la precipitación, la cual a su vez puede ser influida por condiciones tanto del terreno como atmosféricas. Además, su estimación va a depender en forma importante, de la separación que tengan las estaciones en la respectiva zona.

Pizarro y Ramírez (2000), señala que este método divide la cuenca o área de estudio en celdas, considerando que la precipitación dentro de una celda sin medida, es una función de la precipitación de las celdas próximas que poseen medidas y del inverso de la distancia que las separa elevada al cuadrado (UNESCO, 2006).

$$P_{mj} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * (1/D_i^2)}{\sum_{i=1}^n (1/D_i^2)} \quad [7.9]$$

Donde

P_{mj} Precipitación media del área en el periodo j (mm)

- P_{ij} Precipitación de la estación i en el espacio j (mm)
 D_i Distancia entre estación y celda correspondiente (km)

7.5 Norma Oficial Mexicana 011-CONAGUA-2015

La NOM-011 (CONAGUA, 2015) propone un método indirecto en caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información de registros hidrométricos o ésta sea escasa, para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural denominado: precipitación-escurrimiento. El cual se define mediante la siguiente expresión:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{VOLUMEN ANUAL DE} & & & & & & \\ \text{ESCURRIMIENTO NATURAL} & = & \text{PRECIPITACIÓN ANUAL} & * & \text{ÁREA DE LA} & * & \text{COEFICIENTE DE} \\ \text{DE LA CUENCA} & & \text{DE LA CUENCA} & & \text{CUENCA} & & \text{ESCURRIMIENTO} \end{array} \quad [7.10]$$

7.5.1 Precipitación anual en la cuenca

La información pluviométrica de la cuenca deberá abarcar un periodo mínimo de 20 años. En caso de que falten datos de un máximo de 5 años para completar el periodo, el usuario calculará dichos años faltantes mediante algún método que apruebe la Comisión Nacional del Agua. La precipitación anual deberá determinarse a partir del análisis de los registros de las estaciones ubicadas dentro y vecinas a la cuenca, mediante el método de Polígonos de Thiessen o Isoyetas (CONAGUA, 2015).

7.5.2 Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento se determinará en función del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual de la cuenca en estudio (CONAGUA, 2015), a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{array}{l} \text{Si } K \leq 0.15 \quad C_e = K \left[\frac{(P - 250)}{2000} \right] \\ \text{si } K > 0.15 \quad C_e = K \left[\frac{(P - 250)}{2000} \right] + \left[\frac{(K - 0.15)}{1.5} \right] \end{array} \quad [7.11]$$

P= Precipitación anual, en mm.

Rango de validez. Las fórmulas se considerarán válidas para valores de precipitación anual entre 350 y 2150 mm.

La evapotranspiración está incluida en el coeficiente de escurrimiento.

7.5.2.1 Parámetro K

A falta de información específica, con apoyo en los servicios del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, en tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables), y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 3 y al tomar en cuenta el uso actual del suelo, se obtiene el valor del parámetro K (CONAGUA, 2015).

K Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo.

Tabla 7.3. Valores de K
Fuente: NOM-011-CONAGUA-2015

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas		
USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:			
En Hileras	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,24	0,27	0,30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco	0,14	0,20	0,28
Del 50 al 75% - Regular	0,20	0,24	0,30
Menos del 50% - Excesivo	0,24	0,28	0,30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 25 al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,30
Zonas urbanas	0,26	0,29	0,32
Caminos	0,27	0,30	0,33
Pradera permanente	0,18	0,24	0,30

Si en la cuenca en estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas.

Este procedimiento se puede realizar con Sistemas de Información Geográfica (GIS) mediante mapas con formato raster. Es necesario conocer los diferentes usos y tipos de suelo que se tiene en la cuenca, para ello se utilizan los conjuntos de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación así como tipo de suelo, que proporcionan bases de datos como INEGI, el cual presenta cartas escala 1:250 000 los cuales contienen información obtenida a partir de la aplicación de técnicas de fotointerpretación con imágenes de satélite Landsat TM5 apoyadas con trabajos de campo. Los conjuntos de datos contienen la ubicación, distribución y extensión de diferentes comunidades vegetales y usos agrícolas con sus respectivas variantes en tipos de vegetación, de usos agrícolas, e información ecológica relevante.

Con estas cartas se hará un recorte de la zona en estudio, pudiendo tener una gran variedad de usos y vegetación en el suelo, lo cual depende de la magnitud de la zona; para el caso del tipo de suelo la NOM-011-CNA-2015 menciona tres tipos mostrados en la tabla 3, los cuales se clasifican como A, B y C.



Figura 7.1. Ejemplo de mapa de usos de suelo y vegetación.

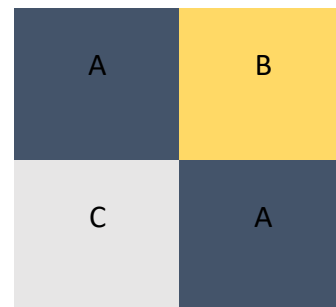


Figura 7.2. Ejemplo de mapa de tipo de suelo de acuerdo a la clasificación NOM-011-CONAGUA-2015.

Donde:
USV_n Uso de suelo y vegetación n

Teniendo estos dos mapas de polígonos (en formato shape) se hará un mapa con formato RASTER, para cada uso de suelo, asignando valor unitario en las celdas de uso de suelo y valor nulo en el resto de las celdas, resultando tantos mapas de combinación binaria como n tipos de uso y vegetación de suelo se tengan. Esto con el objeto de generar mapas exclusivos para cada uso de suelo y vegetación. En si lo que se hace en esta etapa es fragmentar los usos de suelo y vegetación.

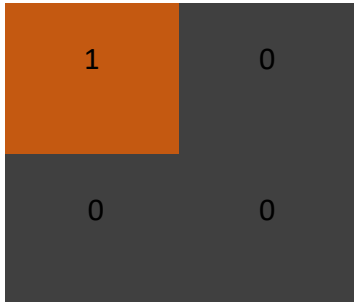


Figura 7.3. Mapa de USV₁

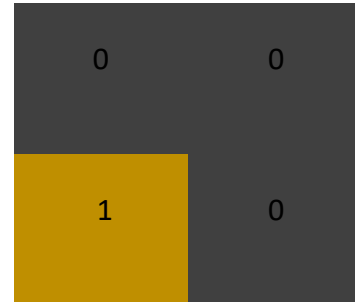


Figura 7.5. Mapa de USV₃

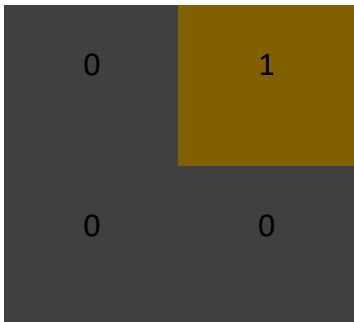


Figura 7.4. Mapa de USV₂

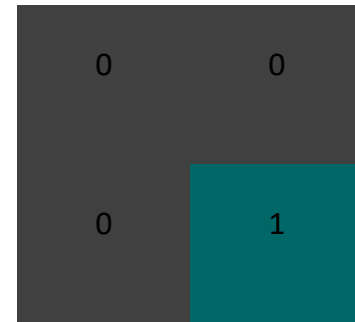


Figura 7.6. Mapa de USV₄

Con base en el mapa SHAPE de tipo de suelo, se hará un mapa con formato RASTER reclasificando con valores de 1, 2 y 3 para los tipos de suelo A, B y C respectivamente.

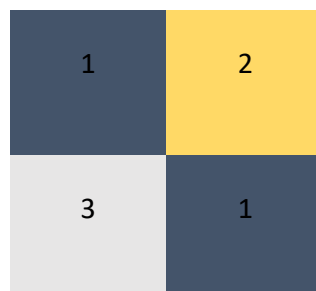


Figura 7.7. Mapa tipo de suelo en valores

El mapa resultante se muestra en la figura 7.7 el cual se multiplicará con cada uno de los mapas de las figuras 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6, con el objetivo de obtener en que zona de tipo de suelo se encuentra determinado tipo de uso y vegetación de suelo. Los cuales resultan como se muestra en las figuras 7.8, 7.9, 7.10 y 7.11.

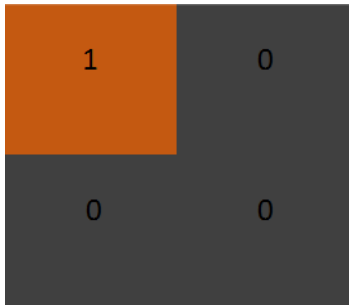


Figura 7.8. Mapa USV_1 x tipo de suelo

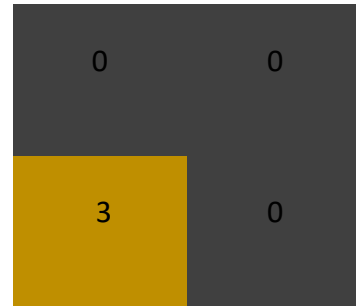


Figura 7.10. Mapa USV_3 x tipo de suelo

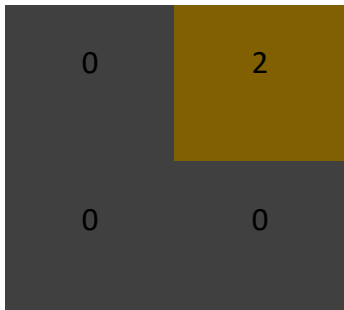


Figura 7.9. Mapa USV_2 x tipo de suelo

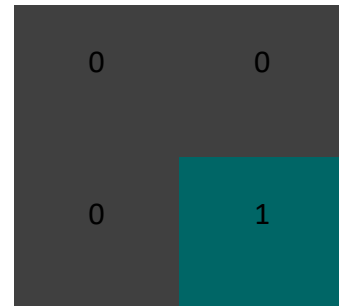


Figura 7.11. Mapa USV_4 x tipo de suelo

Una vez obtenidos estos mapas, se reclasificarán los valores, con los correspondientes a los de la tabla 7.3, resultando así el valor de K para cada tipo de uso y vegetación, así como la zona de tipo de suelo. Se hará una suma de estos mapas, sobre poniendo los valores en los nullos quedando así un mapa general de K.

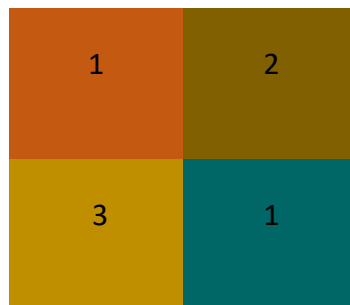


Figura 7.12. Mapa de K

Para obtener el valor ponderado se cumplirá la siguiente relación:

$$K = \frac{\sum A_i * K_i}{\sum A_i} \quad [7.12]$$

Donde:

A_i Área de cada zona
 K_i Factor K de cada zona

7.5.3 Metodologías de aplicación NOM-011-CONAGUA-2015

Para aplicar la NOM se utilizarán tres metodologías, dos mediante el uso de SIG y la tercera mediante la obtención de polígonos de Thiessen.

7.5.3.1 Homogenización mediante isolíneas de coeficiente de escurrimiento y precipitación.

Se obtendrá la precipitación anual y el coeficiente de escurrimiento para cada estación climatológica; hecho esto se generarán mapas en formato raster de isolíneas de precipitación en mm y otro de isolíneas de coeficiente de escurrimiento, ambos para cada año de la serie. Las isolíneas (Madrid & Ortiz, 2005), son líneas que unen puntos de igual valor. Dichos puntos provienen de mediciones y de interpolaciones de las mismas. Tratándose de variables climáticas, cada punto puede representar una estación meteorológica con una ubicación espacial precisa, en la que se pueden obtener los valores medios de temperatura, precipitación, humedad, radiación solar, nubosidad, etc. Sin embargo, cada uno de estos datos no sería suficiente para trazar las isolíneas, se habla entonces de interpolar, como un proceso para determinar “valores no conocidos a partir de valores conocidos”, según Barrera (1999).



Figura 7.13. Islíneas precipitación

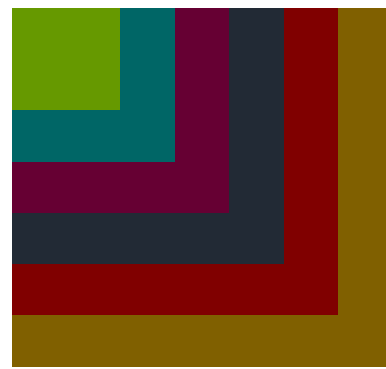


Figura 7.14. Islíneas coeficiente de escurrimiento

Mediante operación de mapas se hará el producto de los dos mapas anteriores, siendo necesario que las celdas de ambos tengan el mismo tamaño se multiplican por el área de celda, la disponibilidad hídrica anual resultará como la suma de todas las celdas del mapa RASTER resultante.

7.5.3.2 Rasterización del coeficiente de escurrimiento

Se utiliza el mapa RASTER de isólinas de precipitación descrito en la sistemática anterior, a éste en conjunto con el mapa tipo RASTER de parámetro K, se le aplicará la ecuación para coeficiente de escurrimiento, mediante operación de mapas, fijando la condicionante que limita al el valor de K, en una sola operación. Lo que resulta en la siguiente expresión:

$$\text{Con}("k" > 0.15, ("k" * ("P" - 250) / 2000) + ("k" - 0.15) / 1.5), ("k" * ("P" - 250) / 2000))$$



Figura 7.15. Mapa de K



Figura 7.16. Isólinas precipitación

Al aplicar la operación de mapas se obtendrá un mapa RASTER con un valor de coeficiente de escurrimiento para cada celda.

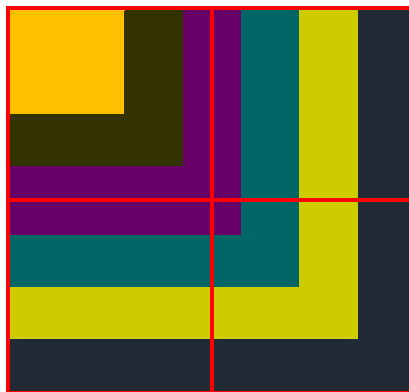


Figura 7.17. Mapa formato raster de coeficiente de escurrimiento

Este mapa se le aplica la misma condición del método anterior, multiplicar el mapa de coeficiente de escurrimiento por el de precipitación y el área de celda, resultando un mapa RASTER de disponibilidad hídrica por celda, al sumar todas las celdas se obtiene la disponibilidad hídrica total anual.

7.5.3.3 Polígonos de Thiessen.

En esta sistemática se obtendrá la disponibilidad hídrica anual mediante la creación de polígonos de Thiessen sobre las estaciones climatológicas que influyen en la cuenca, se dividirá la zona de estudio en la forma de los polígonos y se aplicará la ecuación de disponibilidad hídrica para cada área resultante, tomando una precipitación y un coeficiente de escurrimiento uniforme para cada zona, correspondiente a la estación climatológica que influye; el valor de K se tomará como una constante ponderada para toda la cuenca.

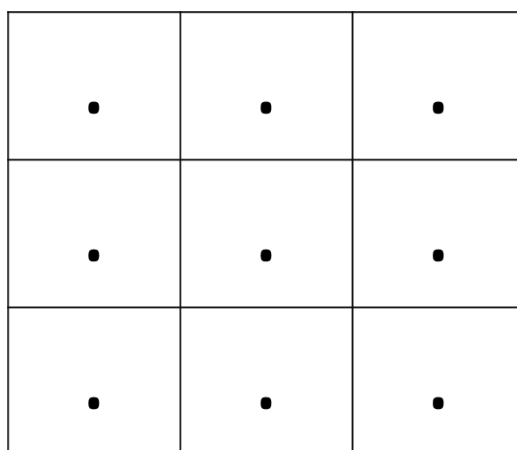


Figura 7.18. Polígonos de Thiessen

donde

- Estación climatológica
- Polígono de Thiessen

Se sumará la disponibilidad hídrica de todas las zonas, para así obtener la total anual, este proceso se aplica a todos los años de la serie.

7.6 Modelo hidrológico HBV

El modelo hidrológico HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de fusión y acumulación de nieve, un módulo de humedad del suelo y precipitación efectiva, un módulo de evapotranspiración y por último un módulo de estimación de escorrentía (Paredes et al., 2014). El modelo puede ejecutarse a escala temporal diaria o mensual y los datos de entrada necesarios incluyen: series de precipitación y temperatura observadas en cada paso de tiempo y estimaciones a largo plazo de la temperatura y evapotranspiración media mensual.

7.6.1 Rutinas del modelo HBV

7.6.1.1 Módulo de humedad del suelo

La precipitación caída sobre una cuenca se divide en dos componentes: La primera componente constituye el almacenamiento como humedad en el suelo del agua capilar disponible para evapotranspiración (SM); la segunda contribuye a la escorrentía subterránea. Esta segunda componente (infiltración) es estimada basándose en el contenido de humedad del suelo en el momento en que se produce la precipitación.

Para este proceso se define dos parámetros: la capacidad de campo (FC) es el parámetro que limita el contenido máximo de humedad en el suelo en la zona superficial; el segundo parámetro (β) es un parámetro adimensional que modifica el porcentaje de filtración para el mismo grado de humedad relativa en el suelo.

La siguiente ecuación calcula la precipitación efectiva en función del contenido existente de humedad del suelo.

$$Inf_t = \left(\frac{SM_{t-1}}{FC} \right)^\beta P_t \quad [7.13]$$

donde

Inf	Infiltración efectiva [L]
SM	humedad del suelo [L]
FC	máxima capacidad de almacenamiento del suelo (capacidad de campo) [L]

β coeficiente de forma (parámetro del modelo) [-]

Dado un déficit de humedad del suelo (medido por el ratio SM/FC), el parámetro β controla la cantidad de agua que contribuye a la escorrentía.

7.6.1.2 Módulo de evapotranspiración

En el módulo de evapotranspiración se calcula en base a la humedad en el suelo y la evapotranspiración potencial. La evapotranspiración real será igual a la potencial o un valor reducido calculado mediante el parámetro de punto de marchitez del suelo (PWP).

$$ETr_t = ETP_t \left(\frac{SM_t}{PWP} \right) \quad \text{si } SM_t < PWP \quad [7.14]$$

$$ETr_t = ETP_t \quad \text{si } SM_t > PWP \quad [7.15]$$

El punto de marchitez es un límite de humedad del suelo por debajo del cual la evapotranspiración real es menor que la potencial con una reducción en el desarrollo de las plantas.

7.6.1.3 Balance de humedad en el suelo

La humedad en el suelo resultante (SM) después de incorporar la precipitación y descontar la filtración y la evapotranspiración

$$SM_t = SM_{t-1} + P_t - ETr_t - Inf_t \quad [7.16]$$

Si la precipitación P_t fuera muy elevada, este balance podría dar como resultado un valor de SM superior a FC. En este caso el exceso se asigna como escorrentía directa.

$$\text{Si } SM_t > FC \left[\begin{array}{l} Qs_t = SM_t - FC \\ SM_t = FC \end{array} \right] \quad [7.17]$$

donde:

Qs representa el escurrimiento superficial.

7.6.1.4 Cálculo del escurrimiento subsuperficial

El flujo subsuperficial se modela mediante dos funciones de descarga. Una descarga rápida (Q_0) que se activa cuando el almacenamiento en el suelo (S_1) supera un mínimo (L_m) y se define por un parámetro K_0

$$\begin{aligned} Q_{0t} &= K_0(S_{1t-1} - L_m) & \text{si } S_{1t-1} > L_m \\ Q_{0t} &= 0 & \text{si } S_{1t-1} < L_m \end{aligned} \quad [7.18]$$

y una descarga lenta (Q_1) que se regula por el parámetro K_1

$$Q_{1t} = K_1 * S_{1t-1} \quad [7.19]$$

Por último, esta celda tiene una descarga por percolación (Q_{perc}) que alimente la celda de almacenamiento profundo, y se regula con el parámetro K_{perc} .

$$Q_{perc_t} = K_{perc} * S_{1t-1} \quad [7.20]$$

Tras determinar los flujos anteriores se calcula el balance de humedad en la celda subsuperficial como:

$$S_{1t} = S_{1t} + Inf_t - Q_{0t} - Q_{1t} - Q_{perc_t} \quad [7.21]$$

El balance anterior podría resultar negativo si la suma de ($K_0 + K_1 + K_{perc}$) fuera superior a la unidad. En tal caso S_{1t} se asignaría como 0 y se daría un error de balance. Es responsabilidad del usuario definir los parámetros apropiados. Para asegurar que el proceso de escorrentía es el más rápido, el valor de K_0 debe ser siempre mayor que K_1 .

7.6.1.5 Cálculo del balance y el escurrimiento subterráneo

Para la simulación de la escurrimiento subterráneo se utiliza un modelo de celda como en el caso anterior, aunque con un solo parámetro de descarga (K_2) calculándose el drenaje subterráneo (Q_2) como:

$$Q_{2t} = K_2 * S_{2t-1} \quad [7.22]$$

y el balance en esta celda se cerraría con

$$S_{2t} = S_{2t-1} + Q_{pert_t} - Q_{2t} \quad [7.23]$$

La respuesta de esta celda (Q2) debe ser más lenta que la primera, por lo que K₂ debería ser menor que K₁.

7.6.1.6 Cálculo del escurrimiento total

El escurrimiento o aportación total se calcula como la suma de las escorrentías generadas en cada uno de los módulos anteriores. Estos aportes han sido todos calculados en unidades de [mm] por lo que el caudal o volumen final de aportación se obtiene multiplicando por la superficie de la cuenca (A).

$$Q_t = (Q_{S_t} + Q_{0_t} + Q_{1_t} + Q_{2_t}) * A \quad [7.24]$$

La tabla 7.4 muestra un resumen de los parámetros del modelo. Además es necesario definir las condiciones iniciales que son la humedad inicial del suelo (SM0) y los almacenamientos iniciales de ambos tanques (S10 y S20).

Tabla 7.4. Parámetros del modelo lluvia-escurrimiento HBV
Fuente: Paredes, et al., 2014

PARÁMETROS DEL MODELO LLUVIA-ESCURRIMIENTO HBV				
Zona	Parámetro	Descripción	Unidad	Rango
Suelo	FC	Capacidad de campo	mm	50-1000
	β	Coefficiente de forma para la infiltración	-	1.0 – 3.0
	PWP	Punto de marchitez de la vegetación	mm	20 – 800
Celda Subsuperficial	Lmax	Umbral de descarga rápida (tanque superior)	mm	5 – 50
	K0	Coefficiente de descarga rápida (tanque superior)	día-1	0.10 – 0.50
	K1	Coefficiente de recesión (tanque superior)	día - 1	0.01 – 0.40
Celda profunda	Kperc	Coefficiente de percolación	día - 1	0.01 – 0.50
	K0	Coefficiente de descarga rápida (tanque superior)	día - 1	0.01 – 0.10
Celda de nieve	TT	Umbral de temperatura máxima	°C	-2.0 – 2.0
	DD	Factor grado-día	mm/°C*t	0 – 100

Además, estos parámetros deberán cumplir algunas condiciones como las siguientes:

- PWP no debería ser mayor que FC.

- Los coeficientes K_0 , K_1 , K_2 y K_{perc} no pueden ser mayores que 1,
- Además, debería cumplirse que $K_0 > K_1 > K_2$.
- Si la suma de $K_0+K_1+K_{perc}$ es mayor que 1 existe el riesgo de generar un error de balance.

De la estructura del modelo se extrae la influencia que tienen los parámetros en la generación de escorrentía:

- ⇒ Los parámetros de humedad en el suelo (FC , PWP y β) determinan la evapotranspiración real y por tanto la escorrentía total generada.
- ⇒ El parámetro β es el factor determinante de la infiltración. Un valor más bajo aumenta la filtración al nivel subsuperficial.
- ⇒ El resto de parámetros regulan la descarga subterránea, y si son definidos correctamente, K_0 y Lm determinan la descarga rápida y el resto (K_1 , K_{perc} y K_2) regulan la descarga a más largo plazo y la curva de recesión del río a largo plazo.

7.6.2 Herramienta de modelación EVALHID

La modelación del escurrimiento se desarrollará bajo las ecuaciones del modelo HBV, no obstante, este modelo se encuentra incorporado dentro de un software desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia, llamado evaluación de los recursos hídricos, conocido por sus siglas EVALHID, el cual es un módulo informático para el desarrollo de modelos lluvia-escurrimiento en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida. Este programa está integrado dentro del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL para el desarrollo de modelos relativos a la planificación y gestión de recursos hídrico. Tiene integrados varios modelos matemáticos disponibles, los cuales son el modelo de Témez (Témez, 1977), el modelo HBV (Bergström, 1995), el modelo Sacramento (Burnash et al., 1973), el modelo GR4J (Perrin et al., 2003), el modelo GR2M y el modelo AWB. (Paredes, 2010).

El modelo que se utilizará el de tipo semidistribuido conceptual, lo cual quiere decir que una cuenca que va a ser modelada se subdivide en subcuencas y en cada subcuenca se plantea uno de los modelos disponibles en el programa. Para cada subcuenca a modelar es necesario datos de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y la superficie de la subcuenca. Si se quiere desarrollar un modelo de nieve es necesario disponer de series temporales de la temperatura del aire. Como es obvio las series temporales deben de ser del mismo período. En general, también es necesaria la disponibilidad de datos aforados, restituidos a régimen natural, que permitan la calibración de los parámetros del modelo. Estos datos observados no son indispensables para la simulación del modelo. A continuación, se muestra un esquema general de los procesos datos de entrada y salida que son necesarios y generados por la herramienta EVALHID.

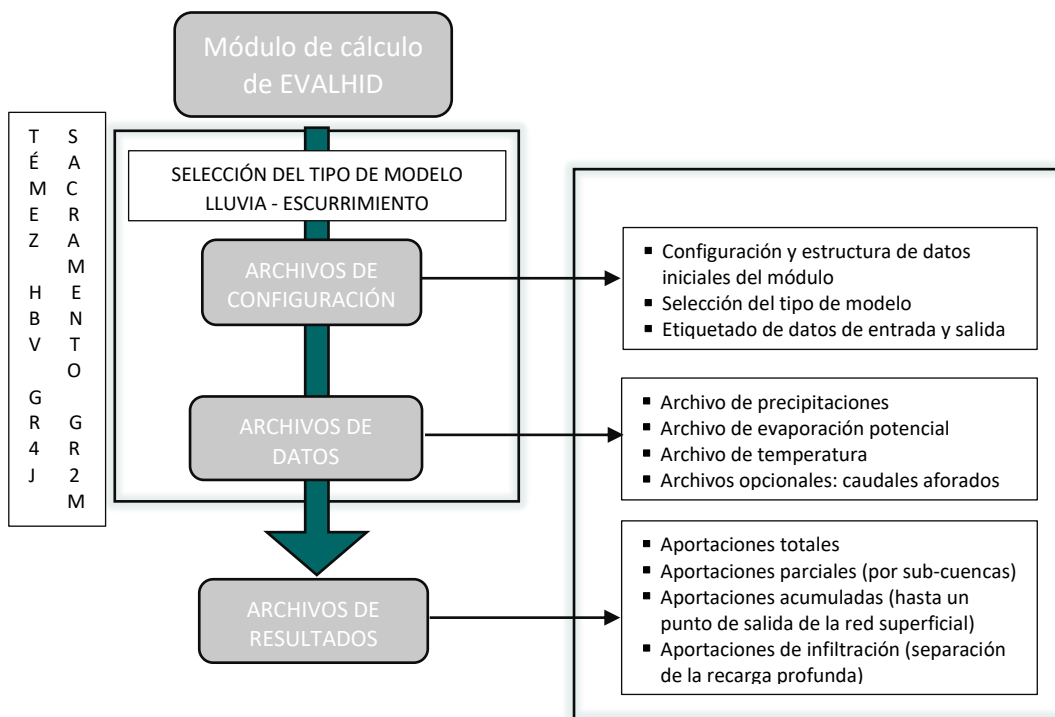


Figura 7.19. Procesos generales de la herramienta EVALHID

7.6.3 Calibración del modelo

La calibración es un esfuerzo para parametrizar un modelo mejor para un conjunto dado de condiciones locales, lo que reduce la incertidumbre de predicción. La calibración del modelo se realiza mediante una cuidadosa selección de valores para los parámetros de entrada del modelo (dentro de sus respectivos rangos de incertidumbre) mediante la comparación de las predicciones del modelo (de salida) para un conjunto dado de condiciones contraídas con los datos observados para las mismas condiciones (Arnold, et al., 2012).

7.6.3.1 Algoritmo de calibración SCE-UA

Los algoritmos de calibración son métodos que ayudan a mejorar y perfeccionar los parámetros de los modelos, mediante el uso de diferentes metodologías de búsqueda como directa, por gradiente, aleatoria, algoritmos de inicio múltiple o mezcla de grupos, ejemplos de ellos lo son el algoritmo de Hookes & Jeeves, Rosenbrock, Simplex y uno de los más completos y conocidos el SCE-UA aquí tratado.

El algoritmo de calibración SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) es un método de optimización global desarrollado en la Universidad de Arizona en 1992 (Duan, et al., 1992, 1993, 1994) robusto, flexible y eficiente para la calibración de modelos precipitación-escorrentía. Fue diseñado específicamente para lidiar con las peculiaridades encontradas en la calibración de modelos conceptuales de cuencas y puede ser utilizado para manejar problemas de optimización no lineal con elevados parámetros (Duan, et al., 1994). El objetivo es encontrar el mejor conjunto de parámetros para la función objetivo en el espacio factible, iniciando con una muestra aleatoria de puntos distribuidos por todo ese espacio y usa una adaptación del esquema de búsqueda del Simplex Downhill (Nelder & Mead, 1965) llamado CCE (Competitive Complex Evolution) para evolucionar continuamente la población hacia mejores soluciones en el espacio de búsqueda, renunciando progresivamente a la ocupación de regiones con una menor probabilidad (Mariani & dos Santos Coelho, 2011).

Parte de diferentes puntos de búsqueda (individuos) que se organizan por equipos (complex). De esta manera, la búsqueda de la solución global óptima se plantea como un

proceso evolutivo (evolution) basado en tres pasos, la reflexión, contracción y mutación, existiendo además mezcla de equipos (shuffled) (Lerma, 2013).

El proceso de calibración implica el uso de funciones objetivo para llegar a un valor que indique si la calibración es aceptable, una función objetivo es una ecuación que se emplea para obtener una medida numérica de la diferencia entre la respuesta simulada por el modelo (en el caso de los modelos lluvia-escurrimiento, los caudales en régimen natural) y la respuesta observada (medida) en la cuenca. El propósito de la calibración automática de modelos es, por tanto, “encontrar aquellos valores de los parámetros del modelo que optimicen (minimicen o maximicen, según el caso) el valor numérico de la función objetivo” (Casas Mas, 2013). El algoritmo SCE-UA evalúa gran cantidad de combinaciones de valores de parámetros para encontrar el mejor ajuste entre los datos observados y simulados. Este ajuste se evalúa maximizando una función objetivo de entre las siguientes:

$$F_1 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad [7.25]$$

$$F_2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [\ln(Q_{sim}(t)) - \ln(Q_{obs}(t))]^2}{\sum_{t=1}^n [\ln(Q_{obs}(t)) - \overline{\ln(Q_{obs}(t))}]^2} \quad [7.26]$$

$$F_3 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})(Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad [7.27]$$

$$F_4 = 1 - \left[\max \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}; \frac{\bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{sim}} \right) - 1 \right]^2 \quad [7.28]$$

Donde $Q_{sim}(t)$ y $Q_{obs}(t)$ son el flujo simulado y observado, respectivamente, en el intervalo de tiempo t , n es el número de meses de la calibración, y la barra alta denota el valor medio.

F_1 es el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS), un error cuadrático medio que da mayor peso a los errores grandes, que a menudo, pero no siempre, suceden durante períodos de flujo elevado. El valor de NS varía de -1 a 1. Un valor de NS=1 significa que el ajuste es perfecto. Un valor de NS=0 significa que el error es del mismo orden de magnitud que la

varianza de los datos observados, por lo que la media de los datos observados tendría una capacidad de predicción similar al modelo. Valores inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo que implica el mal funcionamiento del modelo.

F_2 es el coeficiente de Nash-Sutcliffe de la transformación logarítmica del flujo (ln NS), que da mayor peso a los errores durante flujos escasos. Para reducir el problema de las diferencias cuadráticas y la consecuente sensibilidad a valores extremos, el coeficiente NS se calcula con valores logarítmicos de los valores observados y simulados. Mediante esta transformación logarítmica del flujo, los picos se achatan y los valores más bajos se mantienen más o menos al mismo nivel. Como consecuencia, la influencia de los valores de flujo escaso se incrementa en comparación con los picos de flujo y por tanto aumenta la sensibilidad del ln NS a las sobre-o infravaloraciones sistemáticas del modelo.

F_3 es el coeficiente de correlación de Pearson, que mide la covariabilidad de valores observados y simulados sin penalización por sesgo. El valor del coeficiente varía entre -1 y 1 . El coeficiente r toma el valor de 1 , momento denominado de correlación completa positiva, cuando los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente positiva, con x e y aumentando conjuntamente. El valor 1 es independiente de la magnitud de la pendiente. En cambio si los puntos de datos describen una perfecta línea recta con pendiente negativa, con y decreciendo cuando x aumenta, el coeficiente r toma el valor de -1 , momento denominado de correlación completa negativa. Un valor de r cercano a cero indica que las variables x e y no están correlacionadas linealmente.

F_4 es una medida de la simetría del ajuste entre la simulación media y la observación media.

7.6.4 Validación del modelo

La validación del modelo es el proceso de demostrar que un modelo específico en un sitio dado es capaz de hacer simulaciones suficientemente precisas, aunque "suficientemente precisa" puede variar en función de los objetivos del proyecto (Refsgaard, 1997). Validación

implica la ejecución de un modelo utilizando los parámetros que se determinaron durante el proceso de calibración, y la comparación de las predicciones en los datos observados no utilizados en la calibración (Arnold, et al., 2012). En general, un buen modelo de calibración y validación deberán incluir:

- Los datos observados que incluyen mojado, promedio, y años secos (Gan, et al., 1997).
- La calibración de todos los componentes a ser evaluados.
- En los métodos generales, gráficos y estadísticos con algún tipo de criterios estadísticos se utilizan objetivos para determinar cuando el modelo ha sido calibrado y validado.

En base a la revisión de las solicitudes de modelos y métodos de evaluación, Moriasi et al. (2007) recomienda tres estadísticas cuantitativas para validación de datos, la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS), y la proporción del error cuadrático medio de la desviación estándar de los datos medidos (RSR) los cuales, indica que pueden ser utilizados en la evaluación de desempeño de los modelos de simulación de cuencas y evaluación de caudales.

Tabla 7.5. Indicadores de ajuste, Fuente: Moriasi et. al., 2007

Clasificación de rendimiento	RSR	NSE	Streamflow
Muy bueno	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 \leq NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Bueno	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfactorio	$0.00 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfactorio	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Una vez validado y calibrado el modelo se pueden generar series de escurrimiento para cualquier escala de tiempo en la zona de estudio.

7.7 Análisis de resultados

Como etapa final de la metodología, es necesario generar conclusiones sobre la investigación desarrollada tales como la evaluación de la hipótesis inicial, haber dado

cumplimiento a los objetivos, evaluar resultados de las dos metodologías; para esto se empleará el uso de gráficos comparativos que describan de manera precisa los resultados, así como valores estadísticos que relacionen en diferencias porcentuales los datos resultantes de los modelos lluvia-escurrimiento.

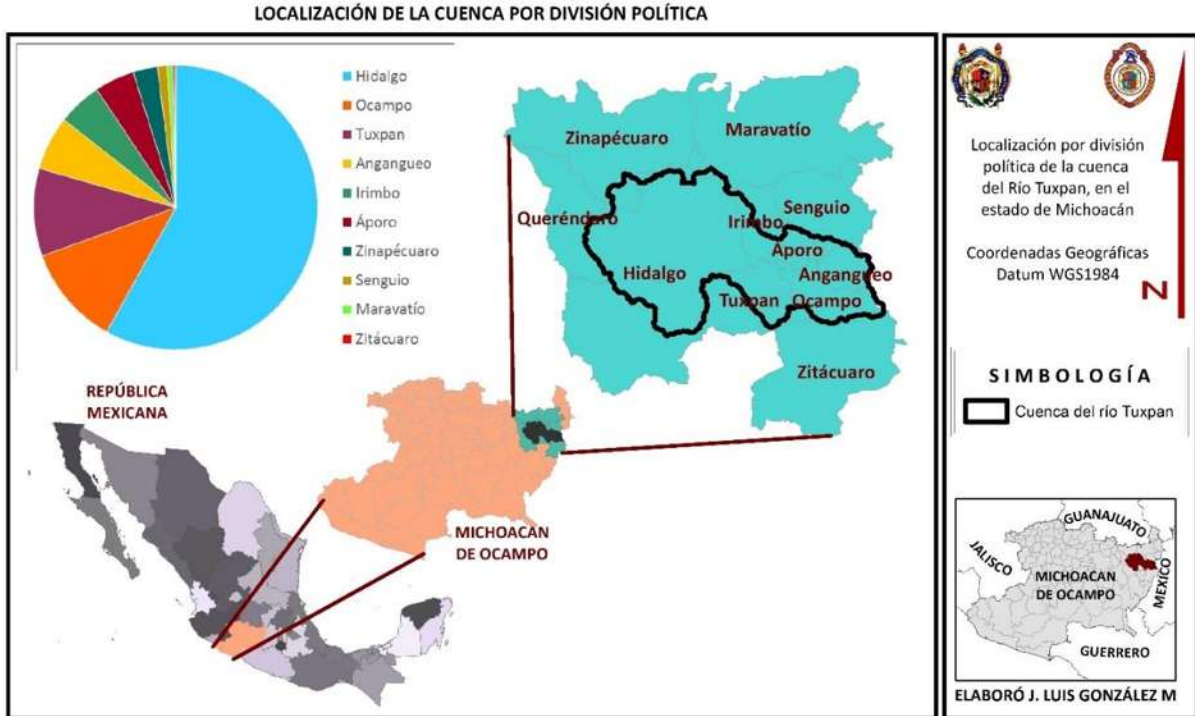
8. RESULTADOS

Con el fin de lograr los objetivos planteados en esta tesis se desarrolló la metodología descrita en una zona específica, en este capítulo se hará el vaciado de la información obtenida. Se presentará la caracterización de la zona de estudio, los resultados de la modelación mediante la NOM-011-CONAGUA-2015 y los resultados del modelo hidrológico HBV, mediante el uso de mapas, gráficos, tablas, diagramas, datos y lo necesario para la correcta descripción e interpretación del contenido.

8.1. Caracterización de la zona de estudio

El análisis económico, político y social para una cuenca, permite resaltar aspectos importantes que llevan al modelador a conocer y a entender el funcionamiento total de la zona para tomar las decisiones más adecuadas durante el proceso de modelación. Como primer aspecto se detalla la localización del sitio en estudio de acuerdo a la división política de los Estados Unidos Mexicanos.

La Cuenca se ubica en el estado de Michoacán, abarcando los municipios de Hidalgo, Ocampo, Tuxpan, Irimbo, Maravatío, Zinapécuaro, y porciones muy pequeñas de los municipios de Maravatio, Senguio y Zitácuaro. (Ver figura 8.1)



En México existen 314 cuencas, integradas en 37 grupos, que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) maneja en 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA), con un Organismo de Cuenca en cada una. La cuenca del río Tuxpan se encuentra en la RHA número 4, que lleva por nombre Balsas.

Una RHA está integrada por varias Regiones Hidrológicas (RH), en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos. La zona en estudio pertenece a la RH número 18, que también lleva el nombre de Balsas, específicamente en la región Medio Balsas (García L. R., 2015).

La cuenca del Río Tuxpan se ubica en el sistema hidrológico nacional en la parte denominada subcuenca del río Tuxpan, al oriente del Estado de Michoacán, (figura 8.2).



Figura 8.2. Localización de la cuenca por región hidrológica

De acuerdo a la división por carta topográfica escala 1:50,000 que proporciona el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI); la cuenca abarca parte de las cartas E14A24, E14A25, E14A26, E14A14 y E14A15. Se extiende entre los paralelos 19° 30' y 19° 50' de latitud norte y los meridianos 100° 10' y 100° 50' de longitud oeste de Greenwich, como se muestra en la figura 8.3.

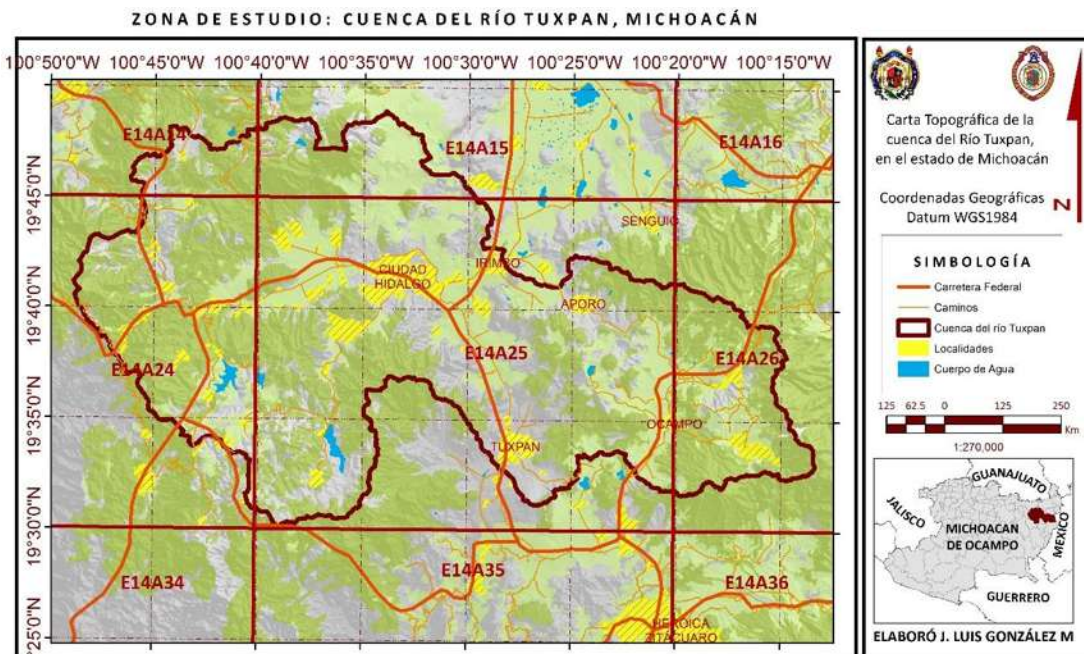


Figura 8.3. Zona de estudio: cuenca del Río Tuxpan, Michoacán

La parte alta de la cuenca alcanza hasta 3,640 msnm y la parte baja, ubicada en el municipio de Tuxpan, se eleva a 1,260 msnm en su punto más bajo, por lo que se tiene un desnivel máximo en la cuenca de 2,380 m (ver mapa de relieve de la cuenca, figura 8.4). Cubriendo una extensión de 1,197km².

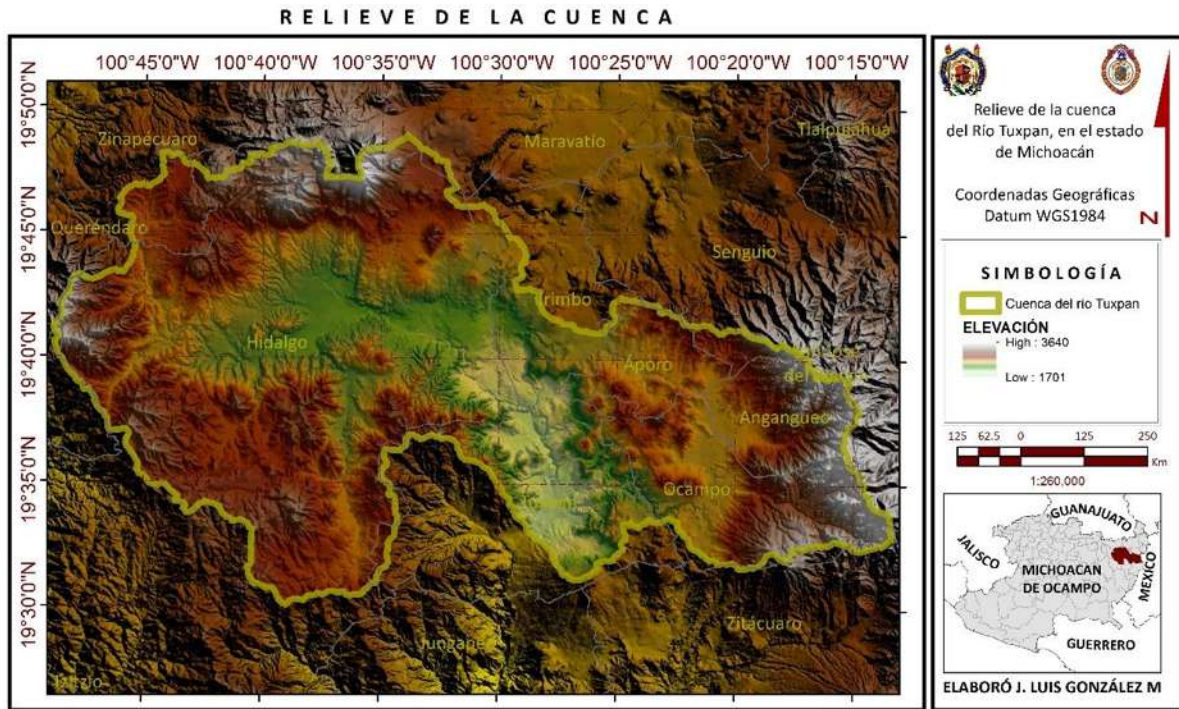


Figura 8.4. Relieve de la cuenca

Respecto a la hidrografía, se tienen principalmente el río Tuxpan, río Angangueo y río Puerco; existen cuerpos de agua como: La Lagunita, Laguna Verde, Bordos los Ajolotes; también se tienen presas como La Sabaneta, Pucuat, Mata de Pinos, Ricardo J. Zevada, y aguas abajo del punto de salida de la cuenca se encuentra la Presa Tuxpan. (Ver Figura. 8.5 y 8.6). En lo que respecta a las aguas subterráneas, México está dividido en 653 acuíferos, la cuenca se encuentra dentro del acuífero Ciudad Hidalgo-Tuxpan (Ver figura 8.7).

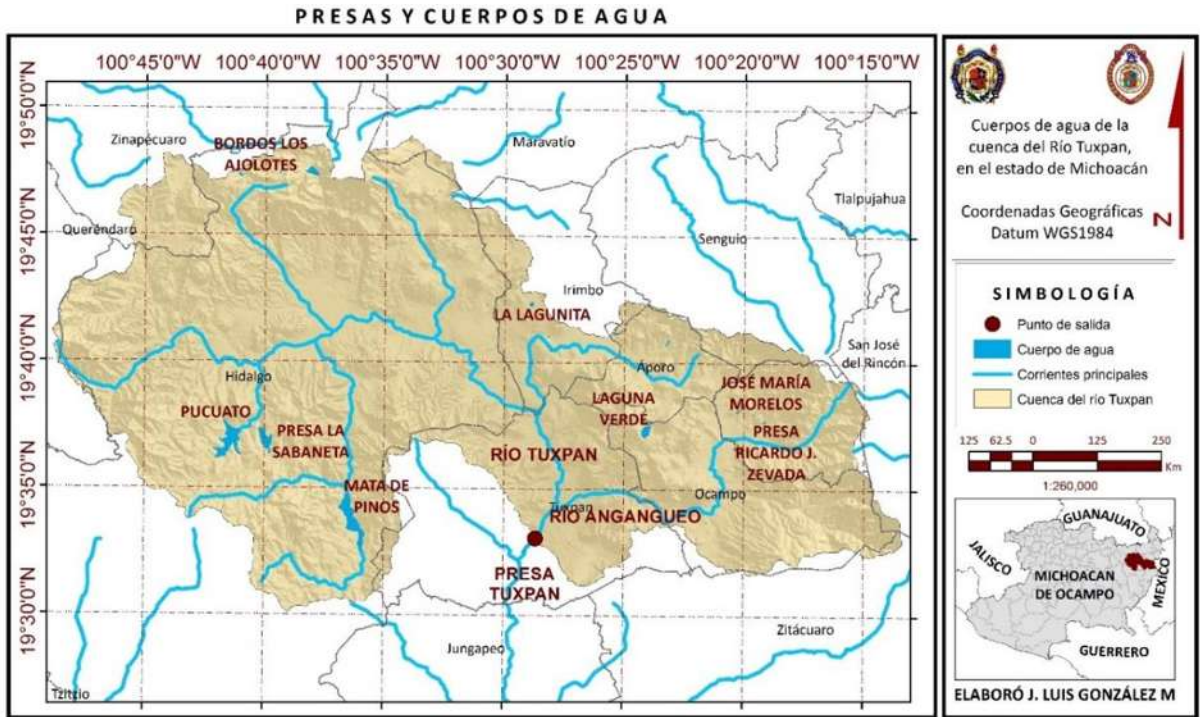


Figura 8.5. Presas y cuerpos de agua

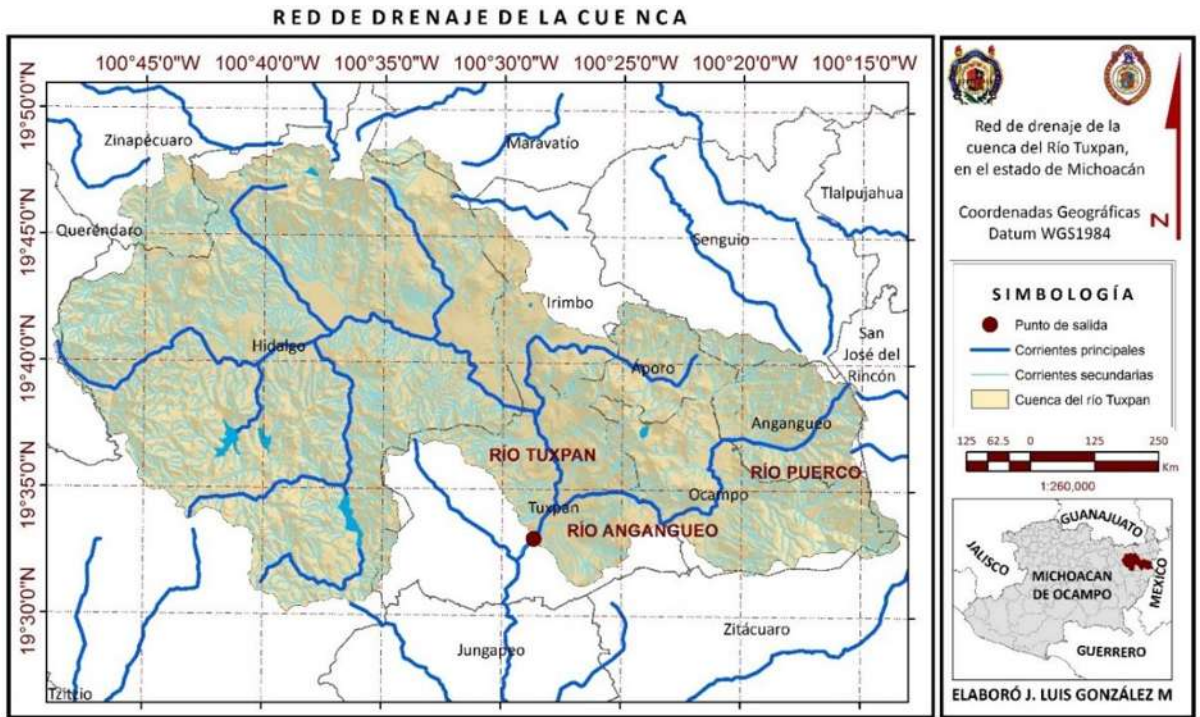


Figura 8.6. Red de drenaje de la cuenca



Figura 8.7. Relieve en la cuenca

La zona en estudio presenta en las partes de mayor altitud zonas de bosque, abarcando el 59% de la superficie, de los cuales el 6% es bosque de oyamel; también en la parte oeste de la cuenca se tienen pequeñas porciones de pastizales que representan el 4% de la extensión, en la parte central de la cuenca donde la altitud disminuye a zonas medias y bajas el 36% del terreno se usa para fines agrícolas. Como zona urbana solo se considera el 1% del área, correspondiente a Ciudad Hidalgo, debido a que las otras localidades son consideradas rurales o mixtas. (Ver figura 8.8)

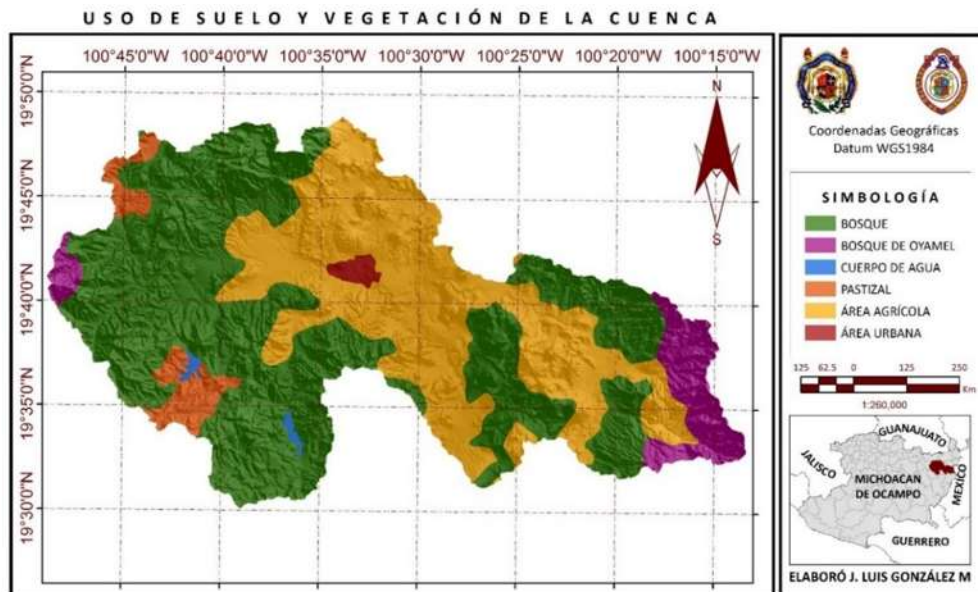


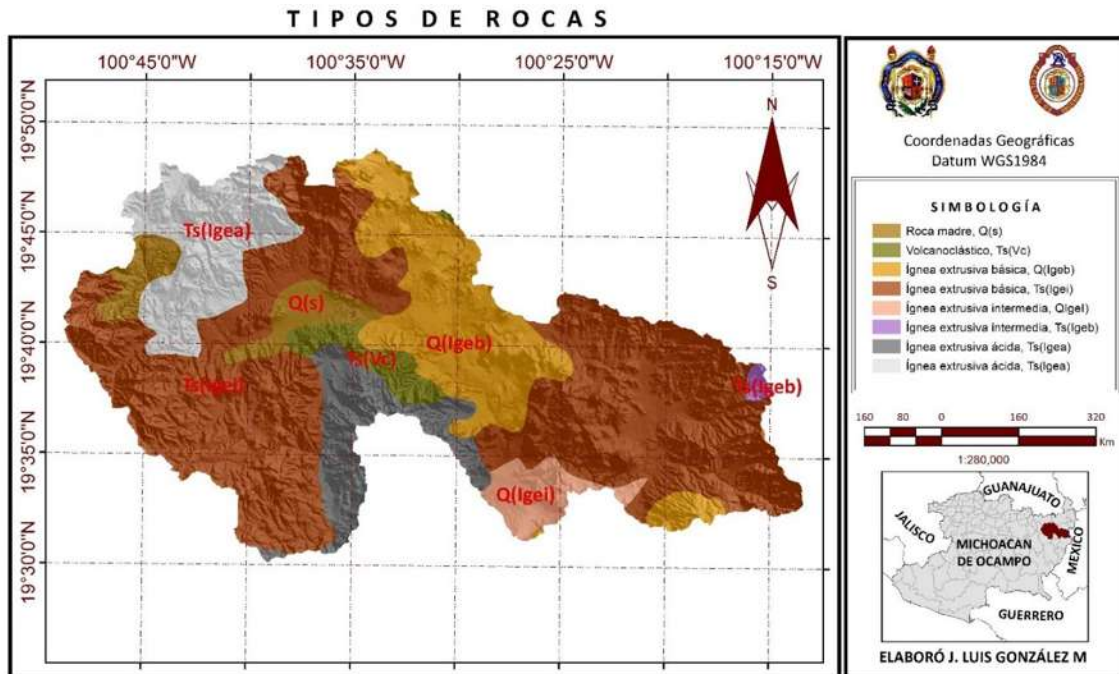
Figura 8.8. Uso de suelo y vegetación de la cuenca

De acuerdo a la clasificación de suelos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (IUSS, Grupo de Trabajo WRB, 2007), los suelos presentes en el sitio son andosoles (del japonés an, negro, y do, suelo), el cual abarca los suelos de origen volcánico de color oscuro y muy porosos, corresponden al 78% de la superficie; también se tiene Luvisoles (del latín luere, lavar) son suelos con alta migración de arcilla y una alta saturación con bases a alguna profundidad, abarcando el 12% del área; otro tipo de suelo presente en 1% es el Regosol (del griego rhegos, manta) son suelos débilmente desarrollados en material no consolidado de grano fino; en el 9% restante se tienen vertisoles (del latín vertere, dar vuelta) son suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expandibles (Ver figura 8.9).



Figura 8.9. Tipo de suelo de la cuenca

Respecto a la geología, el sitio se encuentra compuesto en su mayoría por rocas ígneas, divididas en básicas, intermedias y ácidas; además se tiene un tipo de roca sedimentaria, la volcanoclástica; en porciones de la superficie también existe roca madre, que es la que proporciona la matriz mineral al suelo (Ver figura 8.10).



De acuerdo a la clasificación de Köeppen (García, 1981) se tienen cuatro tipos de climas predominando un clima templado en la parte oeste y central de la cuenca, y un clima semifrío en las zonas de mayor altitud. (Ver figura 8.11).

(A)C(W1) Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.

Cb'(w2) Semifrío subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

C(w1) Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

C(W2) Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

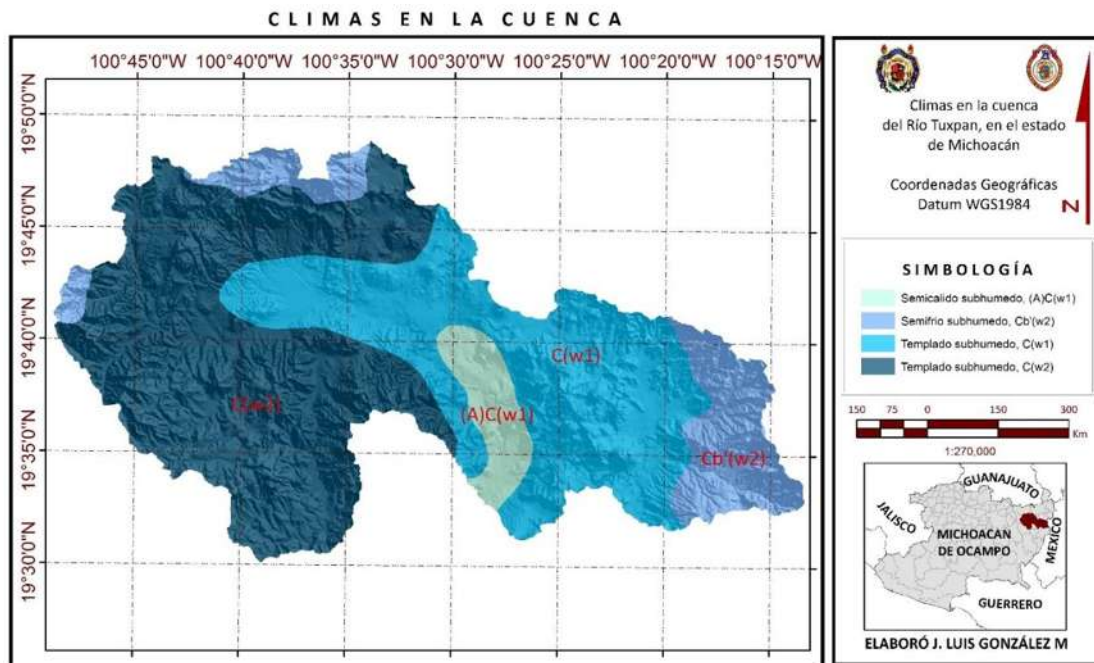


Figura 8.11. Climas en la cuenca

8.2. Información meteorológica

8.2.1. Selección de estaciones principales

La selección de estaciones principales se hizo de acuerdo a las características que poseen las series de datos históricos. Se asignó cierto peso a cada una de las siguientes variables, acomodadas en orden de importancia partiendo del primer puesto.

- Distancia al centro de gravedad
- % vacíos
- Intervalo de tiempo
- Número de años

Haciendo una ponderación de las variables citadas anteriormente, se eligieron 13 estaciones principales, considerando también que éstas cubrieran en su totalidad la cuenca. Las estaciones meteorológicas tanto principales como secundarias ubicadas al interior de la

cuenca del río Tuxpan o en su periferia se muestran en la figura 8.12 y sus datos principales se muestran en la tabla 8.1.

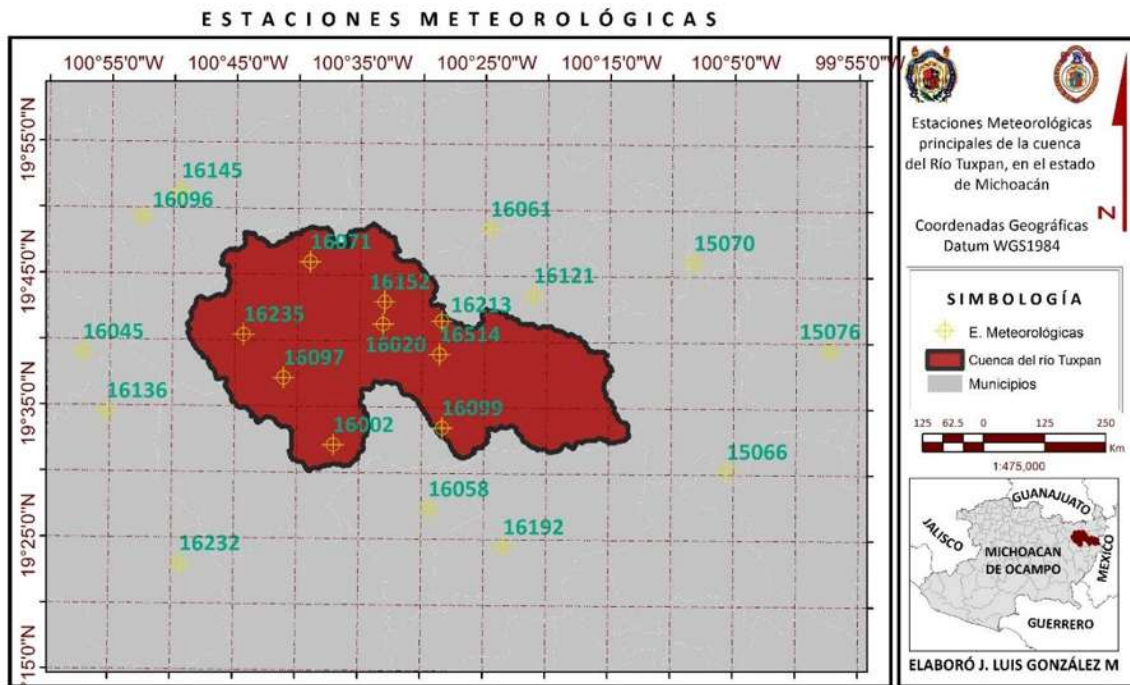


Figura 8.12. Estaciones meteorológicas

Tabla 8.1. Datos principales de las estaciones meteorológicas

	<i>Código</i>	<i>Nombre</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>Periodo de datos</i>	<i>N° de datos</i>	<i>% de vacíos</i>
1	15066	PALIZADA	385412	2157015	2635	1958 - 2008	51	13.8
2	15070	PRESA BROCKMAN	380832	2186227	2929	1968 - 2010	43	14.2
3	15076	PRESA TEPETILÁN	399919	2173861	2564	1961 - 2010	50	4.0
4	16002	AGOSTITLÁN CFE	330275	2160882	2520	1950 - 2006	57	6.3
5	16020	CIUDAD HIDALGO DGE	337303	2177735	2060	1959 - 2006	48	2.6
6	16045	EL TEMAZCAL	295228	2173962	2220	1965 - 2011	47	1.1
7	16058	JUNGAPEO	343613	2151851	1248	1940 - 1988	49	12.3
8	16061	LAGUNA DEL FRESNO	352389	2191053	2080	1947 - 2009	63	8.9
9	16071	AZUFRES	327130	2186503	2953	1965 - 1997	33	26.6
10	16096	PRESA MALPAIS	303724	2192928	1859	1944 - 2006	63	17.1
11	16097	PRESA PUCUATO	323336	2170304	2490	1950 - 2006	57	11.4
12	16099	PRESA TUXPAN CFE	345547	2163198	1750	1952 - 1995	44	22.9
13	16121	SENGUIO	358391	2181762	2260	1969 - 2007	39	36.1
14	16136	TZITZIO	298492	2165713	1565	1969 - 2011	43	14.4
15	16145	ZINAPÉCUARO	309106	2196486	1880	1923 - 2010	88	9.6
16	16152	CIUDAD HIDALGO SMN	337558	2180870	2327	1922 - 1988	67	0.4
17	16213	IRIMBO	345537	2178160	2180	1978 - 2007	30	25.5
18	16232	EL DEVANADOR	308706	2144308	1060	1982 - 2010	29	54.4
19	16235	HUAJÚMBARO	317768	2176356	2285	1980 - 2010	31	10.5
20	16514	JARIPEO	345217	2173496	1880	1987 - 2006	20	2.1
21	16192	LA ENCARNACIÓN	354086	2146524	1720	1974 - 2011	38	16.1

8.2.2. Homogeneidad o consistencia de datos

Toda serie temporal de precipitaciones debe ser homogénea y consistente. Esta evaluación se logra a través de pruebas estadísticas.

La buena medición es vulnerable a distintos problemas que se pueden presentar, el operador no tomó el dato, el instrumento presento algún daño, entre muchos otros factores, y es por esto que en algunas ocasiones no se pueden hacer mediciones del fenómeno de precipitación.

Evaluar la consistencia de los datos significa, evaluar la calidad y confiabilidad de la información que se va a procesar. Esta evaluación se realizó por medio de tres pruebas de consistencia:

1. Prueba de secuencias
2. Test de Helmert
3. T de Student

En la tabla 8.2 se muestra el análisis mediante la prueba de secuencias y el test de Helmert de la estación 16002 “Agostitlán CFE”.

Tabla 8.2. Resultados Secuencias y Helmert para la estación 16002

AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)	SECUENCIAS	HELMERT	AÑO	PRECIPITACIÓN (mm)	SECUENCIAS	HELMERT
1951	1247.5	-		1968	1228.3	-	C
1952	1383.3	-	S	1969	1250.3	-	S
1953	638.7	-	S	1970	1341.3	-	S
1954	1432.5	+	C	1971	1494	+	C
1955	1564.3	+	S	1972	1615.6	+	S
1956	1578.1	+	S	1973	1661.4	+	S
1957	1082.5	-	C	1974	1249.5	-	C
1958	1738.9	+	C	1975	1377.6	-	S
1959	1414	+	S	1976	1201.1	-	S
1960	1127.6	-	C	1977	1351.9	-	S
1961	1233.5	-	S	1978	1455	+	C
1962	1469.6	+	C	1979	1180.8	-	C
1963	1432.7	+	S	1980	1416.7	+	C
1964	1243.1	-	C	1981	1393.4	+	S
1965	1714.7	+	C	1982	1118.9	-	C
1966	1528.9	+	S	1983	1073.7	-	S
1967	1971.6	+	S	1984	1398.5	+	C
				1985	1120.2	-	C

Como se puede observar en la tabla 8.2 el número de cambio de pendientes en el caso de la estación 16002 es de 16 (cambios de signo). Por tanto se concluye mediante el método de secuencias, que la estación 16002 es consistente.

Para el método de Helmert, se tiene que la diferencia entre secuencias (S) y cambios (C) es de 2, estando dentro del rango $\pm\sqrt{n-1}$, (± 5.83) por lo que es consistente.

En la Tabla 8.3 se muestran los resultados de acuerdo a la prueba estadística t student para la estación 16002, la cual indica que el valor T_d tiene que ser menor al valor T de dos colas, por lo que la serie resulta consistente.

Tabla 8.3. Resultados T student para la estación 16002

	Q1	Q2
MEDIA (\bar{x})	1400.09	1341.65
VARIANZA (S^2)	90848.21	26438.37
N	17	17
P(T<=T) DOS COLAS	0.48	
VALOR CRÍTICO DE T (DOS COLAS)	2.12	
ESTADÍSTICO T_d	0.68	

En la tabla 8.4, se muestran los resultados de consistencia para las estaciones meteorológicas.

Tabla 8.4. Resultados pruebas de homogeneidad para estaciones meteorológicas

ESTACIÓN	SECUENCIAS	HELMERT	T STUDENT
15066	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
15070	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
15076	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16002	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16020	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16045	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16058	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16061	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16071	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16096	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16097	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16099	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16121	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16136	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16145	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16152	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16192	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16213	No homogéneo	No homogéneo	Homogéneo
16232	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16235	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo
16514	Homogéneo	Homogéneo	Homogéneo

8.2.3. Independencia de las series de precipitación

Para probar que una serie de precipitaciones realmente tiene esa naturaleza, se evaluó su independencia en el tiempo. En la figura 8.13 se muestra el autocorrelograma para la estación 16002, donde se aprecia que la estación es independiente ya que su autocorrelograma queda dentro de los límites de Anderson.

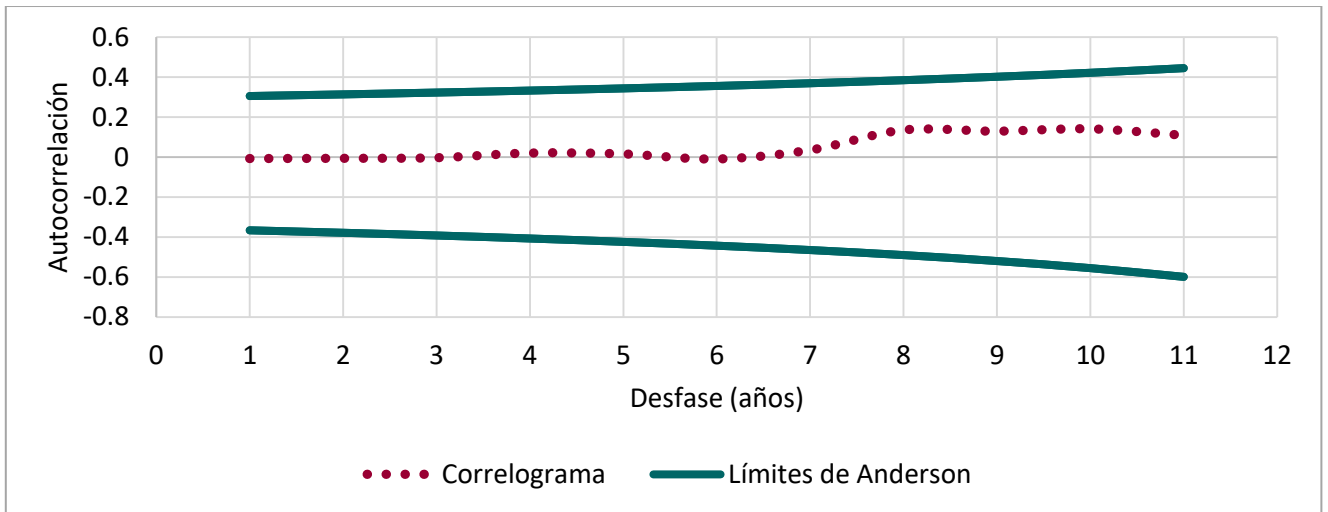


Figura 8.13. Autocorrelograma para la estación 16002

En la tabla 8.5 se muestran los resultados de la prueba de independencia mediante Límites de Anderson para las estaciones meteorológicas.

Tabla 8.5. Resultados independencia de las series de precipitación mediante los Límites de Anderson

ESTACIÓN	ANDERSON	ESTACIÓN	ANDERSON
15066	Independiente	16097	Independiente
15070	Independiente	16099	Independiente
15076	Independiente	16121	Independiente
16002	Independiente	16136	Independiente
16020	Independiente	16145	Independiente
16045	Independiente	16152	Independiente
16058	Independiente	16192	Independiente
16061	Independiente	16213	Independiente
16071	Independiente	16232	Independiente
16096	Independiente	16235	Independiente
		16514	Independiente

8.2.4. Estimación de datos faltantes de las series de precipitación

El llenado de datos solo permite llenar los vacíos con datos determinados estadísticamente a través de datos históricos registrados, estos métodos no reproducen los datos perdidos.

Cuanto menor sea la cantidad de datos faltantes para una serie histórica, se espera que los resultados presenten menos incertidumbre. Al agregar datos a la serie histórica se está agregando un porcentaje de incertidumbre, ya que los datos están siendo llenados y no representan las características que en realidad sucedieron.

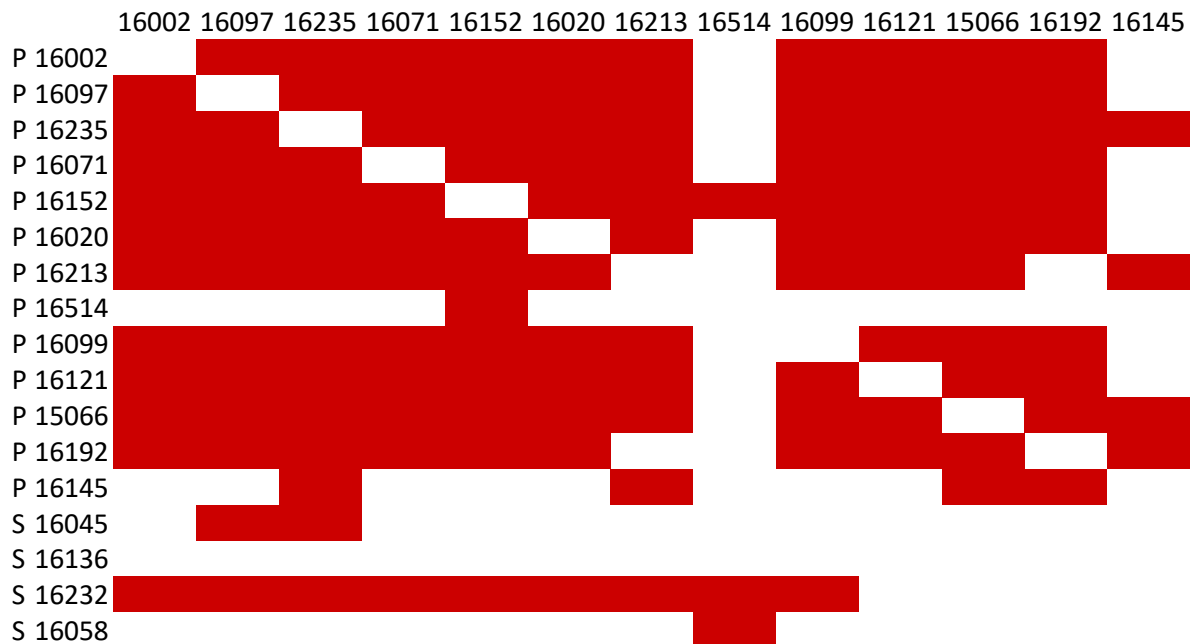
Dentro de los métodos propuestos para evaluar las estaciones que pueden servir para el llenado de otra serie, el más comúnmente utilizado en series de datos de precipitación, es determinar la correlación espacial de las estaciones cercanas frente a la estación a llenar.

Estos valores de correlación se presentan mediante una matriz, la cual se denomina matriz de correlación espacial (Tabla 8.6). A través de ella es posible identificar las estaciones que presentan un valor de correlación alto mayor de 0.8 (Aparicio, 1992), el valor más alto de correlación que se obtuvo fue de 0.97 y el menor de 0.73

El llenado de datos se realizó con el método del inverso de la distancia euclidiana al cuadrado. Previo al llenado, el método requiere obtener los estadísticos básicos de la serie original (sin llenado), y la matriz de distancias euclidianas.

Se realizó el llenado de las 13 estaciones principales (P), quedando 4 como estaciones secundarias (S), a las cuales se les aplicaron los mismos estadísticos de análisis, para comprobar que las series llenas también cumplen con las características propias de una estación meteorológica; las 4 estaciones restantes se desechan debido a que ya no tienen correlación con las principales.

Tabla 8.6 Matriz de Correlación de las estaciones principales



En la tabla 8.7 se muestra el promedio mensual y las medias anuales (PMA) de precipitación en mm para las 13 estaciones principales.

Tabla 8.7 Precipitación media mensual y media anual de las estaciones principales

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PMA
16002	28.6	14.7	8.7	25.4	74.1	216.3	283.8	269.9	223.2	106.3	30.2	13.9	1295.1
16097	24.7	15.3	8.1	22.3	72.2	213.4	280.0	260.4	195.4	91.2	22.6	13.4	1219.1
16235	25.3	14.1	9.5	20.2	64.0	202.1	276.3	260.9	196.9	86.4	21.9	12.9	1190.4
16071	24.3	13.8	9.2	23.2	66.0	195.1	266.5	249.6	202.7	87.8	30.0	12.1	1180.3
16152	22.1	11.9	8.4	20.5	60.5	143.1	178.1	169.0	137.7	71.0	19.6	9.9	851.9
16020	22.1	12.6	8.0	21.1	57.2	145.1	180.1	168.7	133.1	70.1	19.1	9.9	847.1
16213	21.6	11.2	7.9	18.1	57.4	145.6	186.8	178.7	142.2	69.1	20.1	10.5	869.1
16514	21.3	10.3	9.2	21.3	69.8	175.1	208.3	202.9	129.3	63.3	18.0	11.8	940.5
16099	22.3	13.3	5.9	17.2	51.5	158.3	205.0	188.5	149.3	76.6	16.7	9.2	913.8
16121	21.7	10.1	6.5	17.5	62.9	149.7	200.4	198.3	152.5	73.4	17.6	9.6	920.3
15066	20.5	11.9	8.5	18.7	62.5	157.7	201.3	195.5	150.7	76.4	17.5	10.1	931.4
16192	24.4	12.3	11.0	16.2	48.1	173.9	201.8	192.2	155.0	80.7	17.4	9.1	942.0
16145	14.5	7.0	5.0	9.6	41.9	142.2	208.4	231.6	142.1	53.2	12.8	4.1	872.4

8.2.5. Estimación de datos faltantes en las series de temperatura

Para el caso de los datos de temperatura, se utilizaron valores promedio mensuales de la base de datos CLICOM, los vacíos de las series de temperatura en las estaciones principales, se llenaron con los valores medios de cada mes, en la tabla 8.8 se muestra, a manera de resumen, un promedio mensual de temperatura en °C para cada una de las estaciones principales.

Tabla 8.8 Temperaturas medias mensuales de las estaciones principales

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
16002	11.0	12.0	13.7	15.4	16.4	16.3	15.8	15.8	15.3	14.1	12.8	11.7
16097	10.4	11.2	13.4	14.9	15.8	15.9	15.4	15.5	15.1	14.0	12.4	11.1
16235	9.9	10.8	12.6	14.6	15.9	16.1	15.6	15.6	15.2	13.5	11.7	10.4
16071	8.1	8.9	11.2	13.0	13.3	12.7	11.8	11.8	11.7	10.5	9.4	8.4
16152	13.5	14.4	17.0	18.8	19.6	19.4	18.6	18.6	18.3	17.1	15.3	14.2
16020	13.4	14.4	16.6	18.5	19.5	19.3	18.5	18.5	18.2	16.8	15.2	13.9
16213	11.7	12.8	15.6	17.7	18.3	17.3	16.3	16.2	15.9	15.1	13.6	12.3
16514	15.1	16.2	17.9	19.9	20.7	20.4	19.6	19.7	19.3	18.2	16.7	15.4
16099	14.9	15.6	17.9	19.7	20.4	19.8	19.0	19.0	18.9	18.1	16.6	15.5
16121	13.0	14.1	16.7	18.6	19.3	17.9	16.7	16.7	16.4	15.8	14.2	13.2
15066	7.9	8.7	11.0	12.6	13.6	13.8	13.1	13.2	12.8	11.1	9.3	8.5
16192	16.4	17.1	19.0	20.7	21.2	20.1	19.0	18.9	18.9	18.4	17.7	16.7
16145	14.1	15.5	18.2	20.4	21.3	20.3	19.2	19.1	18.4	17.2	15.6	14.4

8.2.6. Evapotranspiración

Se aplicó el método de Thornthwaite a las series de temperatura, para obtener datos de evapotranspiración potencial, los cuales se usan como datos de entrada en la simulación del modelo hidrológico HBV, en la tabla 8.9 se muestran los resultados promedio mensuales de evapotranspiración por el método de Thornthwaite en mm, para las 13 estaciones principales.

Tabla 8.9 Evapotranspiración potencial promedio mensual para las estaciones principales por Thornthwaite

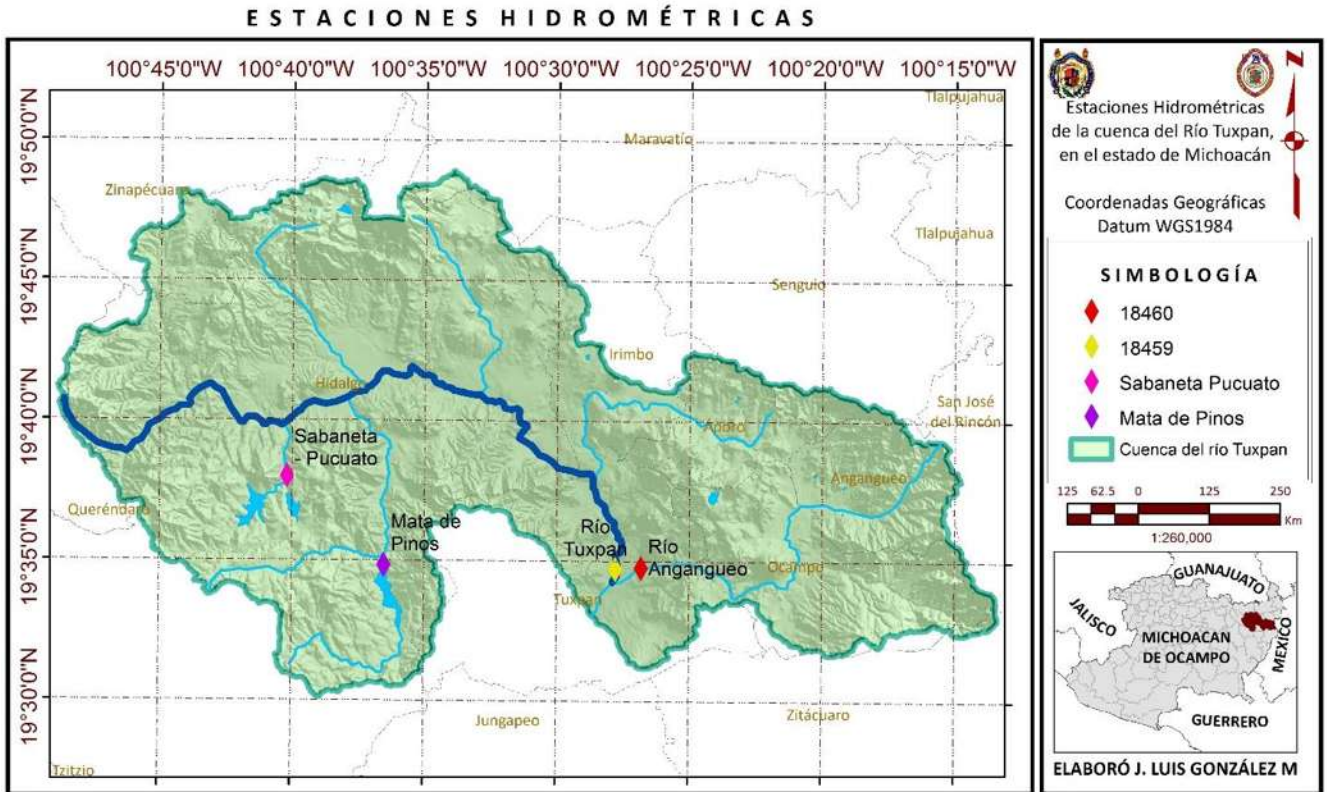
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
16002	37.0	39.9	54.5	65.6	77.0	75.2	74.1	71.7	63.5	55.5	45.1	38.8
16097	36.5	38.9	54.0	64.2	75.3	74.4	73.2	71.4	63.6	56.3	44.7	37.9
16235	34.0	36.1	50.7	63.1	76.7	76.6	74.9	73.3	65.2	54.6	41.7	35.1
16071	34.3	35.9	53.4	63.9	70.8	65.9	62.5	61.0	55.3	48.1	39.4	34.1
16152	40.0	42.3	64.3	77.5	90.0	87.0	83.0	81.0	72.1	63.0	48.5	41.5
16020	39.9	42.6	62.3	76.5	89.4	86.6	82.4	80.7	72.0	62.1	48.5	40.8
16213	37.2	40.1	62.0	76.4	86.3	78.2	73.4	70.9	62.9	57.2	45.5	38.3
16514	44.6	48.0	66.3	82.0	94.9	91.0	86.6	85.4	75.6	66.3	52.5	44.1
16099	44.6	45.5	67.4	79.9	93.7	87.1	82.5	80.6	73.5	66.7	52.7	45.9
16121	40.9	44.0	66.1	80.1	90.7	79.0	73.2	71.0	63.3	58.6	45.8	39.9
15066	31.6	33.5	50.5	59.9	70.3	70.5	68.0	65.5	59.4	49.5	37.6	33.4
16192	50.8	51.8	72.6	87.1	98.4	87.6	80.1	77.7	71.6	66.7	57.2	50.1
16145	40.4	45.6	70.0	87.0	101.9	91.6	85.0	82.1	70.6	61.0	47.8	40.5

8.3. Información hidrométrica o de gasto

En la zona de estudio se encuentra instaladas dos estaciones hidrométricas. La primera con clave 18459 cuyo nombre es "Río Grande", se encuentra situada dentro del municipio de Tuxpan, Michoacán sobre el río Grande o Tuxpan.

La segunda estación tiene la clave 18460 "Río Chiquito" se encuentra sobre el río Chiquito o Angangueo a 400 m aguas arriba de su confluencia al río Tuxpan.

También se cuenta con presas dentro de la cuenca, las cuales pueden ser usadas como puntos de calibración del modelo hidrológico HBV, debido a que en ellas existen aforos de gasto, las que tienen mayor información son La Sabaneta, Pucuató y Mata de Pinos.



8.4. Modelación hidrológica

En este apartado se describirán los procesos que se siguieron para obtener los escurrimientos superficiales de la cuenca del río Tuxpan.

La modelación de los escurrimientos se realizó mediante dos metodologías, la primera partiendo de la Normativa implementada por la Comisión Nacional del Agua en México, y la segunda mediante la herramienta informática desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia en España: EVALHID, mediante las ecuaciones del modelo hidrológico HBV.

8.4.1. Modelación hidrológica con la NOM-011-CONAGUA-2015

8.4.1.1. Obtención del parámetro K

El valor del parámetro K ponderado para una cuenca con diferentes usos y tipo de suelo se hizo mediante el uso del sistema de información geográfica ARCGIS, en su versión 10.3; como primer paso se obtuvo el mapa de uso de suelo y vegetación (USV) de la cuenca, y

también el mapa de tipo de suelo de la cuenca; esto de acuerdo a la clasificación que establece la NOM-011-CONAGUA-2015, tabla 7.3.

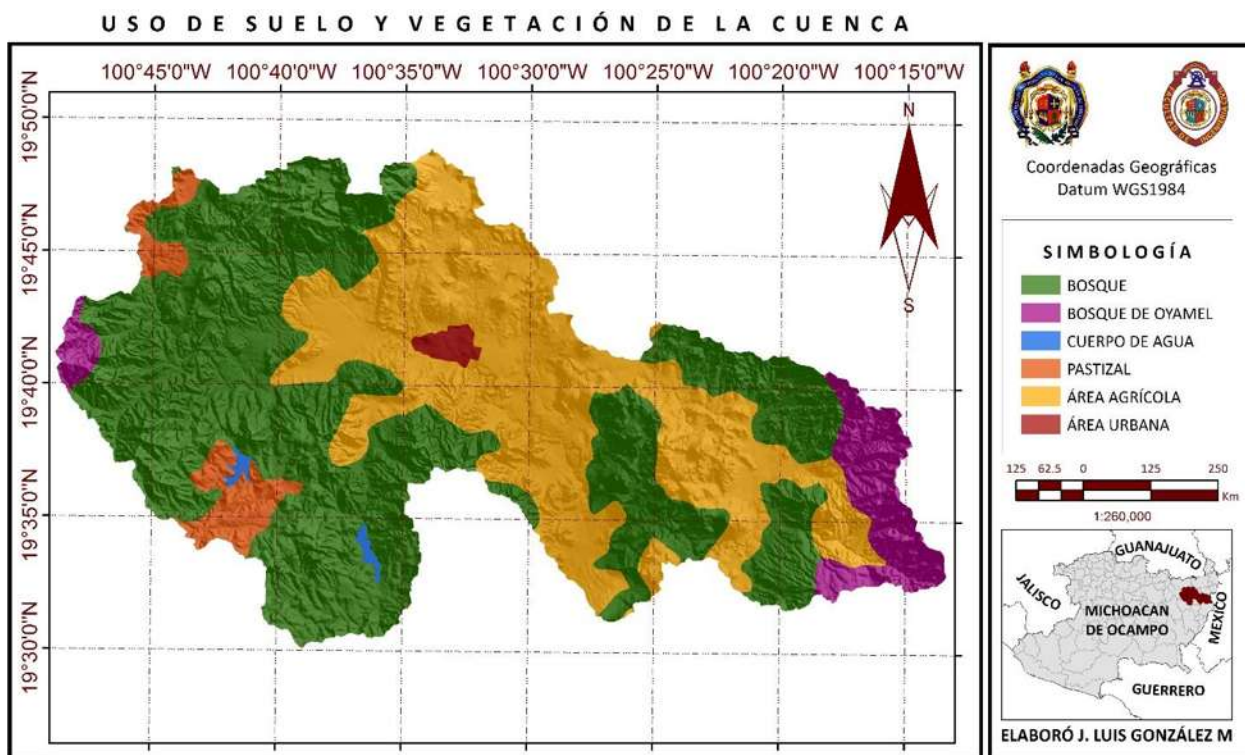


Figura 8.15 Uso de suelo y vegetación de la cuenca
TIPO DE SUELO DE LA CUENCA

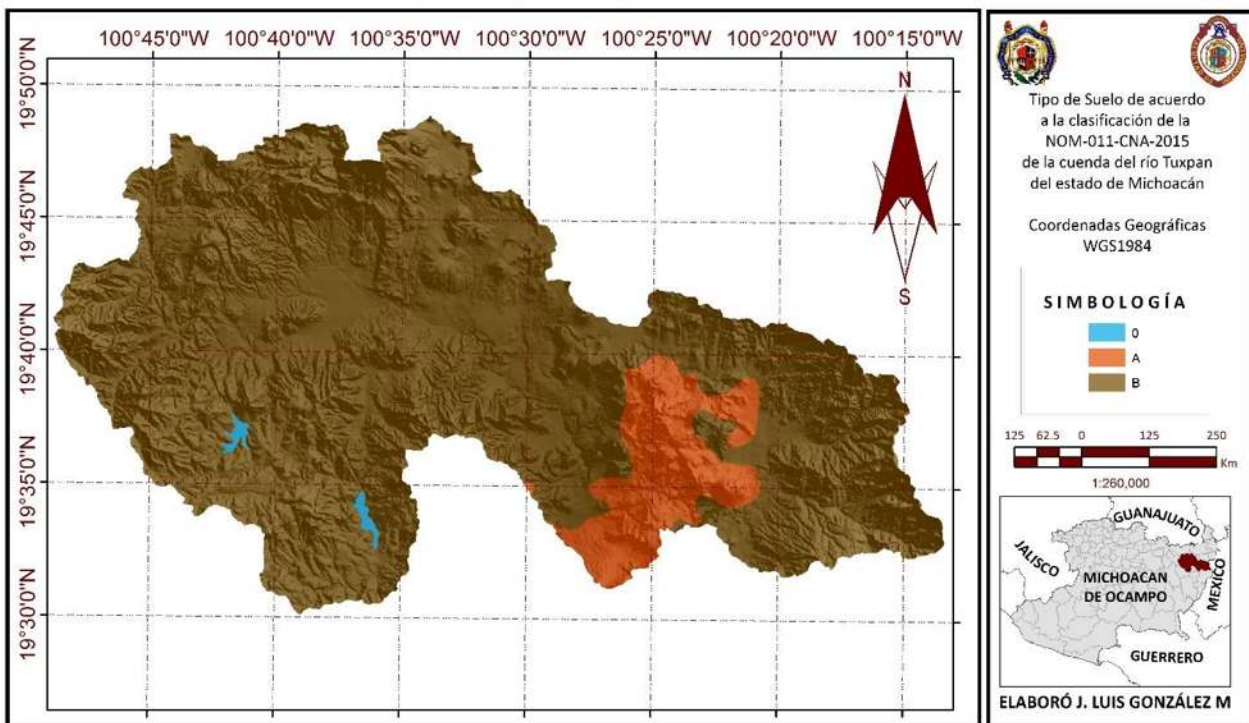


Figura 8.16 Tipo de suelo de la cuenca de acuerdo a la NOM-011-CONAGUA-2015

Como segundo paso de se generaron mapas binarios tipo raster por cada USV que se tiene en la cuenca, tal como se indica en la figura 8.18; en la zona en estudio resultaron 6 mapas binarios USV; también se generó un mapa tipo raster para el de tipo de suelo, cambiando la clasificación de suelo A, B y C. Por 1,2 y 3 (figura 8.17). Para este caso solo se cuenta con los primeros dos tipos de suelo y cuerpos de agua, donde se asigna un valor de 0.

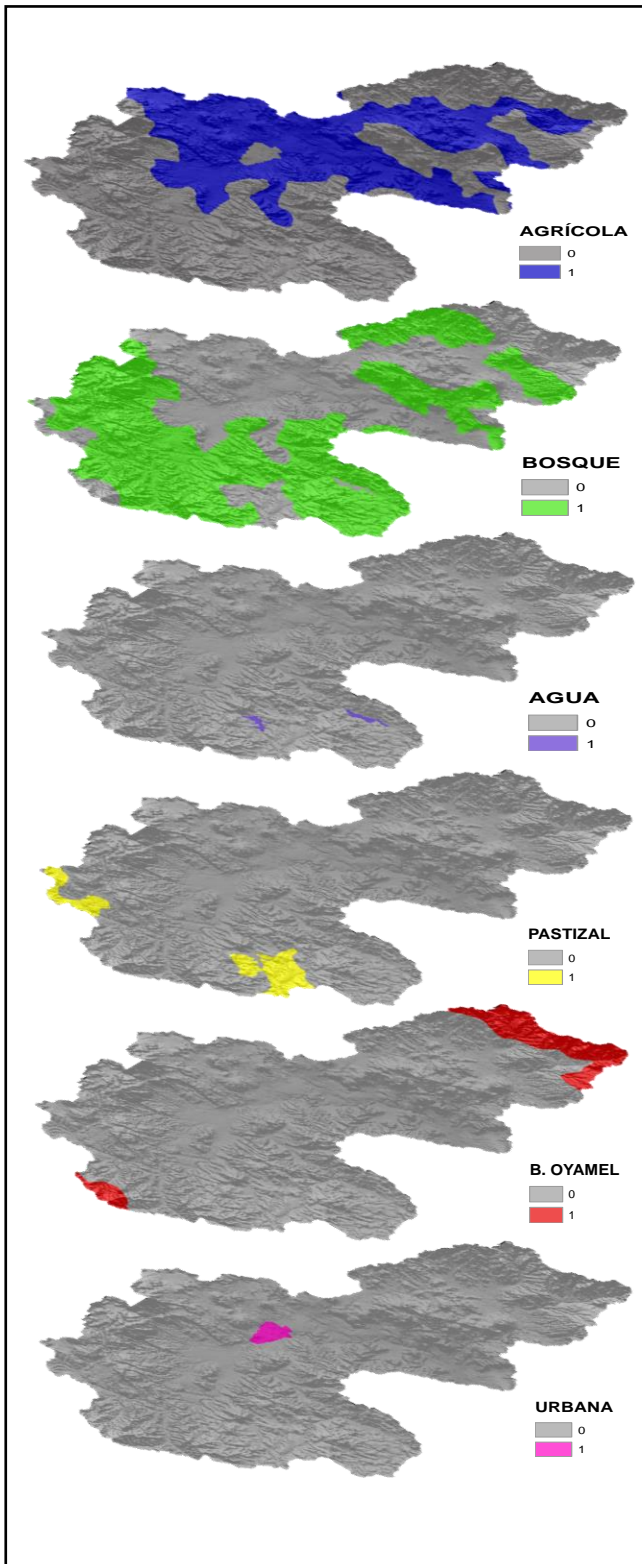
Hecho esto se multiplicó el mapa raster de tipo de suelo, por el de USV agrícola por ejemplo, este proceso se siguió para todos los mapas de USV que se tienen. La serie de comandos que se siguió en ARCGIS es la siguiente:

>ARC TOOLBOX >SPATIAL ANALYST TOOLS > MAP ALGEBRA >RASTER CALCULATOR

Como resultado se generó otro mapa tipo raster donde además de conocer que se tiene determinado USV, también se conoce las porciones que pertenecen a cada tipo de suelo (Figura 8.19), ya que la clasificación de K que da la Norma, asigna valor diferente para cada USV que también cambia para cada tipo de suelo (Tabla 7.3).

Hecho esto se reclasificó cada mapa de USV por el valor de K que le corresponde (figura 8.20), por ejemplo: se conoce que se tiene área agrícola con cobertura del 50 al 75% para el primer USV, en las celdas resultantes con valor 1, se le asignará el valor de K, para ese USV de la zona A; para las celdas con valor de 2 se les asignará el valor de la zona B. siendo estos 0.24 y 0.27 respectivamente. Ya que la herramienta de reclasificación de valores de celdas en ARCGIS 10.3 no acepta decimales, estos valores se reclasificarán como enteros, al multiplicarlos por 100. A continuación, se muestra el proceso del SIG para realizar la reclasificación.

>ARC TOOLBOX >SPATIAL ANALYST TOOLS > RECLASS >RECLASSIFY



X

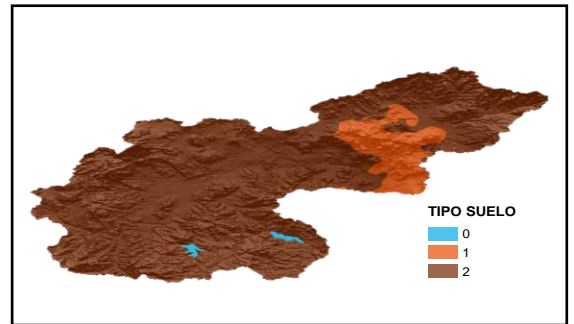


Figura 8.17 Mapa de tipo de suelo con valores

Figura 8.18 Mapas binarios de uso de suelo y vegetación (USV)

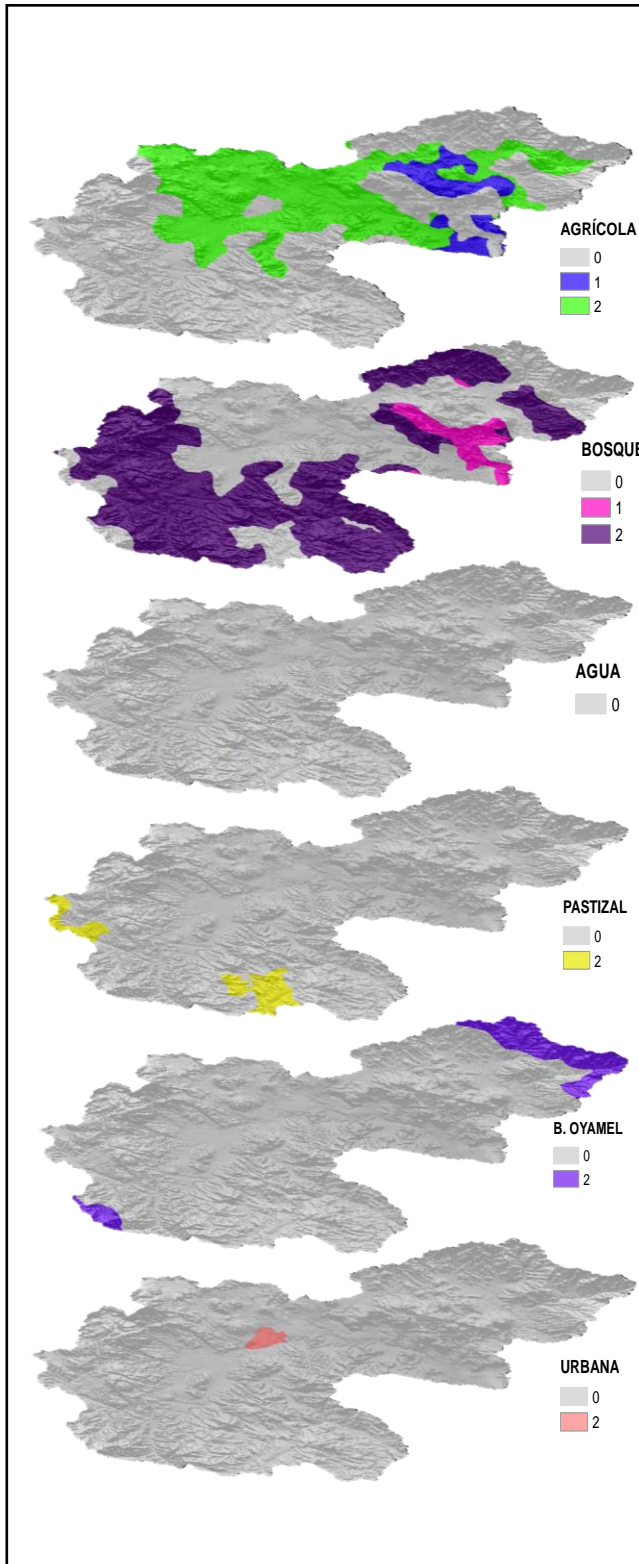


Figura 8.19 Mapas USV x tipo de suelo

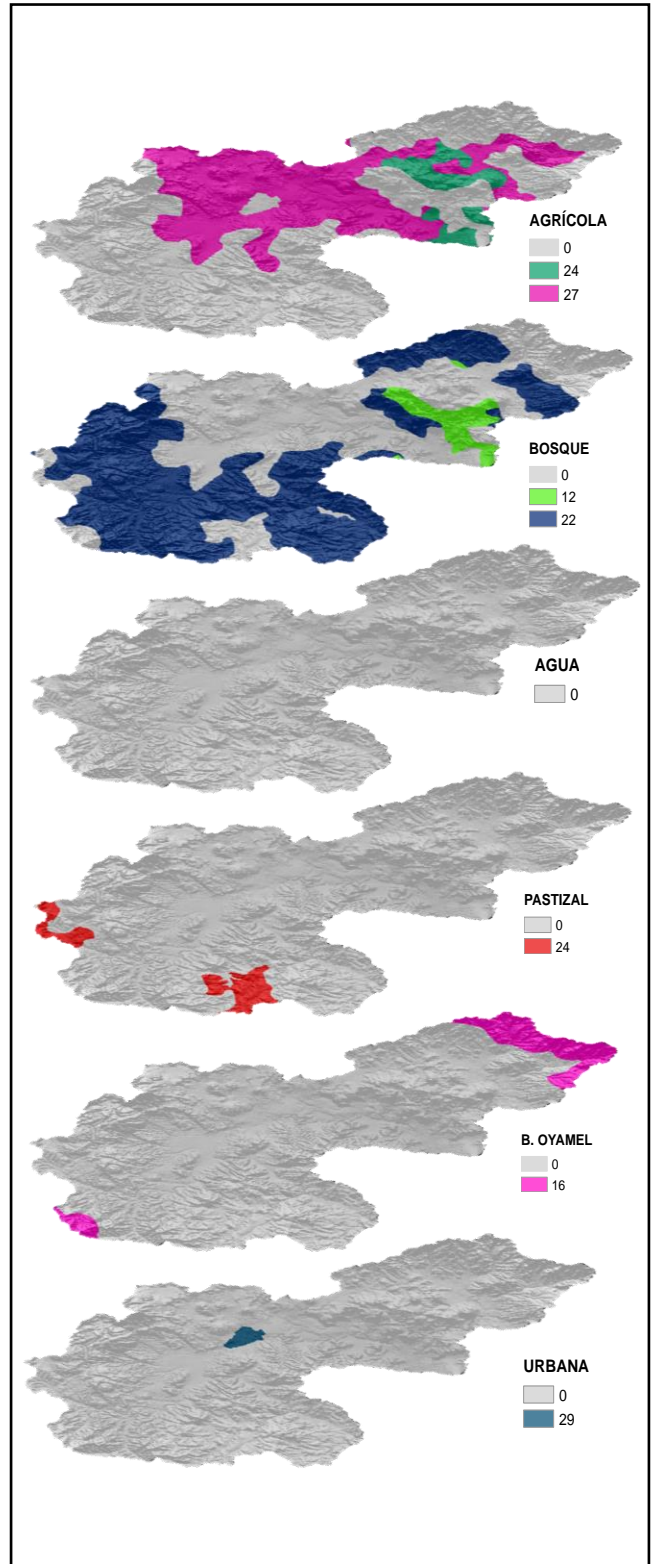


Figura 8.20 Mapas con valores de K

Finalmente con operación de mapas se generó la suma de todos los mapas tipo raster reclasificados y se obtuvo el mapa general de K, en valores enteros. Cambiando a mapa tipo shape, se divide entre 100 los valores de K, mediante operaciones en la tabla de atributos, para generar el mapa con los valores originales de K (figura 8.21).

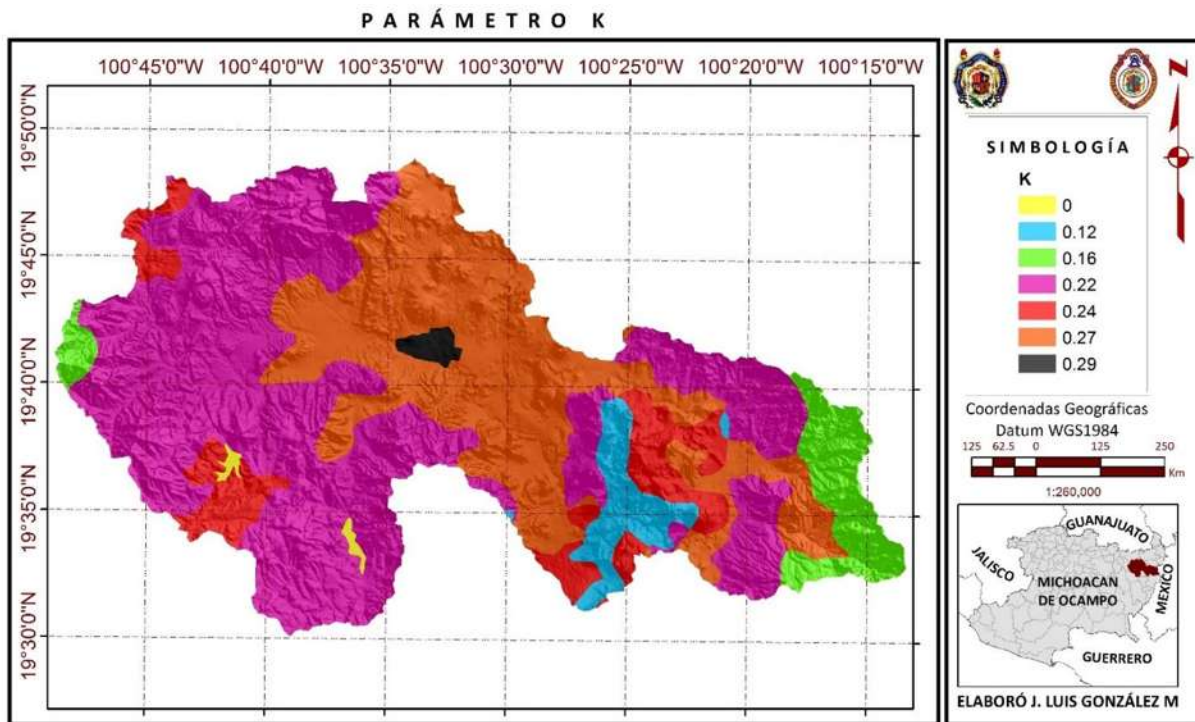


Figura 8.21 Mapa del parámetro K en función del tipo y uso de suelo

8.4.1.2. Homogenización mediante isolíneas

Para esta metodología se obtuvieron mapas formato raster de isolíneas de precipitación para todos los años de la serie, a manera de ejemplo se muestra en la figura 8.22 el mapa de precipitación en mm para el año de 1952, el cual es el primer año de la serie. También la metodología pide tener mapas de isolíneas de coeficiente de escurrimiento, estos se obtuvieron al calcular el coeficiente de escurrimiento con el valor de K ponderado, para cada estación climatológica, haciendo la interpolación espacial con los valores resultantes, este mapa se observa en la figura 8.23.

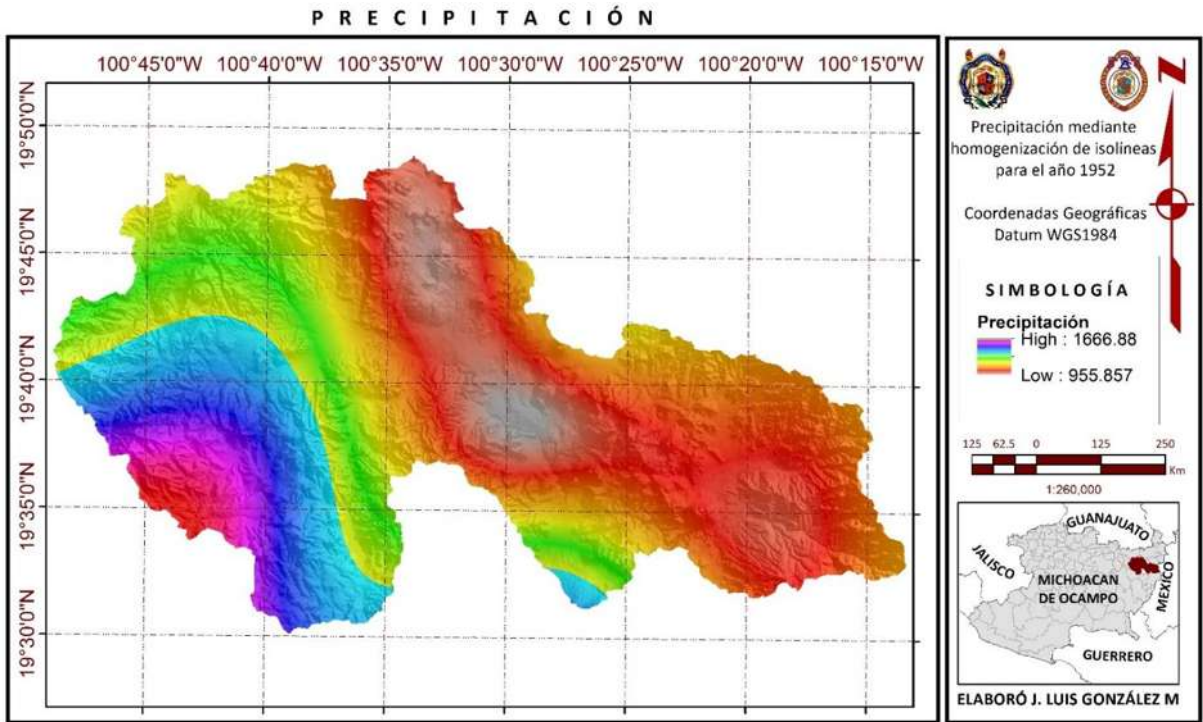


Figura 8.22 Mapa de isolíneas de precipitación para el año 1952

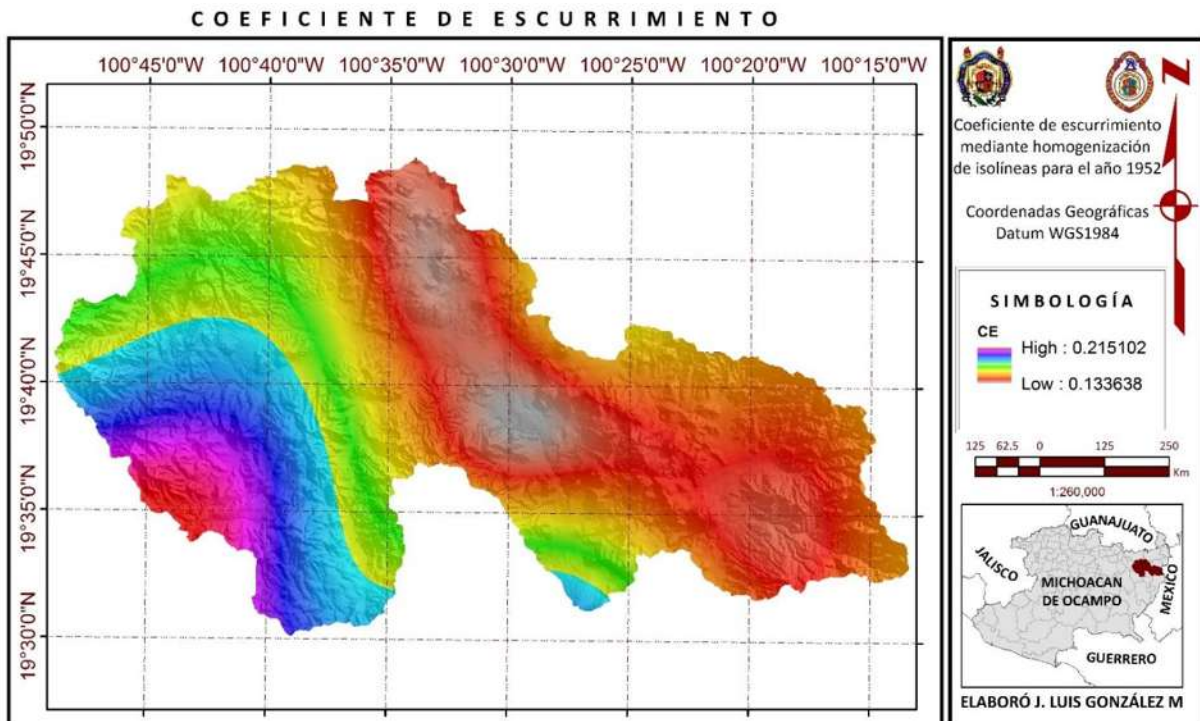


Figura 8.23 Mapa de isolíneas de coeficiente de escurrimiento para el año 1952

Finalmente con el uso de la herramienta de operación de mapas en el SIG ARCGIS 10.3 se aplica la fórmula precipitación-escorrimento (ecuación 7.10) obteniendo como resultado un mapa tipo Raster con información de la disponibilidad hídrica por cada celda en m^3 , definida en este caso de $2\,500\,m^2$ (figura 8.24). La disponibilidad total de la cuenca se obtiene al sumar la de todas las celdas (este proceso el SIG lo realiza automáticamente).

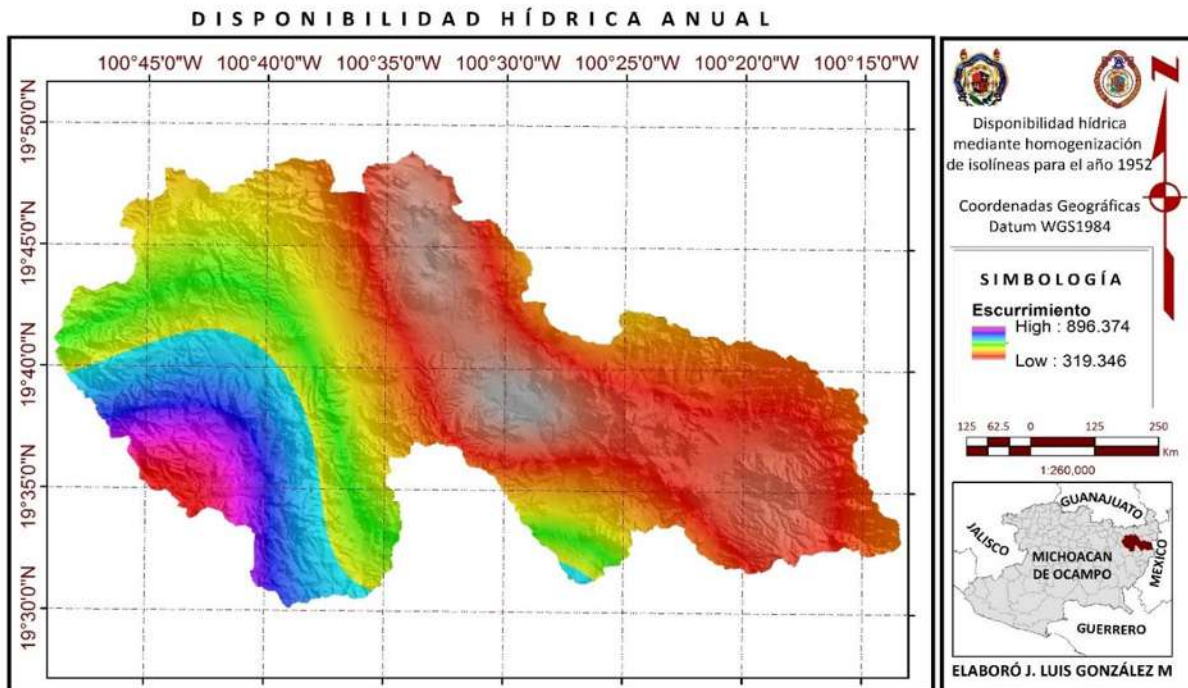


Figura 8.24 Mapa de isohietas de disponibilidad hídrica para el año 1952

Tabla 8.10 Disponibilidad hídrica anual mediante la homogenización con isólineas (1952-2010)

DISPONIBILIDAD HÍDRICA ANUAL			
Año	Hm ³	Año	Hm ³
1952	234.81	1982	122.00
1953	116.02	1983	173.25
1954	200.65	1984	185.34
1955	186.44	1985	165.54
1956	148.90	1986	173.51
1957	115.66	1987	141.94
1958	362.27	1988	288.93
1959	209.39	1989	93.48
1960	96.89	1990	224.33
1961	145.33	1991	153.42
1962	152.62	1992	228.20
1963	182.89	1993	213.68
1964	145.16	1994	164.23
1965	297.11	1995	341.21
1966	260.51	1996	130.46
1967	326.78	1997	133.03
1968	183.58	1998	152.27
1969	143.31	1999	117.48
1970	147.12	2000	188.66
1971	211.76	2001	186.23
1972	193.18	2002	201.74
1973	293.41	2003	215.32
1974	156.14	2004	174.81
1975	211.76	2005	152.21
1976	237.44	2006	205.20
1977	155.25	2007	170.37
1978	180.90	2008	109.46
1979	119.08	2009	166.74
1980	200.71	2010	264.13
1981	203.86		
Media anual		187.4	

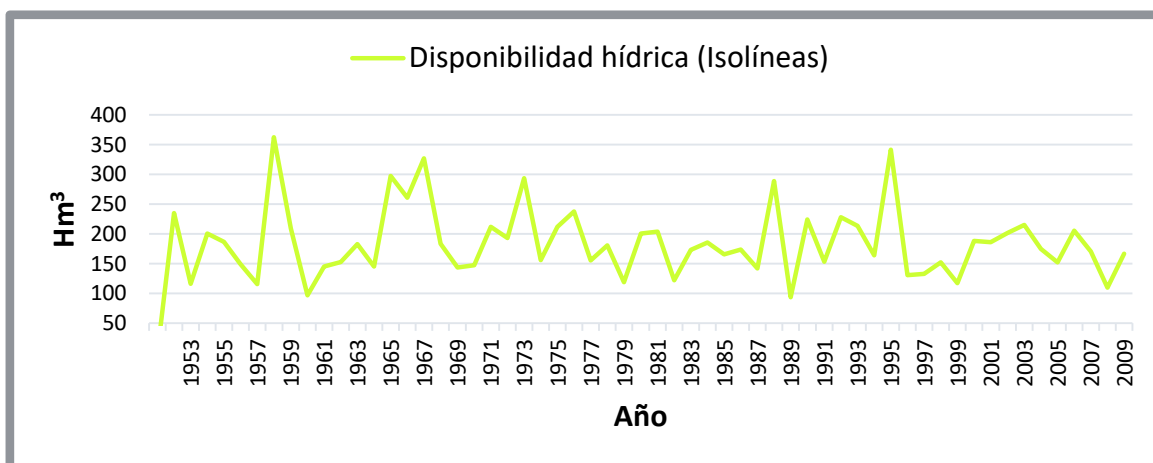


Figura 8.25 Disponibilidad hídrica anual mediante la homogenización con isólineas (1952-2010)

8.4.1.3. Rasterización de coeficiente de escurrimiento

Esta metodología , como en la anterior, hace uso de un mapa de isolíneas de precipitación, para este caso en la figura 8.26 se muestra el mapa tipo raster de precipitación en mm para el año 1980. El coeficiente de escurrimiento se obtuvo directamente con el uso de SIG, haciendo uso de operaciones de mapas, tendiendo un mapa tipo raster del parámetro K, y los mapas de precipitación para cada año de la serie, se aplicó la fórmula de coeficiente de escurrimiento, obteniendo un mapa de coeficiente de escurrimiento que discretiza el valor de K, para cada celda del mapa (figura 8.27).

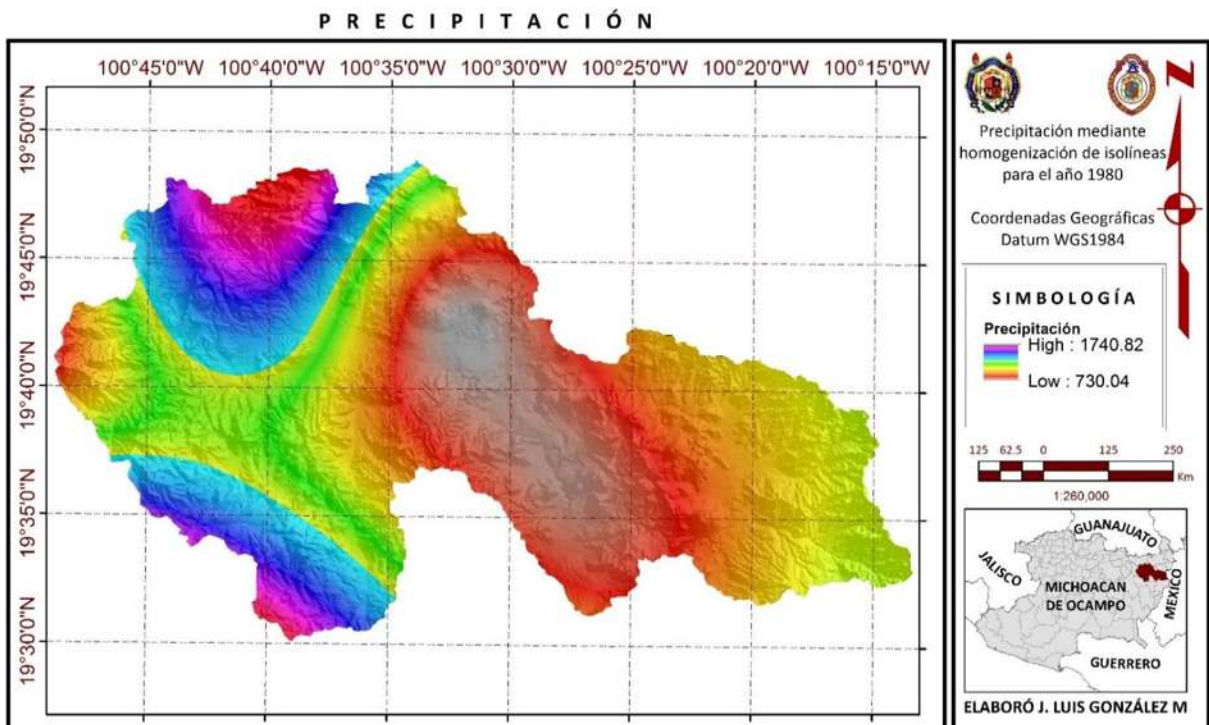


Figura 8.26 Mapa de isolíneas de precipitación para el año 1980

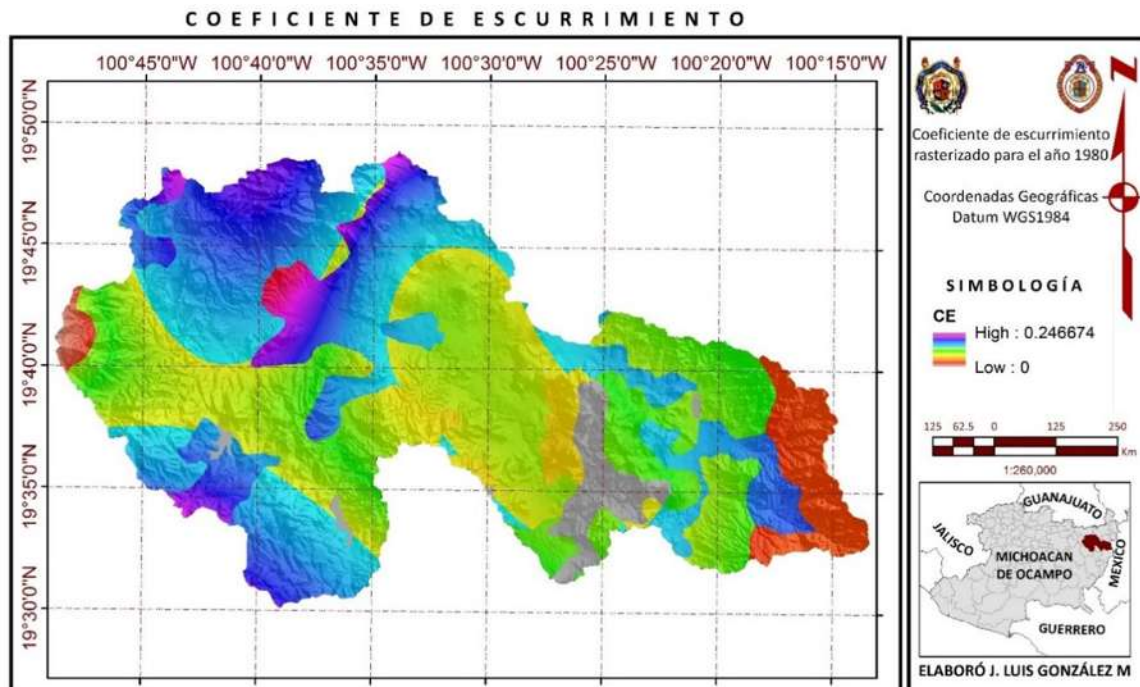


Figura 8.27 Mapa de coeficiente de escurrimiento rasterizado para el año 1980

Finalmente se siguió el mismo paso del método anterior para obtener la disponibilidad hídrica media anual de la cuenca, en la figura 8.28 se muestra el mapa de disponibilidad hídrica para el año de 1980 en m³.

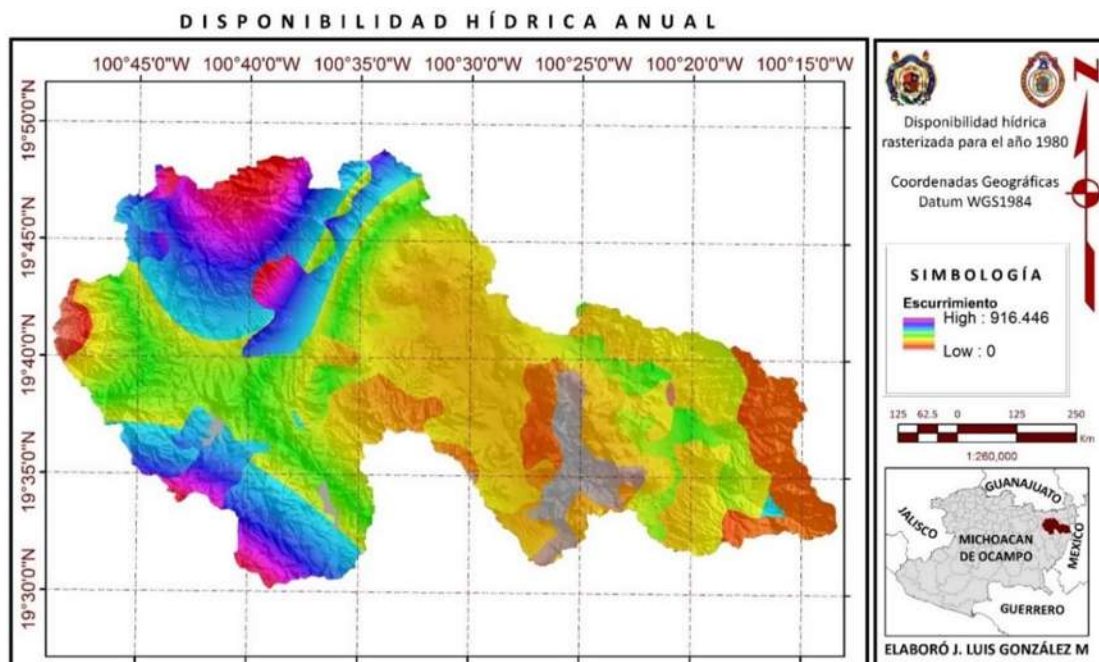


Figura 8.28 Mapa de disponibilidad hídrica (1980) mediante la rasterización del coeficiente de escurrimiento

Tabla 8.11 Disponibilidad hídrica anual mediante la rasterización del coeficiente de escurrimiento (1952-2010)

DISPONIBILIDAD HÍDRICA MEDIA ANUAL			
Año	Hm ³	Año	Hm ³
1952	232.65	1982	121.13
1953	114.96	1983	121.13
1954	200.94	1984	184.74
1955	182.28	1985	164.11
1956	146.75	1986	173.60
1957	114.68	1987	139.10
1958	362.24	1988	277.95
1959	210.20	1989	92.12
1960	96.53	1990	223.76
1961	143.00	1991	152.02
1962	150.18	1992	229.61
1963	181.18	1993	216.97
1964	142.76	1994	164.86
1965	297.11	1995	345.88
1966	260.01	1996	130.77
1967	326.61	1997	130.12
1968	183.66	1998	152.80
1969	143.75	1999	116.11
1970	145.48	2000	189.23
1971	211.20	2001	186.23
1972	192.69	2002	201.37
1973	291.67	2003	212.12
1974	155.73	2004	176.11
1975	180.80	2005	147.66
1976	236.71	2006	204.26
1977	153.23	2007	173.63
1978	180.12	2008	112.06
1979	118.88	2009	171.18
1980	198.18	2010	265.10
1981	198.19		
		MEDIA ANUAL	185.2

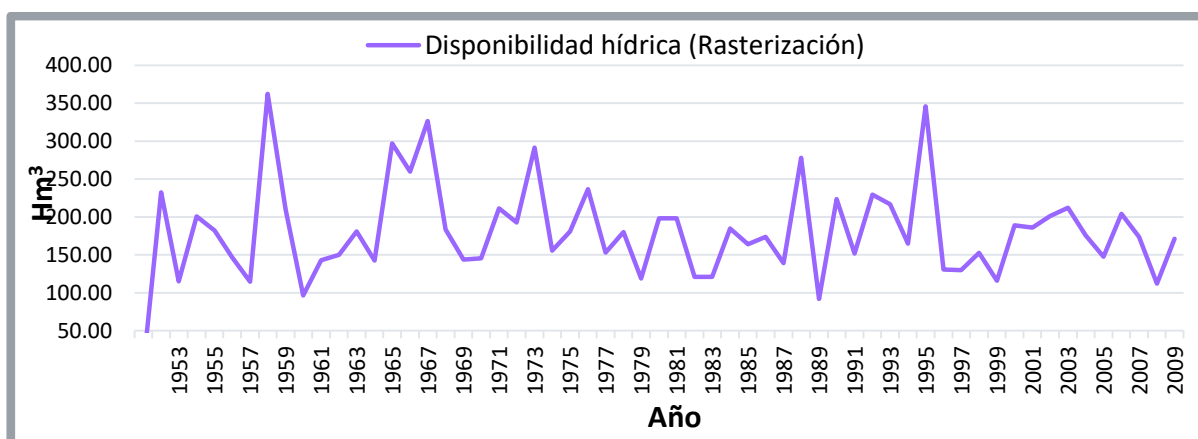


Figura 8.29 Disponibilidad hídrica anual mediante la rasterización del coeficiente de escurrimiento (1952-2010)

8.4.1.4. Polígonos de Thiessen

En la tabla 8.12 se muestra el área de influencia que tiene cada polígono de Thiessen sobre la cuenca y la estación meteorológica que influye.

Tabla 8.12 Influencia de los polígonos de Thiessen sobre la cuenca

CLAVE	NOMBRE	ÁREA (km ²)	% INFLUENCIA
16002	AGOSTITLAN	93.9	7.85
16097	PRESA PUCUATO	141.4	11.81
16235	HUAJUMBARO	148.0	12.36
16071	LOS AZUFRES	150.4	12.56
16152	CIUDAD HIDALGO(SMN)	91.7	7.66
16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	100.5	8.39
16213	IRIMBO	44.4	3.71
16514	JARIPEO	113.4	9.48
16099	PRESA TUXPAN(CFE)	138.9	11.60
16121	SENGUIO	148.9	12.44
15066	PALIZADA	18.0	1.50
16192	LA ENCARNACION	6.8	0.57
16145	ZINAPECUARIO	0.8	0.07

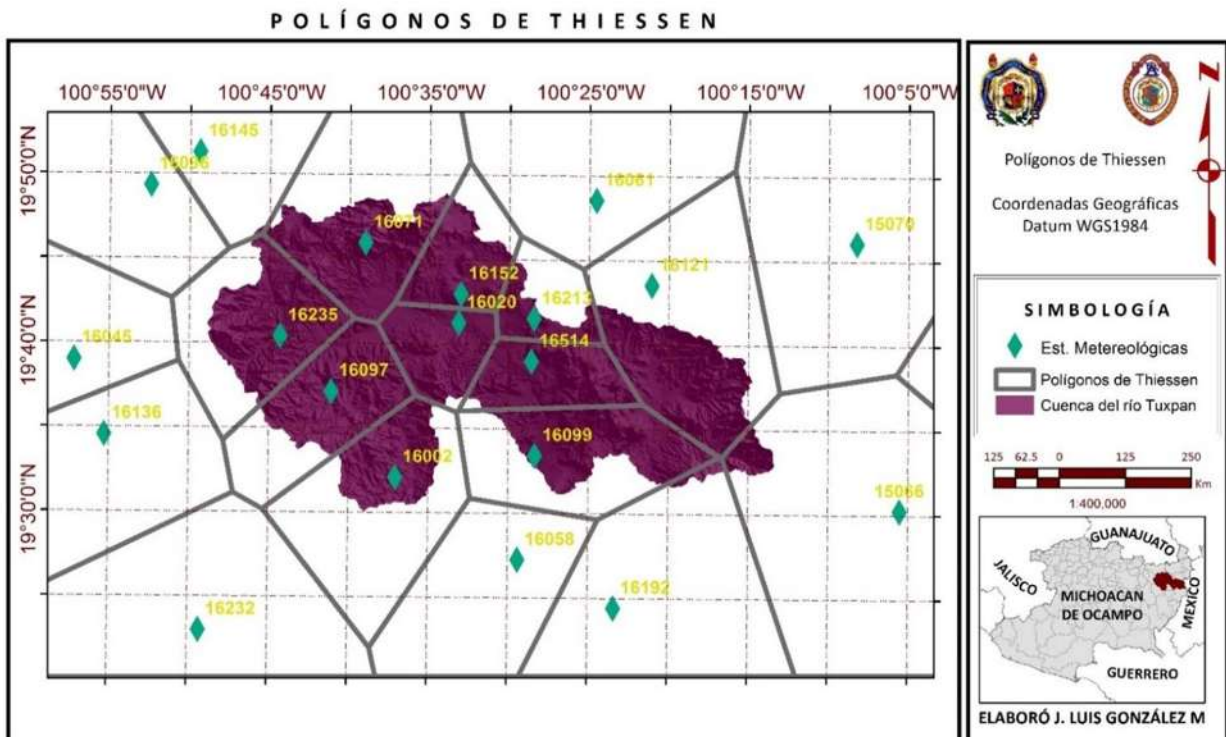


Tabla 8.13 Disponibilidad hídrica anual mediante polígonos de Thiessen (1952-2010)

DISPONIBILIDAD HÍDRICA ANUAL			
Año	Hm3	Año	Hm3
1952	248.47	1982	131.97
1953	117.99	1983	177.74
1954	201.91	1984	185.86
1955	197.66	1985	177.65
1956	158.78	1986	186.63
1957	114.42	1987	136.27
1958	371.64	1988	180.78
1959	213.58	1989	86.13
1960	101.14	1990	234.27
1961	157.41	1991	150.99
1962	159.57	1992	261.01
1963	196.33	1993	240.90
1964	154.05	1994	171.97
1965	312.19	1995	429.51
1966	270.28	1996	137.81
1967	348.12	1997	120.70
1968	194.51	1998	166.80
1969	149.31	1999	112.81
1970	155.21	2000	187.26
1971	221.73	2001	184.97
1972	200.53	2002	204.36
1973	293.34	2003	220.49
1974	166.64	2004	189.36
1975	189.41	2005	157.00
1976	240.75	2006	209.75
1977	165.57	2007	178.17
1978	199.85	2008	120.56
1979	123.40	2009	182.20
1980	202.30	2010	272.01
1981	212.78		
		Media Anual	193.8

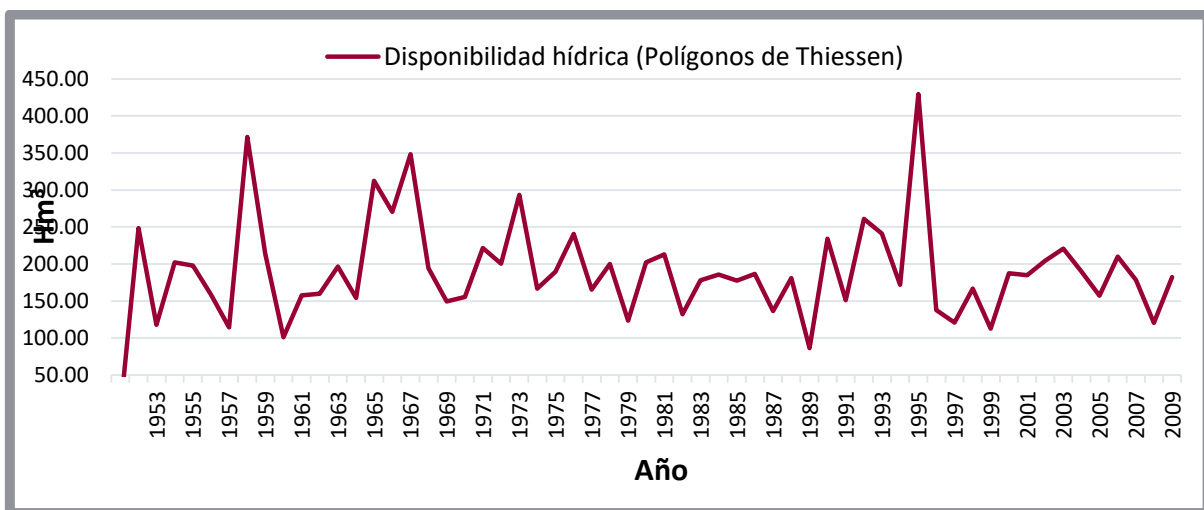


Figura 8.31 Disponibilidad hídrica anual mediante polígonos de Thiessen (1952-2010)

8.4.1.5. Resumen resultados NOM-011-CONAGUA-2015

En la figura 8.32 se muestran los resultados de las tres metodologías desarrolladas para la obtención de la disponibilidad hídrica media anual con la el método Precipitación-Escorrimento contemplado en la NOM-011-CONAGUA-2015, para el periodo de datos 1952-2010.

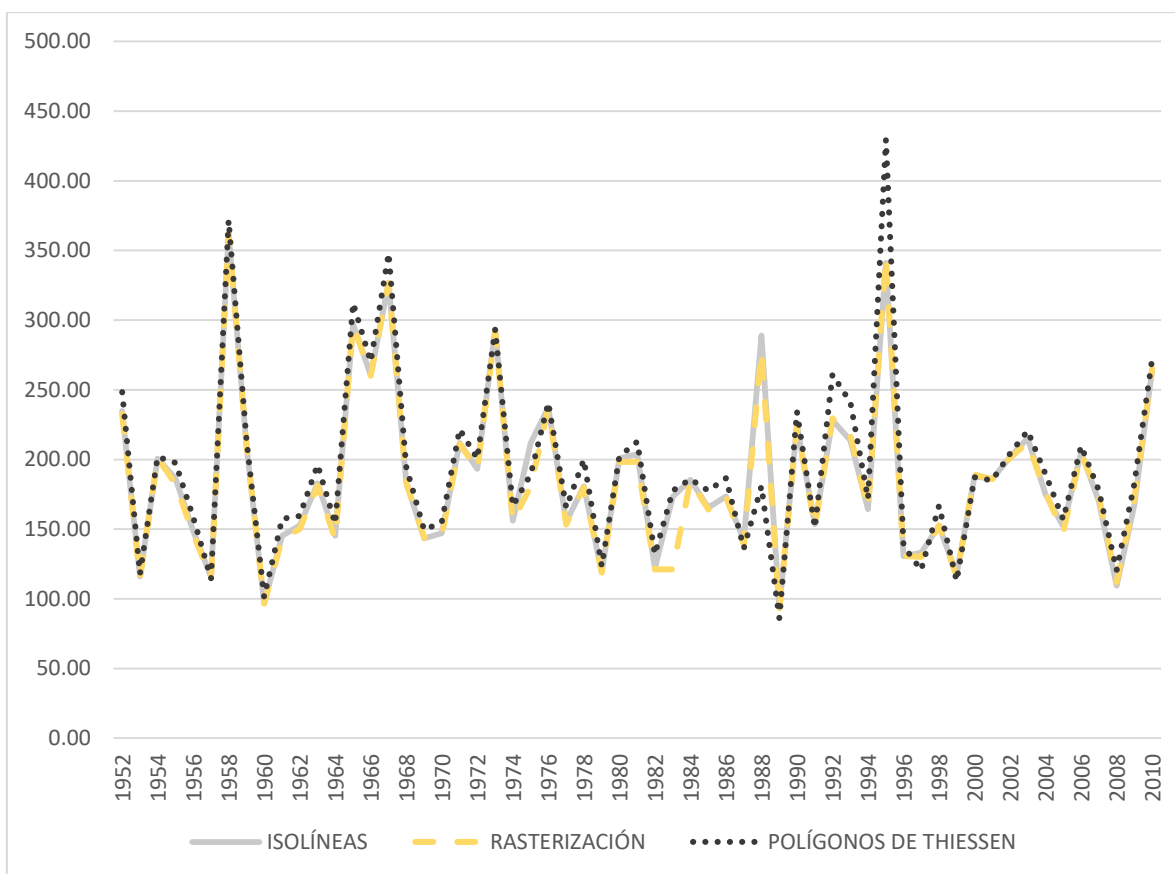


Figura 8.32 Resumen disponibilidad hídrica anual (1952-2010) métodos NOM-011-CONAGUA-2015

8.4.2. Modelación hidrológica con HBV

Para el desarrollo de la modelación hidrológica mediante HBV se utiliza la herramienta EVALHID, la cual permite la modelación del ciclo hidrológico de manera agregada, y dependiendo de la manera en que se manipulen los datos, puede llegar a funcionar como cuasi distribuido. EVALHID realiza una valoración general de la cuenca sin considerar la distribución espacial de las variables y de los parámetros que intervienen en los cálculos, valores que son sustituidos por valores medios, es por ello que dicho modelo se limita para

cuenas pequeñas y de tamaño medio, en donde puede existir cierta homogeneidad en clima, edafología y geología; para lograrlo la cuenca se divide en microcuenas en función de la red de drenaje y topografía.

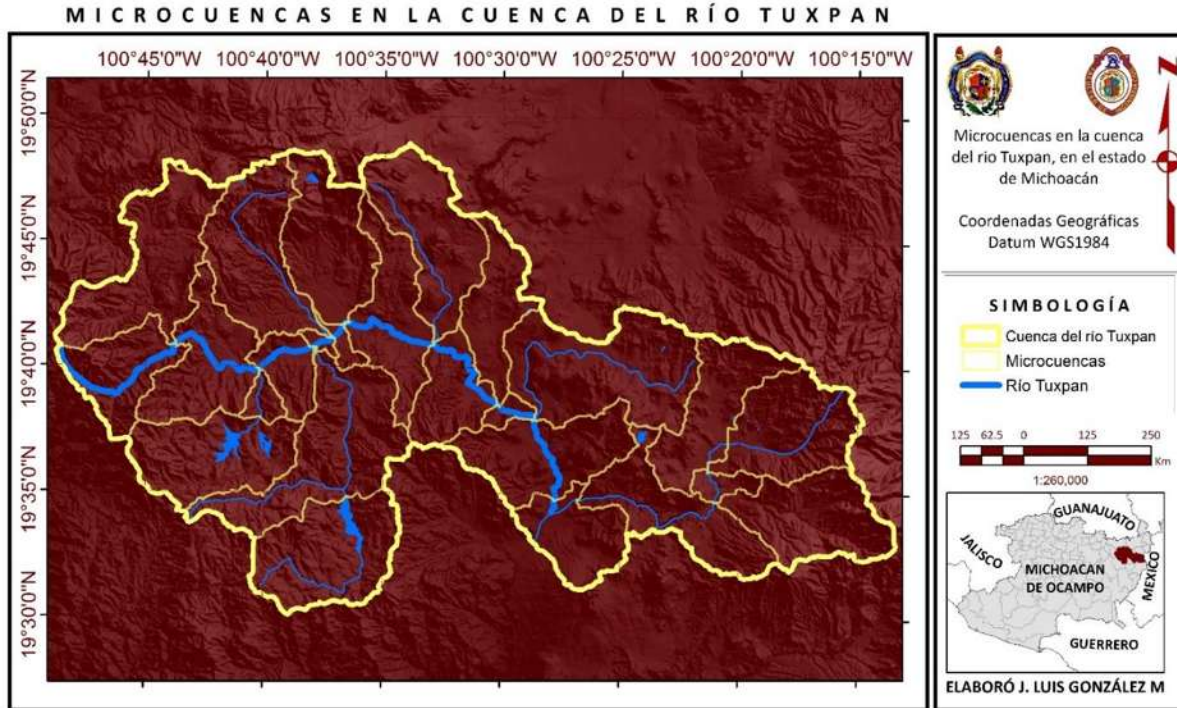
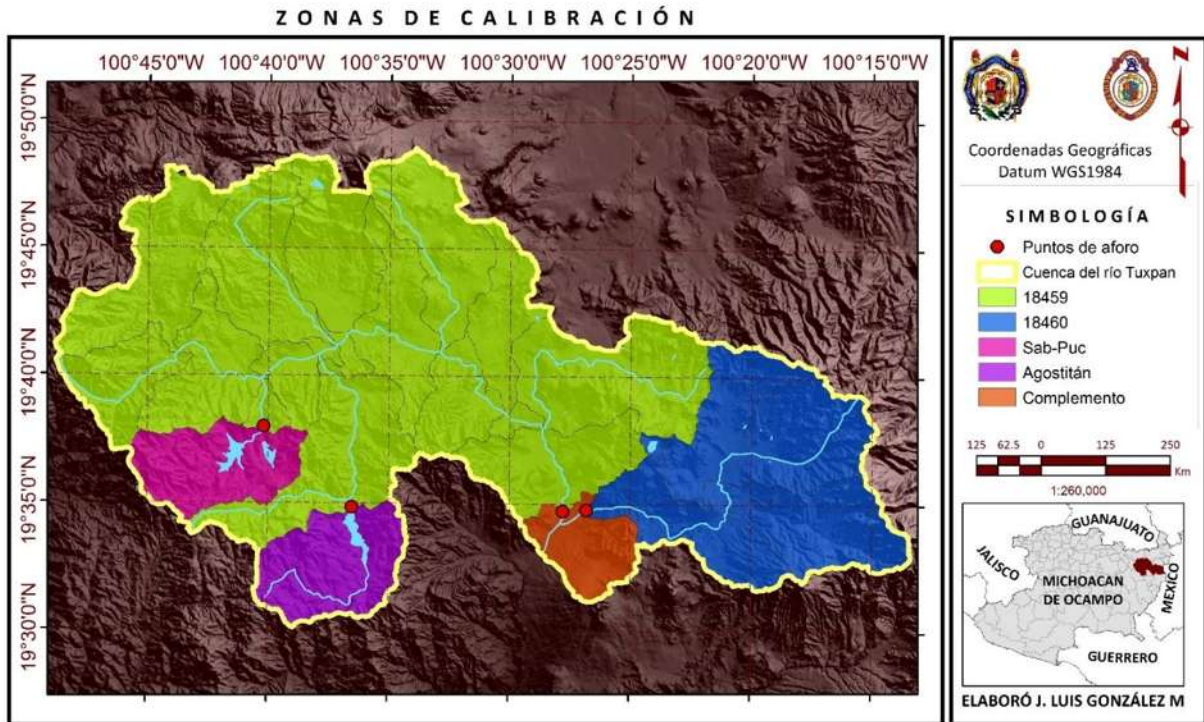


Figura 8.33 Microcuenas en la cuenca del río Tuxpan

Definidas las microcuenas, se establecieron los puntos de aforo que se tienen en la zona, mismos que definen los puntos de calibración para el modelo. Par el caso de la cuenca del río Tuxpan, se tienen dos estaciones hidrométricas con claves 18459 y 18460, y tres presas, de las cuales La Sabaneta y Pucato confluyen al mismo río, por lo que se modelaran como una sola; la tercera es la presa Mata de Pinos o Agostitlán.

Estos puntos definen las zonas de calibración del modelo (García, 2015), por lo que se delimitan cuatro subcuenas o zonas de calibración.



Posteriormente se definieron las zonas de influencia que tienen cada una de las estaciones climatológicas sobre la Cuenca. Esto permitirá generar las series de precipitación, temperatura y evapotranspiración de la zona en estudio para alimentar el modelo y obtener los escurrimientos superficiales.

Conociendo las áreas de influencia de cada estación climatológica y teniendo establecidas las cuatro zonas de calibración, se determinó que estación climatológica tiene influencia sobre cada una de las microcuencas de modelación. Cuando una microcuenca está afectada por dos más estaciones, se construye una estación ficticia en el centroide de la microcuenca, la cual se origina con los datos de las estaciones reales que influyen sobre la superficie de dicha microcuenca; el método para la construcción de las estaciones ficticias fue el mismo método utilizado para el llenado de vacíos; es decir, el inverso de la distancia euclidiana al cuadrado, el cual define un peso distinto para cada estación involucrada dependiendo de la influencia que ésta ejerza sobre la zona de estudio.

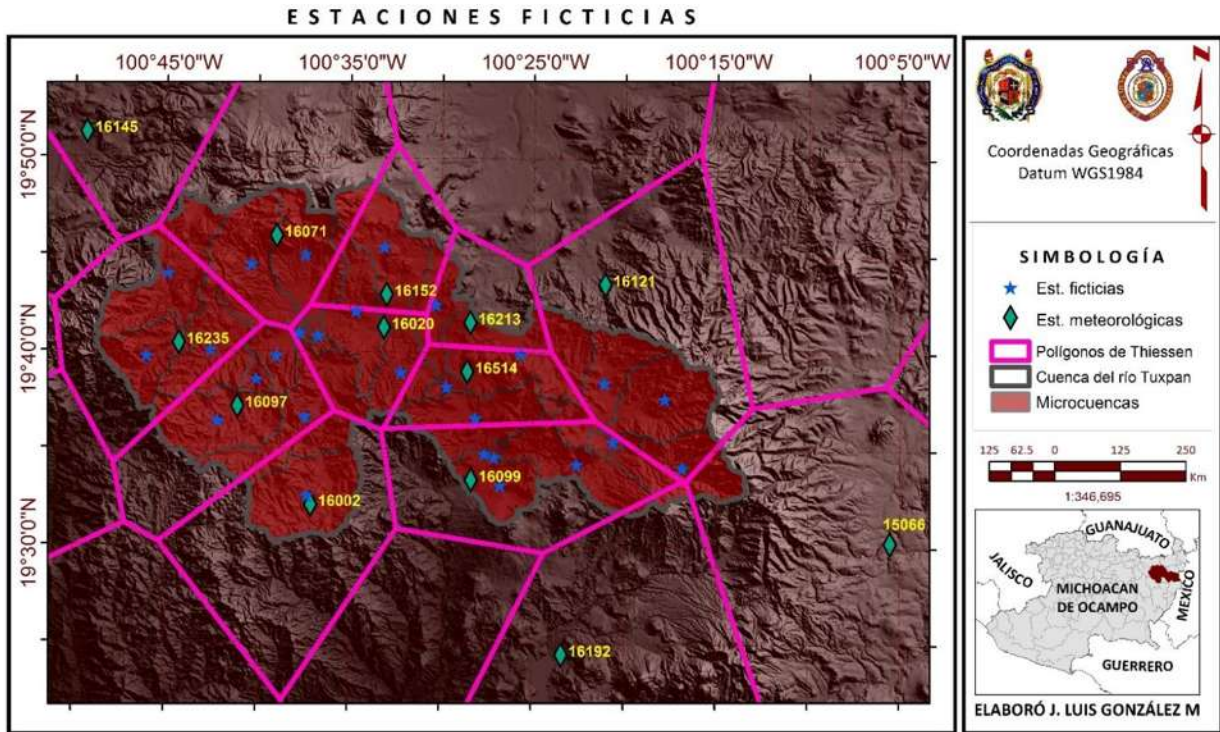


Figura 8.35 Estaciones ficticias

Habiendo definido las zonas de calibración del modelo y los datos climatológicos para cada una de ellas, se procede con el calentamiento, la calibración y validación del modelo.

8.4.2.1. Calentamiento.

Se hizo una simulación previa con parámetros que asigna EVALHID, para obtener datos de aportación de la cuenca (escurrimiento), esto con el fin de que los datos a calibrar, partan de la precipitación, temperatura y evapotranspiración, reales de la cuenca.

8.4.2.2. Calibración

Se utilizó el algoritmo evolutivo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method developed at The University of Arizona), (Duan, et al., 1994) para cada una de las zonas de calibración.

8.4.2.2.1. Zona 18460

1 8 4 6 0

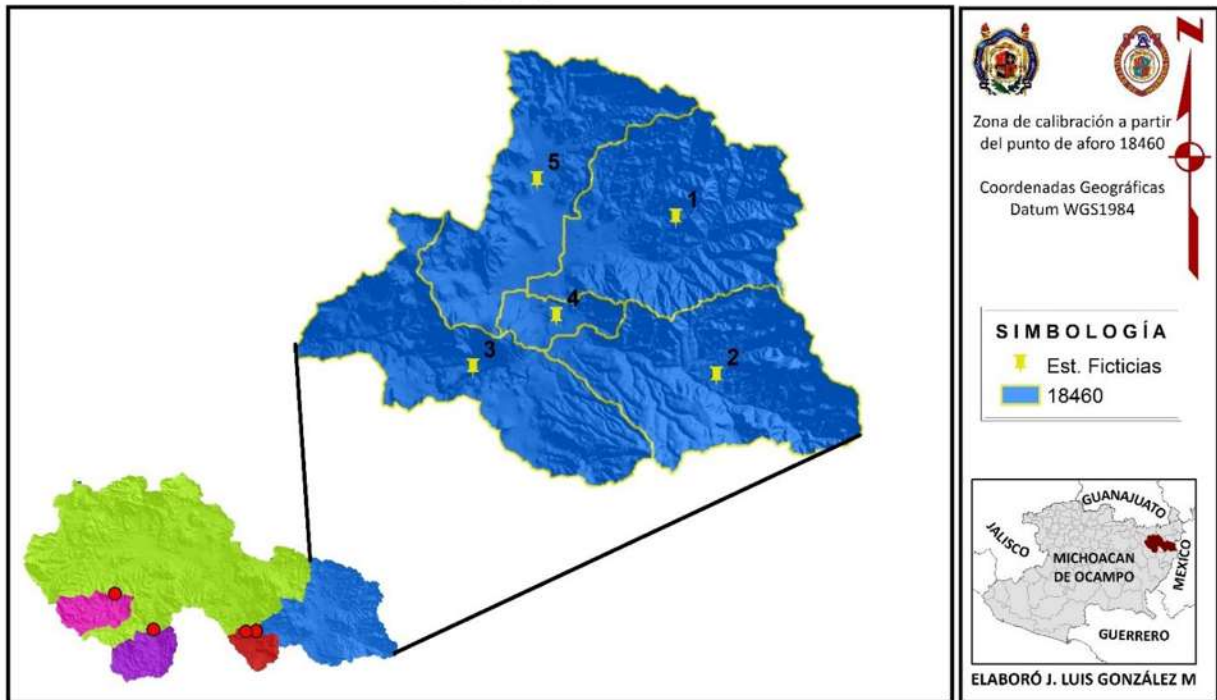


Figura 8.36 Zona de calibración 18460

Tabla 8.14 Superficie de las microcuencas y coordenadas de las estaciones ficticias (Zona 18460)

Microcuenca	Área (Km ²)	X	Y	Z
1	62.02	364015.82	2170775.14	2818.31
2	58.87	365689.31	2164263.52	2763.91
3	57.21	355641.95	2164595.54	2258.00
4	8.44	359082.70	2166712.52	2297.87
5	52.12	358287.87	2172336.46	2320.00

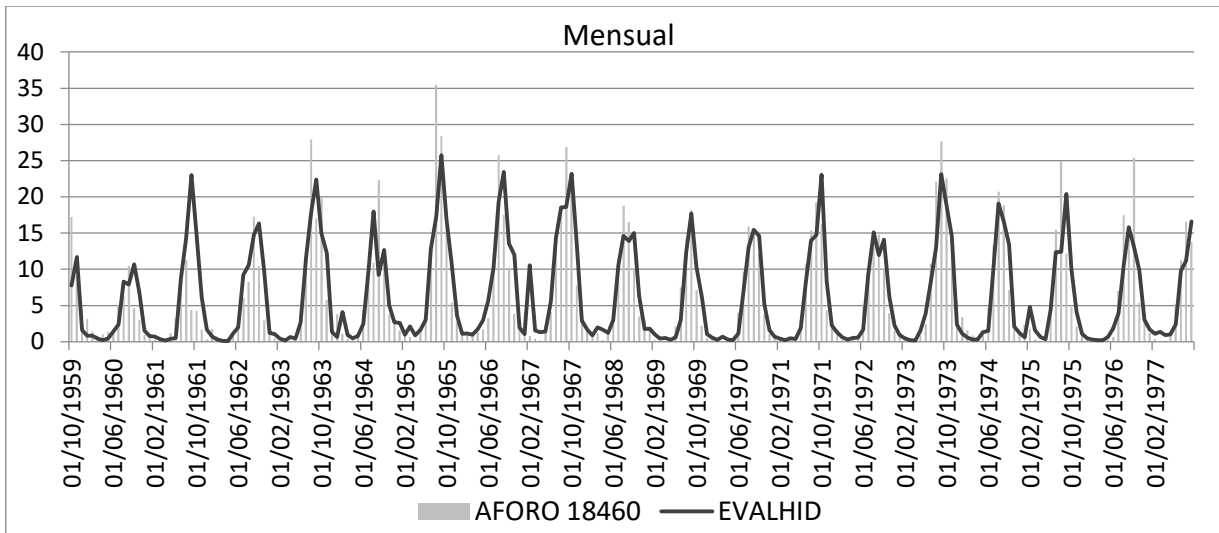


Figura 8.37 Gráfico comparativo de caudal mensual entre EVALHID y el aforo 18460

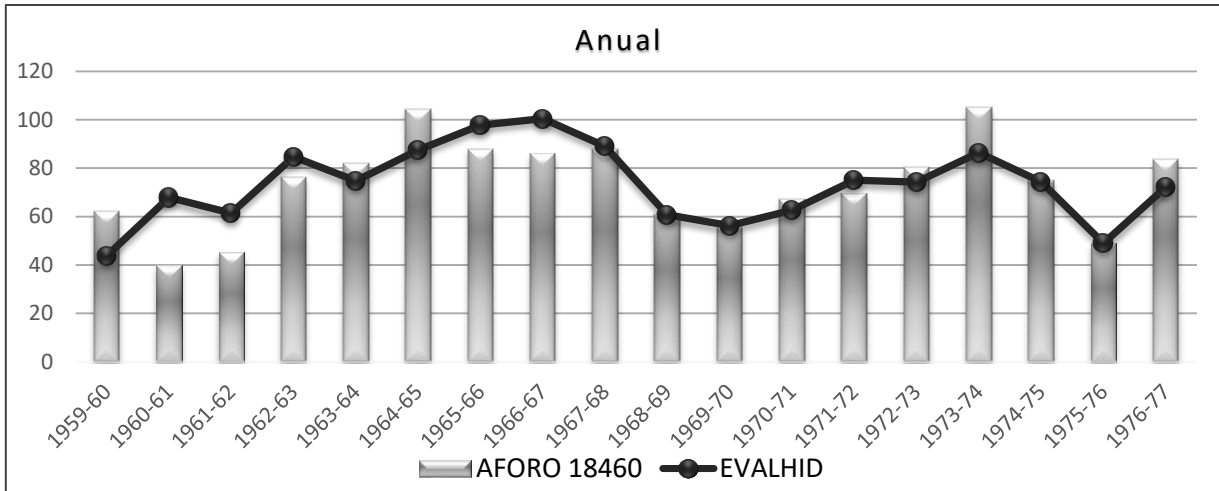


Figura 8.38 Gráfico comparativo de caudal anual entre EVALHID y el aforo 18460

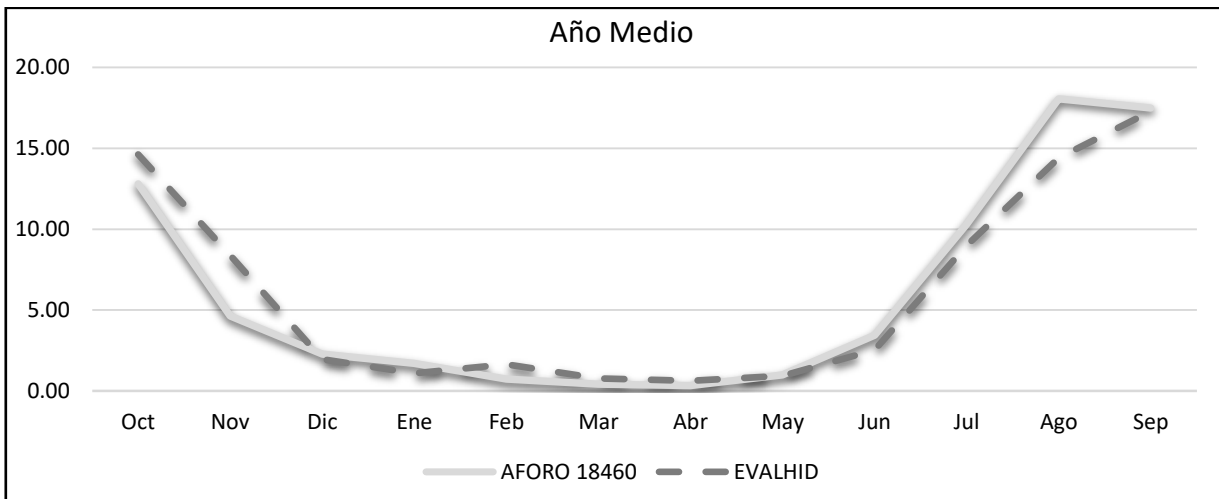


Figura 8.39 Gráfico comparativo de caudal medio mensual entre EVALHID y el aforo 18460

8.4.2.2.2. Zona 18459

1 8 4 5 9

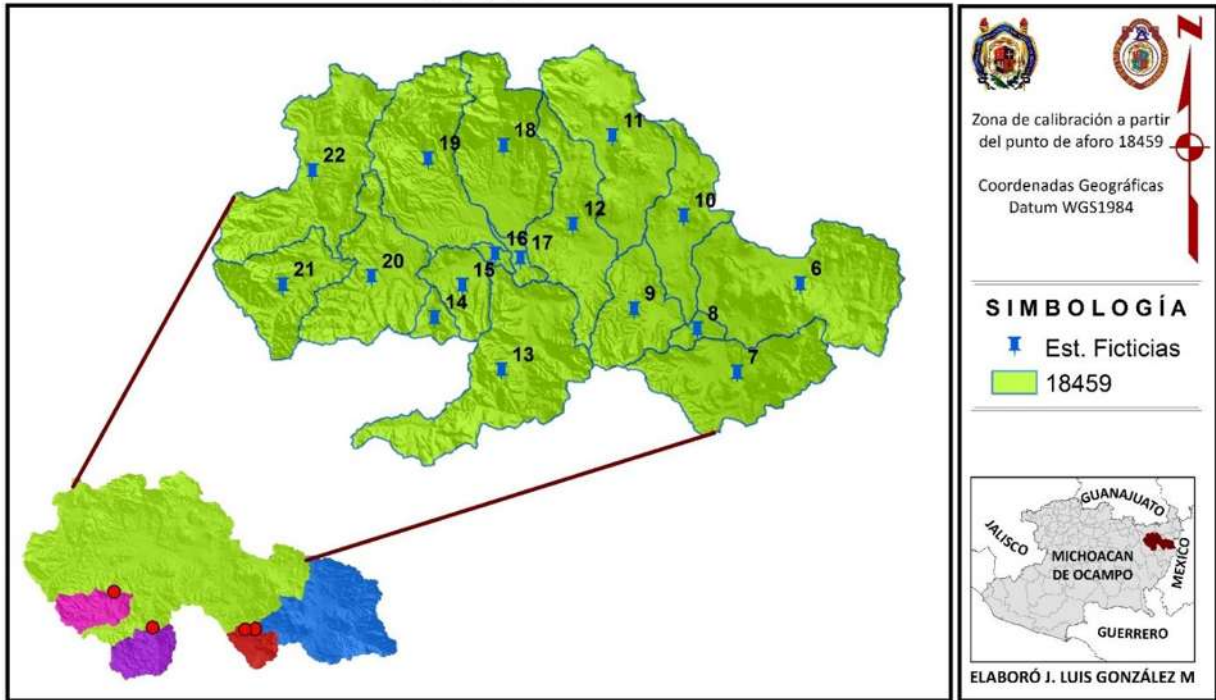


Figura 8.40 Zona de calibración 18459

Tabla 8.15 Superficie de las microcuencas y coordenadas de las estaciones ficticias (Zona 18459)

Microcuenca	Área (Km ²)	X	Y	Z
6	93.94	350315.46	2175148.75	2318.75
7	60.32	345988.94	2169052.27	1766.68
8	5.69	343230.87	2172053.12	1814.00
9	35.23	338898.95	2173433.96	2067.12
10	38.32	342295.66	2179827.94	2087.10
11	67.09	337401.84	2185341.77	2462.13
12	52.21	334686.33	2179259.19	2128.90
13	87.74	329769.35	2169229.41	2457.84
14	7.46	325158.80	2172828.75	2387.43
15	20.59	327052.11	2175051.74	2193.36
16	3.11	329317.11	2177207.10	2086.00
17	5.46	331064.73	2176927.06	2126.55
18	61.60	329898.61	2184655.52	2317.53
19	70.51	324702.71	2183766.71	2392.02
20	55.08	320812.77	2175657.48	2178.47
21	41.07	314710.36	2175078.28	2540.82
22	77.49	316756.25	2182939.35	2421.20

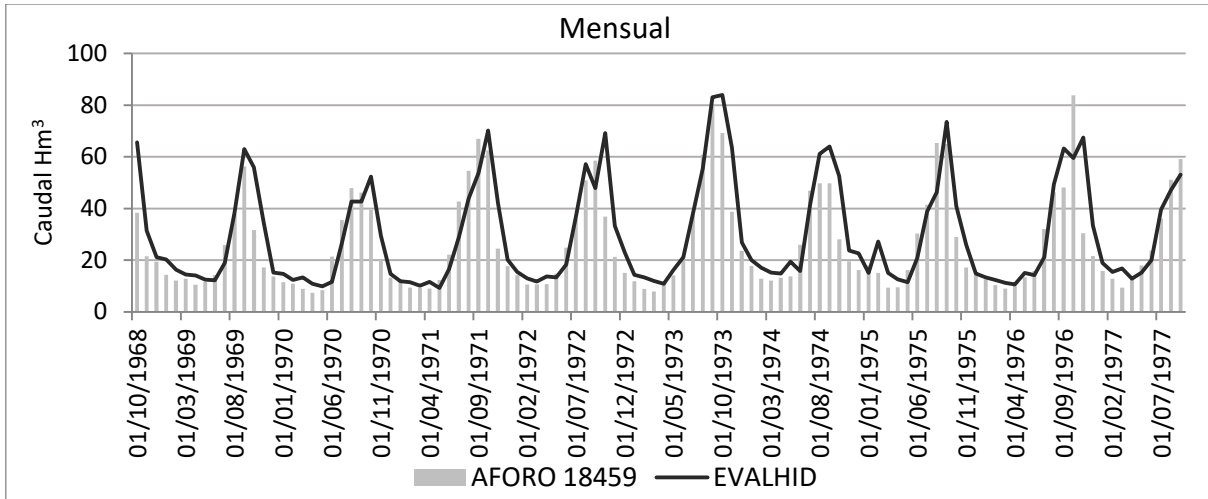


Figura 8.41 Gráfico comparativo de caudal mensual entre EVALHID y el aforo 18459

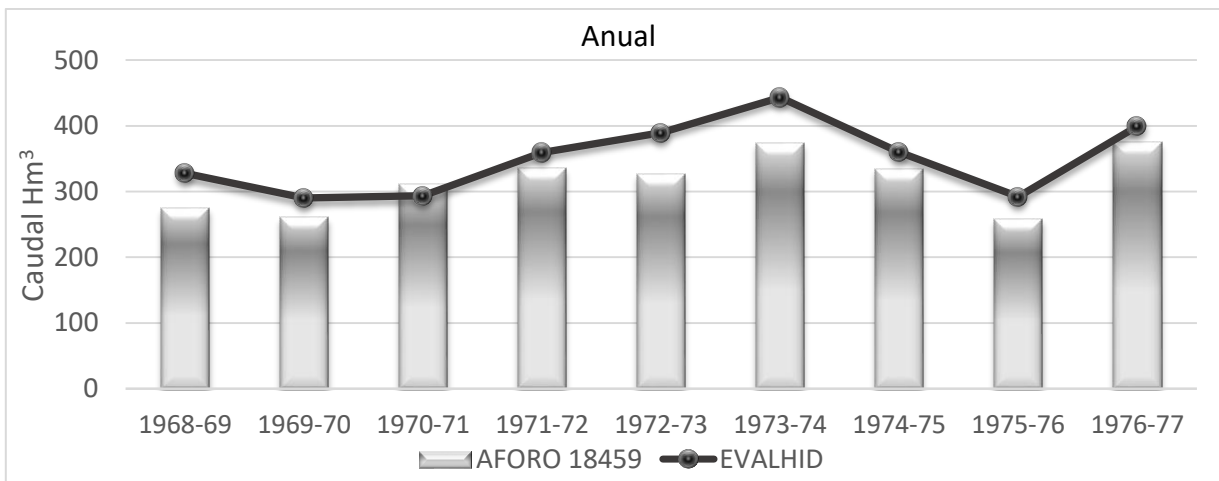


Figura 8.42 Gráfico comparativo de caudal anual entre EVALHID y el aforo 18459

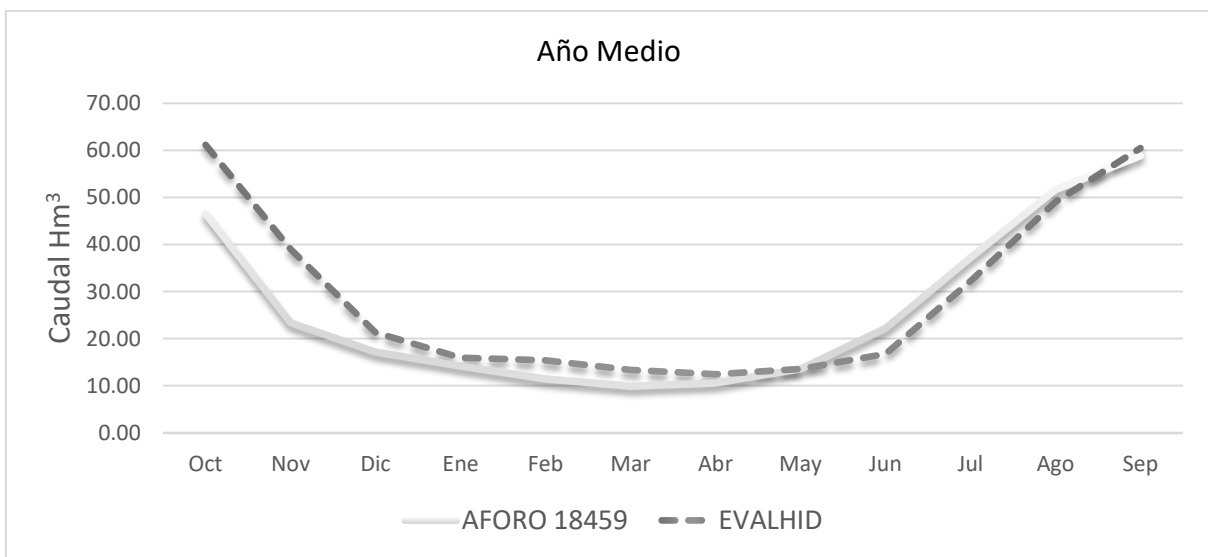


Figura 8.43 Gráfico comparativo de caudal medio mensual entre EVALHID y el aforo 18459

8.4.2.2.3. Zona La Sabaneta y Pucato

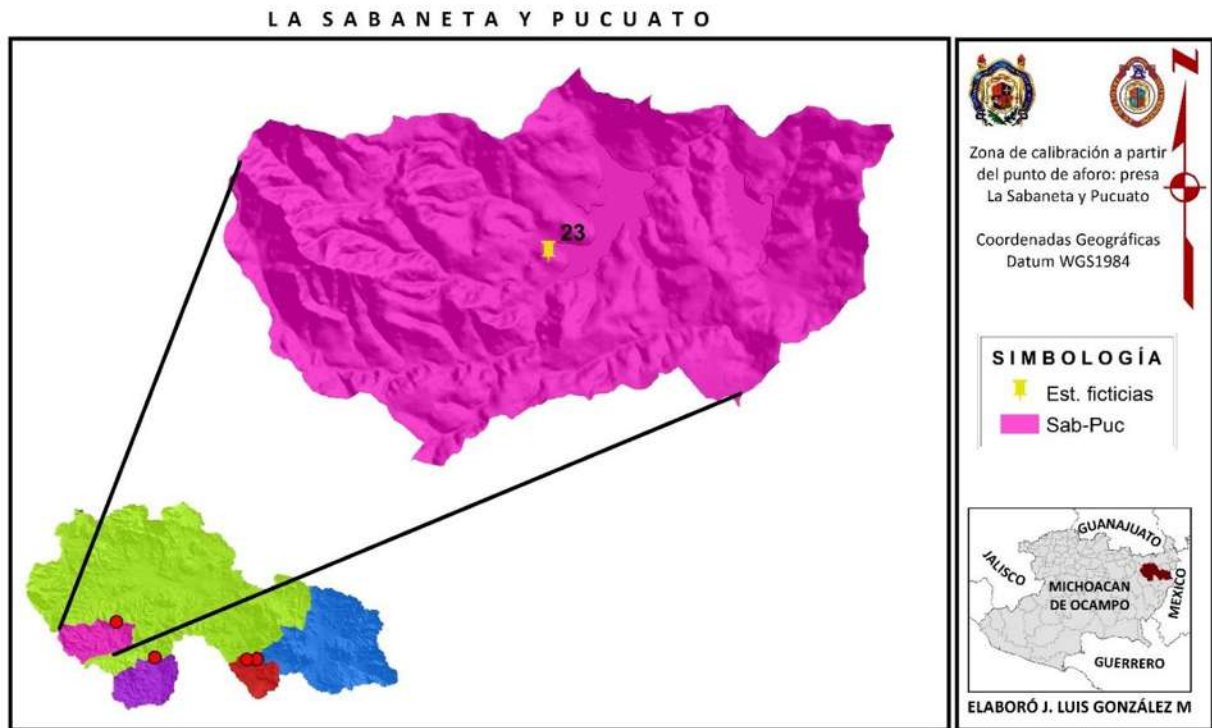


Figura 8.44 Zona de calibración La Sabaneta y Pucato

Tabla 8.16 Superficie de la microcuena y coordenada de la estación ficticia (Zona La Sabaneta y Pucato)

Microcuena	Área (Km ²)	X	Y	Z
23	63.71	321440.97	2168901.68	2521.00

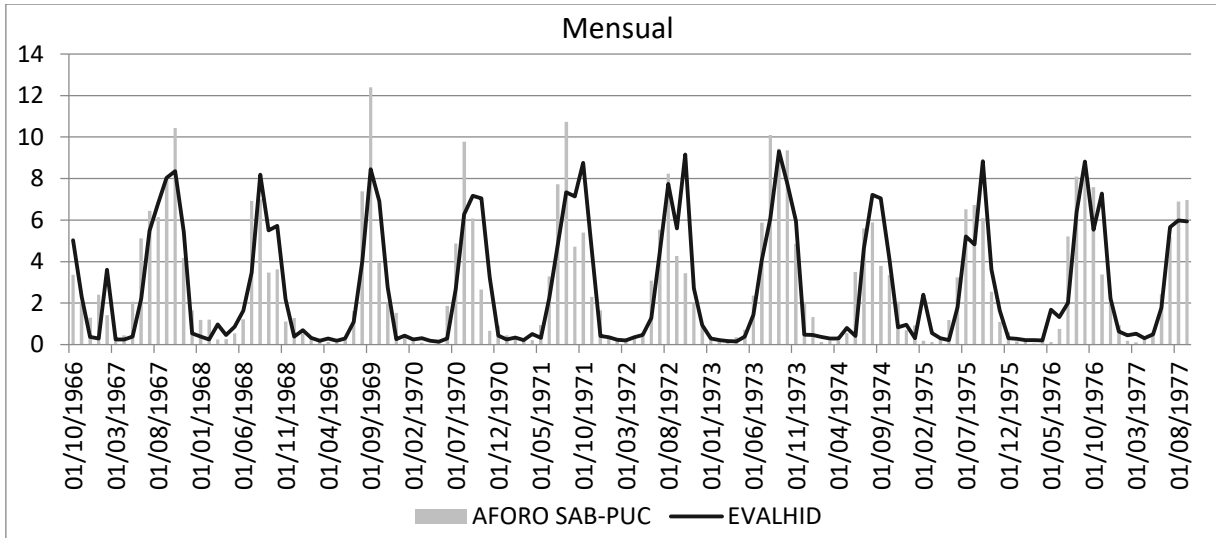


Figura 8.45 Gráfico comparativo de caudal mensual entre EVALHID y el aforo La Sabaneta y Pucato

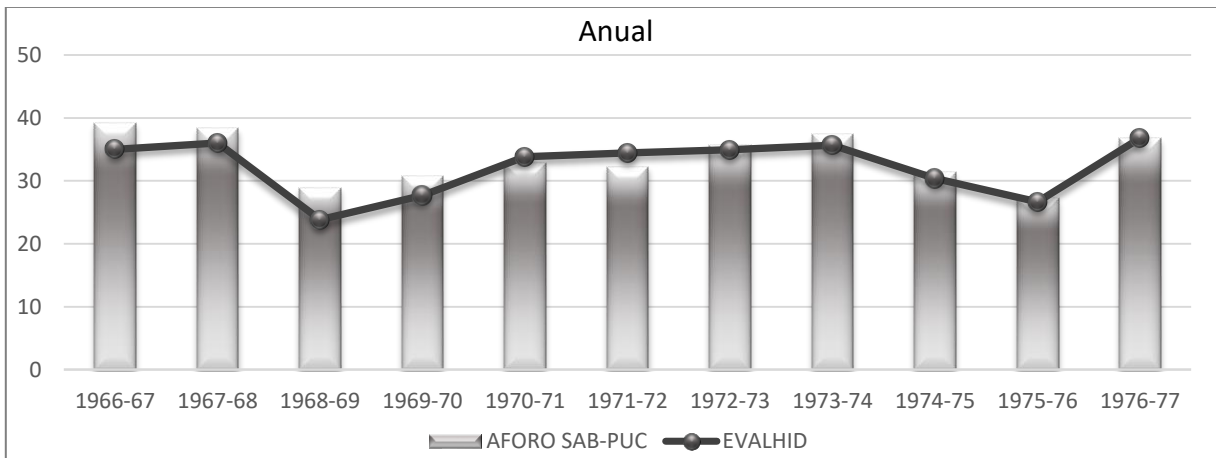


Figura 8.46 Gráfico comparativo de caudal anual entre EVALHID y el aforo La Sabaneta y Pucato

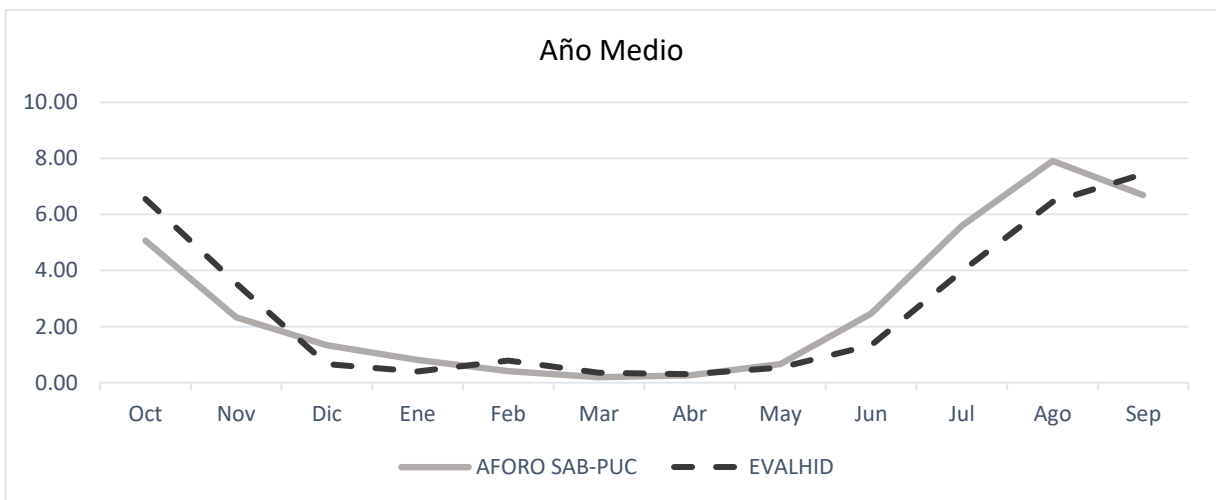


Figura 8.47 Gráfico comparativo de caudal medio mensual entre EVALHID y el aforo La Sabaneta y Pucato

8.4.2.2.4. Zona Mata de Pinos (Agostitlán)

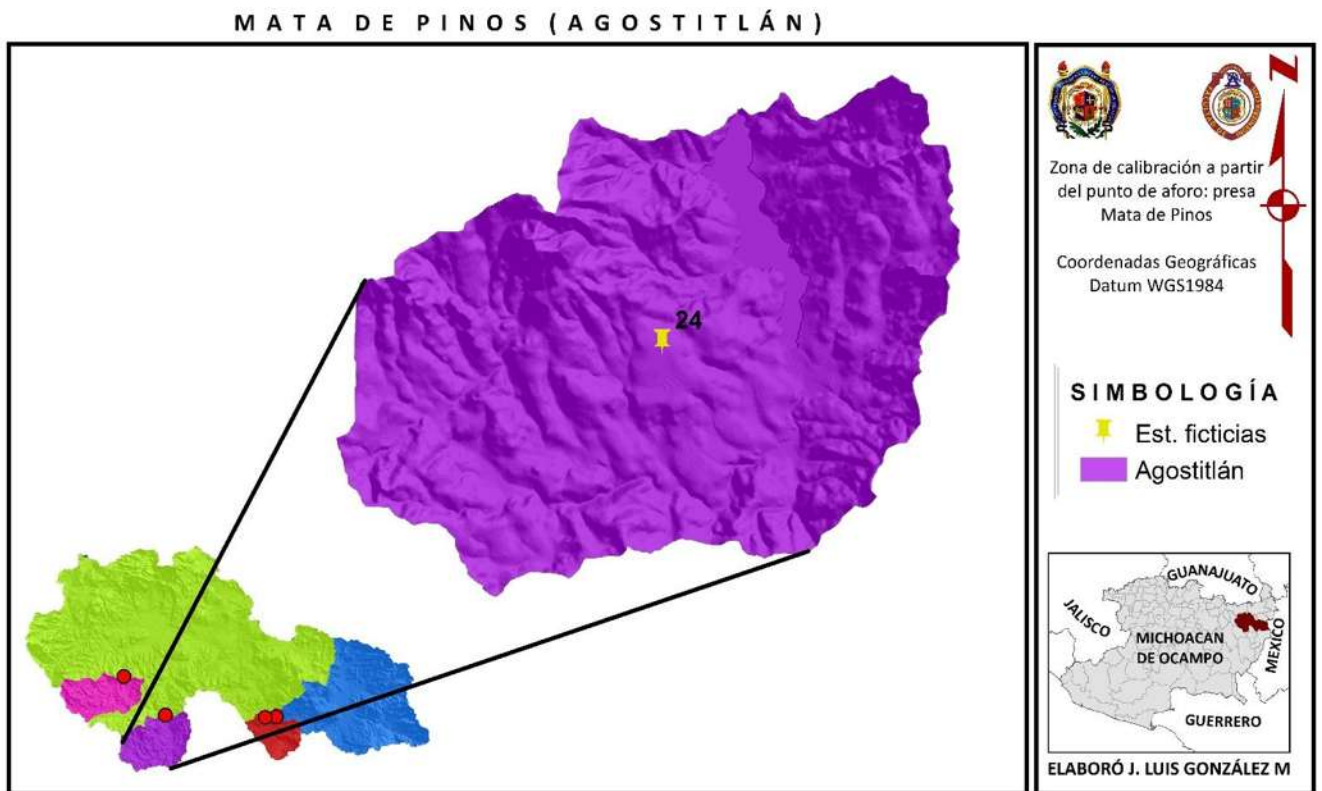


Figura 8.48 Zona de calibración Mata de Pinos (Agostitlán)

Tabla 8.17 Superficie de la microcuenca y coordenada de la estación ficticia (Zona Mata de Pinos, Agostitlán)

Microcuenca	Área (Km ²)	X	Y	Z
24	70.67	329916.35	2161722.85	2533.13

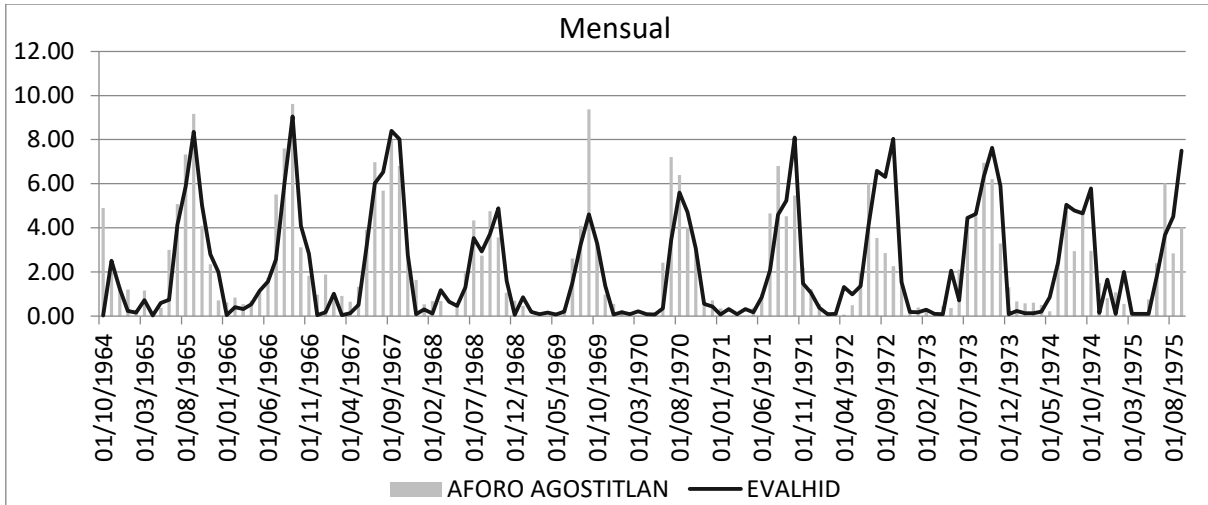


Figura 8.49 Gráfico comparativo de caudal mensual entre EVALHID y el aforo Mata de Pinos (Agostitlán)

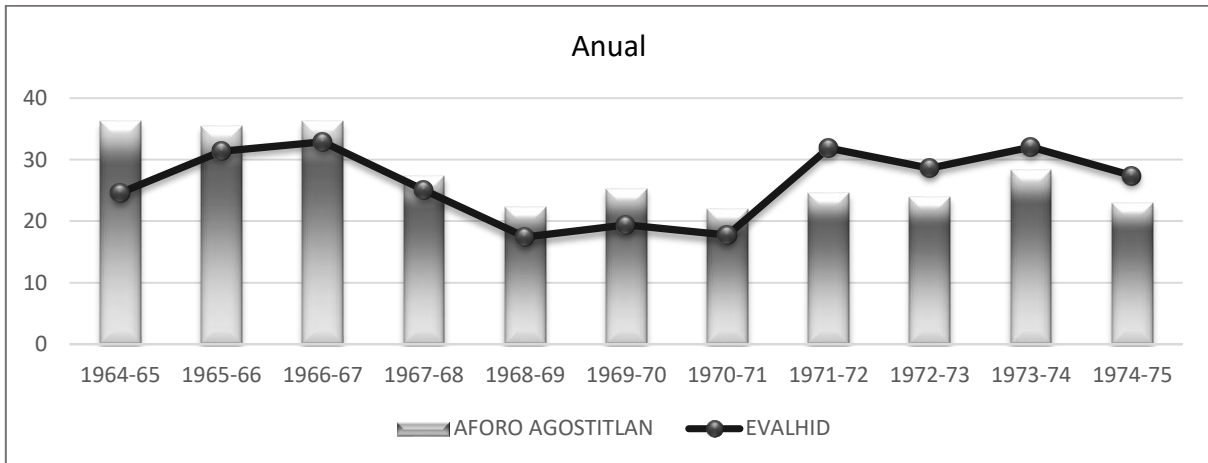


Figura 8.50 Gráfico comparativo de caudal anual entre EVALHID y el aforo Mata de Pinos (Agostitlán)

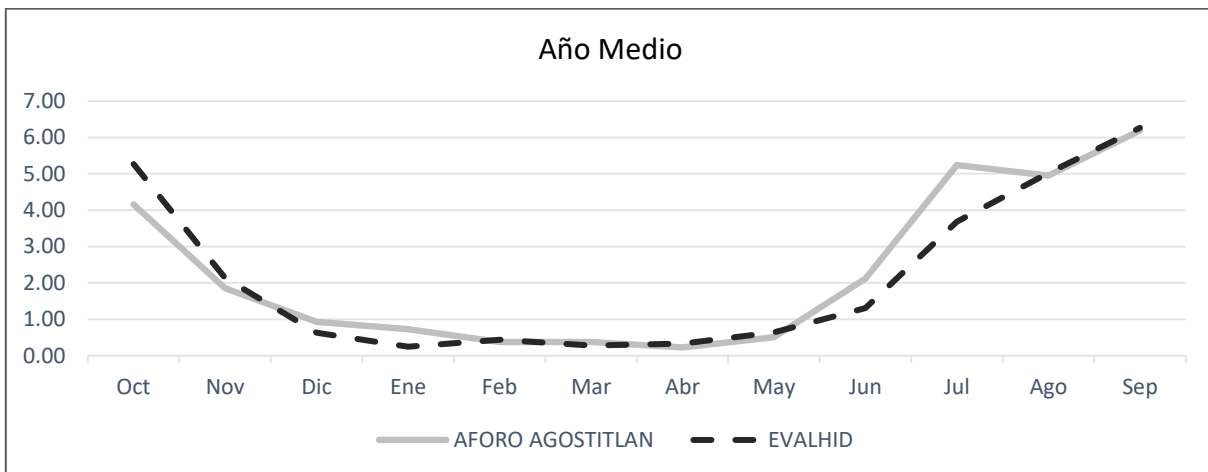


Figura 8.51 Gráfico comparativo de caudal medio mensual entre EVALHID y el aforo Mata de Pinos (Agostitlán)

Los periodos de calibración de mejor ajuste para cada una de las zonas de calibración se muestran en la tabla 8.18.

Tabla 8.18 Periodos de calibración

Z O N A	PERIODO
18460	1959-1977
18459	1968-1977
Sabaneta-Pucuato	1966-1977
Agostitlán	1962-1973

En la tabla 8.19 se muestran los resultados de las cuatro funciones objetivo, integradas en el calibrador SCEUA para cada una de las zonas de calibración.

Tabla 8.19 Valor alcanzado por las funciones objetivo en la etapa de calibración

Z O N A	F U N C I Ó N O B J E T I V O				
	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F _{medio}
18460	0.737	0.809	0.859	1.000	0.851
18459	0.710	0.806	0.877	0.988	0.846
Sabaneta-Pucuato	0.709	0.743	0.850	0.998	0.825
Agostitlán	0.669	0.436	0.841	0.997	0.736

Para finalizar la etapa de calibración en la tabla 8.20, se detallan los resultados de los parámetros obtenidos al calibrar cada una de las zonas, los cuales al ser validados, serán usados para la modelación de la zona de estudio.

Tabla 8.20 Resultados de los parámetros para el modelo HBV

Z O N A	P A R Á M E T R O S H B V							
	Beta	FC	PWP	Lmax	k0	k1	k2	kperc
18460	1.0145	715.285	610.384	28.043	0.320	0.300	0.0001	0.3035
18459	1.0038	899.999	263.369	8.890	0.360	0.260	0.0793	0.370
Sabaneta-Pucuato	1.0023	676.500	650.000	28.850	0.400	0.198	0.0004	0.400
Agostitlán	1.0021	899.996	265.692	10.445	0.422	0.202	0.0002	0.657
Complemento	1.0145	715.285	610.384	28.043	0.320	0.300	0.0001	0.3035

8.4.2.3. Validación

Se generó la validación de las series calibradas mediante los indicadores de ajuste propuestos por Moriasi, et al., (2007), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el porcentaje de sesgo (PBIAS), y la proporción del error cuadrático medio de la desviación estándar de los datos medidos (RSR), los valores obtenidos se muestran en la tabla 8.21.

Tabla 8.21 Valores de los indicadores de ajuste de Moriasi et al. 2007

ZONA	INDICADORES DE AJUSTE		
	RSR	NSE	PBIAS
18460	0.513	0.737	-0.043
18459	0.538	0.710	-10.778
Sabaneta-Pucuateo	0.539	0.710	3.867
Agostitlán	0.575	0.669	5.134

En la tabla 8.22 de acuerdo a la clasificación de rendimiento (tabla #) se muestra que las zonas calibradas oscilan entre una validación buena (good) y muy buena (very good). Por lo que la validación se considera aceptable.

Tabla 8.22 Clasificación de rendimiento de los indicadores de ajuste de Moriasi

ZONA	CLASIFICACIÓN DE RENDIMIENTO		
	RSR	NSE	PBIAS
18460	BUENO	BUENO	MUY BUENO
18459	BUENO	BUENO	BUENO
Sabaneta-Pucuateo	BUENO	BUENO	MUY BUENO
Agostitlán	BUENO	BUENO	MUY BUENO

8.4.2.4. Disponibilidad hídrica media anual

Finalmente se realiza la modelación en EVALHID con los parámetros obtenidos de la etapa de calibración y las series históricas de precipitación, temperatura y las calculadas de evapotranspiración.

Tabla 8.23 Disponibilidad hídrica media anual por subcuencas de modelación mediante HBV

	18460	18459	SAB-PUC	AGOSTITLÁN	COMPLEMENTO	TOTAL
	Hm ³	Hm ³	Hm ³	Hm ³	Hm ³	Hm ³
1952	73.07	210.22	27.97	16.73	13.62	341.61
1953	42.85	197.14	25.61	8.59	5.50	279.70
1954	71.63	290.31	31.38	20.39	7.72	421.43
1955	76.75	293.83	31.86	26.50	10.79	439.73
1956	54.29	279.58	31.48	29.21	6.15	400.72
1957	48.10	224.19	22.24	17.72	5.51	317.77
1958	109.30	401.19	42.97	31.93	13.78	599.18
1959	86.67	463.65	38.03	26.56	8.63	623.54
1960	42.36	242.17	18.14	15.84	5.67	324.17
1961	71.60	232.90	26.89	18.95	15.67	366.02
1962	66.43	229.36	27.16	22.91	11.28	357.15
1963	85.99	272.64	31.10	25.97	15.53	431.23
1964	66.80	237.25	23.17	19.82	12.96	360.00
1965	98.51	414.07	38.00	30.21	14.04	594.84
1966	94.19	468.63	37.42	28.17	14.15	642.57
1967	112.73	530.03	42.38	40.20	18.14	743.48
1968	72.76	420.22	30.70	21.07	10.83	555.58
1969	55.41	314.72	26.21	19.19	6.86	422.38
1970	60.37	280.89	29.15	22.11	9.58	402.10
1971	74.90	329.11	37.57	24.70	11.92	478.20
1972	64.05	352.19	34.27	31.41	10.83	492.74
1973	87.62	438.21	36.97	32.34	15.26	610.40
1974	67.74	367.60	28.09	23.87	10.64	497.95
1975	72.95	342.03	30.71	24.39	8.55	478.63
1976	60.08	370.44	36.83	16.22	5.25	488.81
1977	65.11	336.47	30.08	22.55	9.70	463.92
1978	67.50	328.74	35.84	25.01	10.81	467.89
1979	40.49	246.05	24.37	18.80	6.56	336.26
1980	73.69	300.18	30.41	22.77	8.90	435.94
1981	80.47	331.45	34.35	25.18	13.38	484.83
1982	40.02	262.17	27.18	16.81	8.51	354.70
1983	58.79	290.73	27.72	14.57	10.42	402.24
1984	72.72	310.62	24.01	22.33	13.17	442.86
1985	74.03	301.72	31.18	18.93	13.79	439.66
1986	56.45	317.56	28.90	22.99	12.00	437.90
1987	53.95	270.77	23.15	18.32	9.01	375.21
1988	74.20	276.90	23.53	20.01	10.36	404.99
1989	32.07	177.00	19.14	8.31	5.46	241.98

1990	88.28	301.97	35.50	16.27	14.49	456.51
1991	55.67	292.86	31.00	11.88	7.23	398.63
1992	86.58	380.96	42.60	29.18	12.50	551.82
1993	87.22	395.77	20.97	26.77	6.91	537.63
1994	62.13	316.17	34.80	24.91	7.62	445.62
1995	117.43	488.64	35.24	30.78	10.45	682.53
1996	66.54	331.96	25.73	19.09	11.45	454.77
1997	51.40	251.40	18.97	12.04	8.40	342.22
1998	66.94	250.38	28.15	18.42	12.36	376.25
1999	53.15	212.48	21.76	14.95	9.64	311.98
2000	83.35	264.86	21.76	14.58	9.86	394.40
2001	63.14	300.92	32.17	22.78	11.54	430.56
2002	79.18	302.91	31.44	21.78	14.16	449.48
2003	99.61	343.03	31.19	22.01	15.71	511.55
2004	62.08	347.62	29.84	21.04	12.42	473.01
2005	104.50	252.73	21.42	13.80	11.83	404.28
2006	118.42	268.49	27.28	17.97	15.57	447.73
2007	71.35	299.22	29.00	16.33	15.58	431.48
2008	47.00	240.86	25.69	12.55	9.16	335.27
2009	38.30	290.83	38.62	16.29	11.44	395.47
2010	112.77	403.02	36.28	21.70	19.26	593.04
media	71.55	313.39	29.92	21.30	10.99	447.16

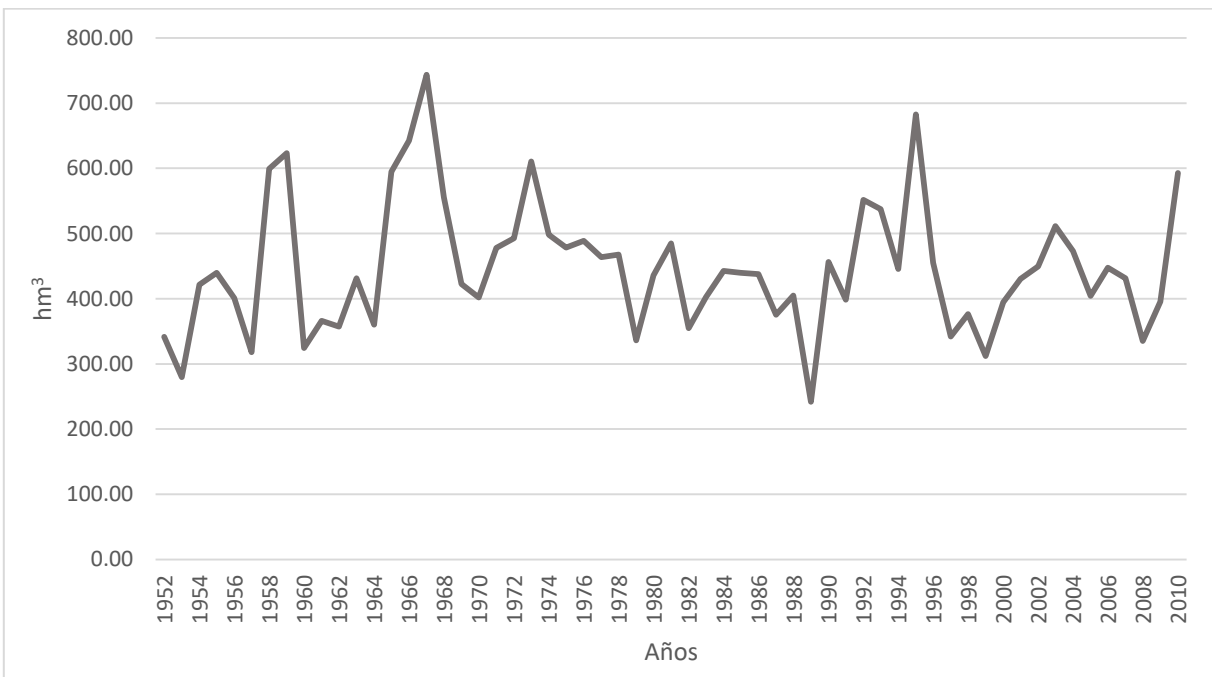


Figura 8.52 Resultados Disponibilidad hídrica media anual mediante HBV

8.5. Resumen disponibilidad hídrica media anual

Tabla 8.24 Resumen de disponibilidad hídrica media anual NOM-011-CONAGUA-2015 y HBV

	ISOLÍNEAS	RASTERIZACIÓN	POL THIESSEN	HBV
	Hm ³	Hm ³	Hm ³	Hm ³
1952	234.81	232.65	248.47	341.61
1953	116.02	114.96	117.99	279.70
1954	200.65	200.94	201.91	421.43
1955	186.44	182.28	197.66	439.73
1956	148.90	146.75	158.78	400.72
1957	115.66	114.68	114.42	317.77
1958	362.27	362.24	371.64	599.18
1959	209.39	210.20	213.58	623.54
1960	96.89	96.53	101.14	324.17
1961	145.33	143.00	157.41	366.02
1962	152.62	150.18	159.57	357.15
1963	182.89	181.18	196.33	431.23
1964	145.16	142.76	154.05	360.00
1965	297.11	297.11	312.19	594.84
1966	260.51	260.01	270.28	642.57
1967	326.78	326.61	348.12	743.48
1968	183.58	183.66	194.51	555.58
1969	143.31	143.75	149.31	422.38
1970	147.12	145.48	155.21	402.10
1971	211.76	211.20	221.73	478.20
1972	193.18	192.69	200.53	492.74
1973	293.41	291.67	293.34	610.40
1974	156.14	155.73	166.64	497.95
1975	211.76	180.80	189.41	478.63
1976	237.44	236.71	240.75	488.81
1977	155.25	153.23	165.57	463.92
1978	180.90	180.12	199.85	467.89
1979	119.08	118.88	123.40	336.26
1980	200.71	198.18	202.30	435.94
1981	203.86	198.19	212.78	484.83
1982	122.00	121.13	131.97	354.70
1983	173.25	121.13	177.74	402.24
1984	185.34	184.74	185.86	442.86
1985	165.54	164.11	177.65	439.66
1986	173.51	173.60	186.63	437.90

1987	141.94	139.10	136.27	375.21
1988	288.93	277.95	180.78	404.99
1989	93.48	92.12	86.13	241.98
1990	224.33	223.76	234.27	456.51
1991	153.42	152.02	150.99	398.63
1992	228.20	229.61	261.01	551.82
1993	213.68	216.97	240.90	537.63
1994	164.23	164.86	171.97	445.62
1995	341.21	345.88	429.51	682.53
1996	130.46	130.77	137.81	454.77
1997	133.03	130.12	120.70	342.22
1998	152.27	152.80	166.80	376.25
1999	117.48	116.11	112.81	311.98
2000	188.00	189.00	187.26	394.40
2001	186.00	186.00	184.97	430.56
2002	201.74	201.37	204.36	449.48
2003	215.32	212.12	220.49	511.55
2004	174.81	176.11	189.36	473.01
2005	152.21	147.66	157.00	404.28
2006	205.20	204.26	209.75	447.73
2007	170.37	173.63	178.17	431.48
2008	109.46	112.06	120.56	335.27
2009	166.74	171.18	182.20	395.47
2010	264.13	265.10	272.01	593.04
media	187.38	185.21	193.81	447.16

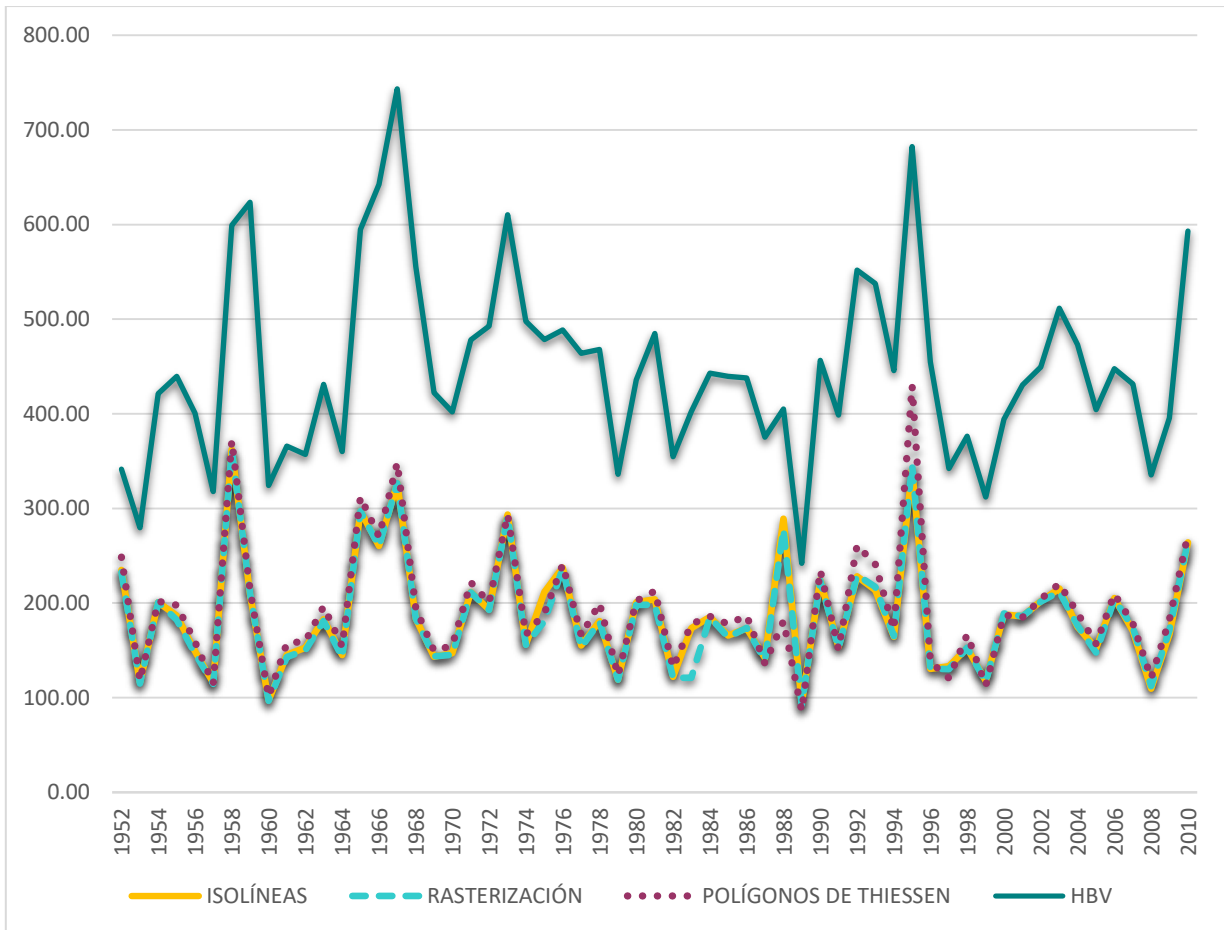


Figura 8.53 Resumen de disponibilidad hídrica media anual NOM-011-CONAGUA-2015 y HBV

9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

9.1. Análisis NOM-011-CONAGUA-2015

Como se pudo observar en el capítulo de resultados, la metodología empleada para el desarrollo del modelo hidrológico precipitación-escorrentía propuesto por la Norma Oficial Mexicana se hizo de diferentes maneras, esto con el objeto de observar los cambios o similitudes en resultados al buscar discretizar ciertas variables.

En la figura 9.1 se muestra un resumen de las tres sistemáticas que se emplearon para el desarrollo de la NOM-011-CONAGUA-2015.

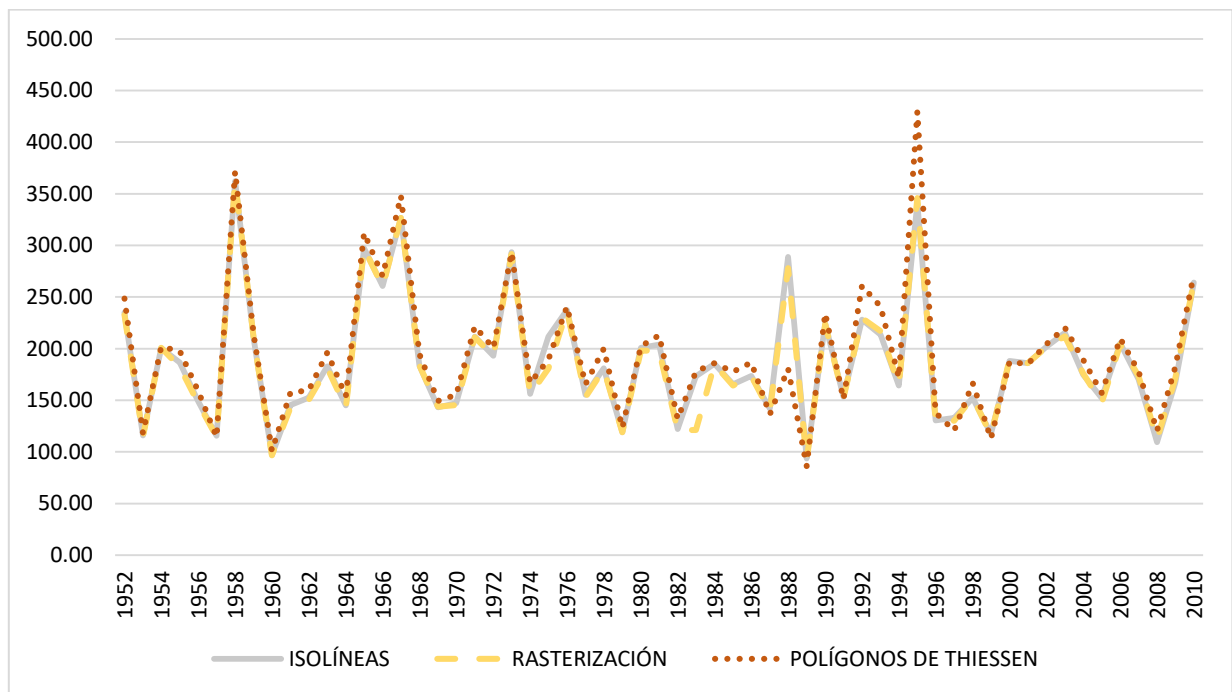


Figura 9.1 Resultados disponibilidad hídrica NOM-011-CONAGUA-2015

Se observa que las tres sistemáticas empleadas arrojan resultados muy similares, los cuales varían entre sí en un promedio de 3.8%, en el método llamado “isolíneas” y el de “rasterización del coeficiente de escorrentía” se buscó discretizar el coeficiente de escorrentía de manera espacial y en el método “polígonos de Thiessen” éste se discretizó de manera puntual, para cada una de las estaciones meteorológicas. Los dos primeros

métodos requieren del uso de SIG para su desarrollo, lo que representa procesos muy tardados, ya que el análisis se tiene que hacer para cada año de la serie de datos.

En cambio, el método desarrollado mediante polígonos de Thiessen, solo se necesita obtener el área de los polígonos que interfieren en la cuenca mediante el uso de SIG, y generar un coeficiente de escurrimiento para cada área resultante. Lo cual se puede trabajar enteramente en una hoja de cálculo electrónica, lo que representa procesos de mayor rapidez.

Al haber obtenido resultados similares se considera que se puede utilizar cualquiera de las sistemáticas al considerarse aceptables para el desarrollo de la Norma, dependerá del modelador y de los objetivos buscados considerar la mejor opción para el desarrollo de un proyecto.

9.2. Análisis del modelo hidrológico HBV

En la zona de estudio se cuenta con estaciones hidrométricas y tres presas que miden la cantidad de agua escurre superficialmente, con el método HBV se calibró con estos datos, en la figura 9.2 se muestran los resultados obtenidos al simular el modelo con EVALHID y los datos registrados en la serie histórica para las estaciones hidrométricas previamente restituidos a régimen natural.

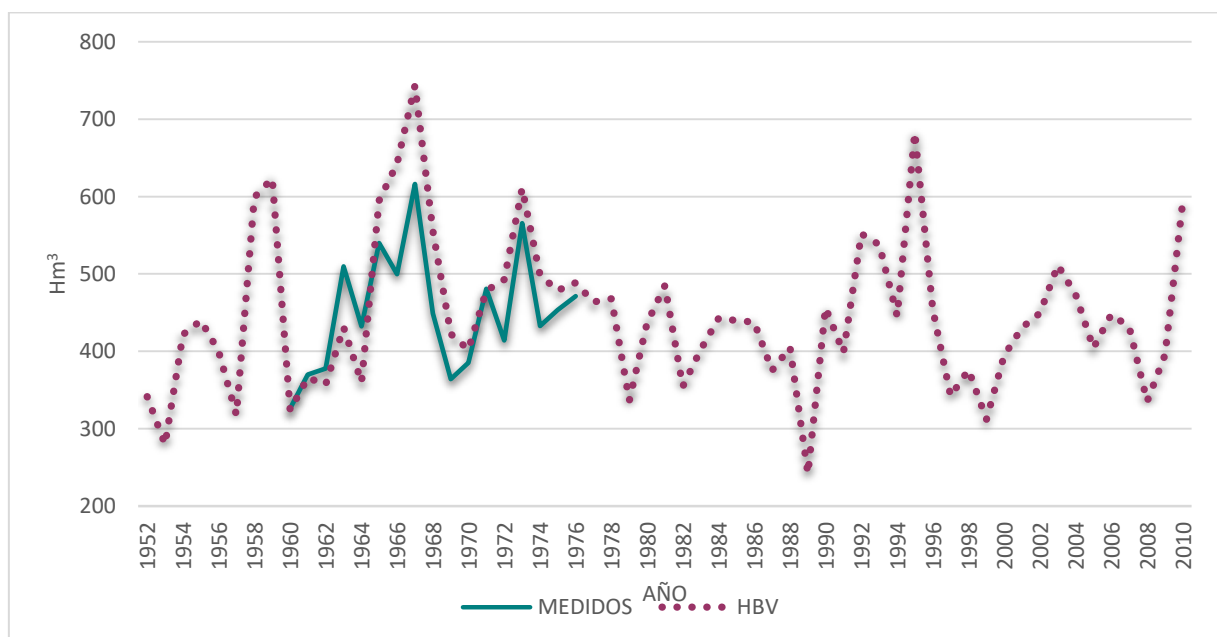


Figura 9.2 Resultados disponibilidad hídrica con HBV y caudales aforados

Se tienen diferentes periodos de medición en cada una de las estaciones hidrométricas pero para poder simular el comportamiento de toda la cuenca se tiene que hacer la suma de los aforos en todas las estaciones, el periodo de 1960-1976 se tiene registrado para todos los puntos de aforo, por lo que se puede comparar con la serie simulada. Como se observa en la figura 9.2 los datos simulados se comportan de manera similar a los registrados; de manera más precisa la disponibilidad hídrica media anual en la cuenca mediante datos medidos resulta de 452.23 hm³, y mediante datos simulados en EVALHID con el modelo hidrológico HBV resulta de 447.16 hm³, lo que indica que varían entre sí en 1.12%, siendo este un grado de incertidumbre bastante bajo, por lo que se considera que el modelo hidrológico HBV arroja resultados veraces respecto a lo que se tiene registrado por las instituciones en sus estaciones hidrométricas y presas.

9.3. Análisis en conjunto

Es importante analizar el comportamiento de los dos modelos hidrológicos desarrollados para así buscar similitudes o diferencias, en la figura 9.3, se muestra un resumen de las sistemáticas desarrolladas para la NOM-011-CONAGUA-2015 y el modelo hidrológico HBV.

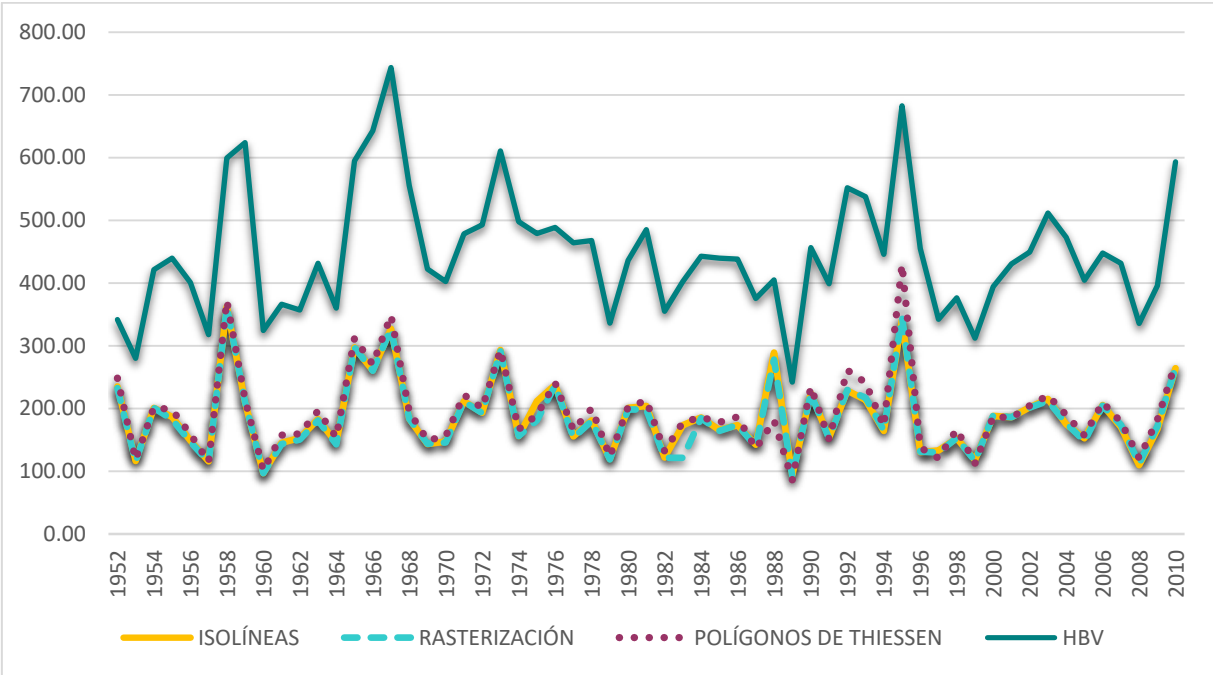


Figura 9.3 Disponibilidad hídrica media anual NOM-011-CONAGUA-2015 y HBV

En el gráfico se observa que las series de disponibilidad tienen la misma tendencia; es decir, el escurrimiento superficial aumenta o disminuye de la misma forma en los dos modelos. La disponibilidad hídrica media anual mediante la Norma Oficial Mexicana resulta de 188.8 hm³ al hacer un promedio entre las tres sistemáticas desarrolladas para este modelo, en HBV la disponibilidad resulta de 447.2 hm³, lo que indica que la modelación con la Norma representa solo el 42.2% de lo que resulta mediante la simulación en HBV.

9.4. Análisis en otro sitio

Al analizar el comportamiento de la Norma Oficial Mexicana respecto al modelo HBV se notó bastante diferencia en los resultados por lo que se presentó la necesidad de analizar los resultados en otras zonas de estudio para concluir porqué los modelos representan resultados tan diferentes. El ingeniero Daniel S. Nieto E. (Nieto, 2016) desarrolló un trabajo de tesis con objetivos similares al presente proyecto en la Zona de estudio “Cuenca del Río Tepalcatepec”, la cual tiene una superficie aproximada de 11 659 Km² y se encuentra entre los estados de Jalisco y Michoacán.

En la figura 9.4 se muestra la serie de datos de disponibilidad hídrica media anual mediante la NOM-011-CONACUA-2015 y el modelo HBV para la cuenca del Río Tepalcatepec.

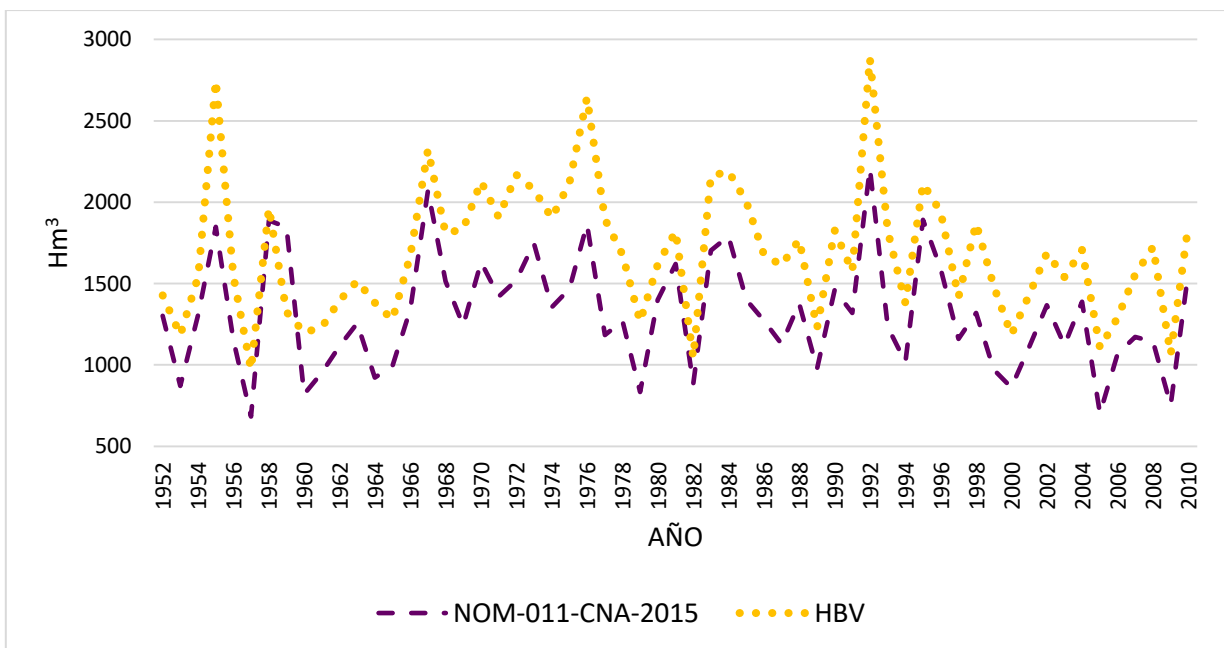


Figura 9.4 Resultados NOM-011-CONAGUA-2015 y HBV cuenda del Río Tepalcatepec

La disponibilidad hídrica media anual mediante el modelo HBV resulta 1690.01Hm³ y mediante la Norma Oficial Mexicana resulta de 1311.7Hm³, un 22.4% debajo de lo resultante con HBV.

Este comportamiento indica que la Norma Oficial Mexicana se comporta diferente en las dos zonas de estudio, debido a que en la cuenca del río Tuxpan se aleja demasiado de los valores obtenidos con HBV y en la cuenca del río Tepalcatepec se aproxima mucho más. Es por ello que se hizo un análisis de sensibilidad sobre las variables que interfieren en la Norma el cual se muestra en la figura 9.5.

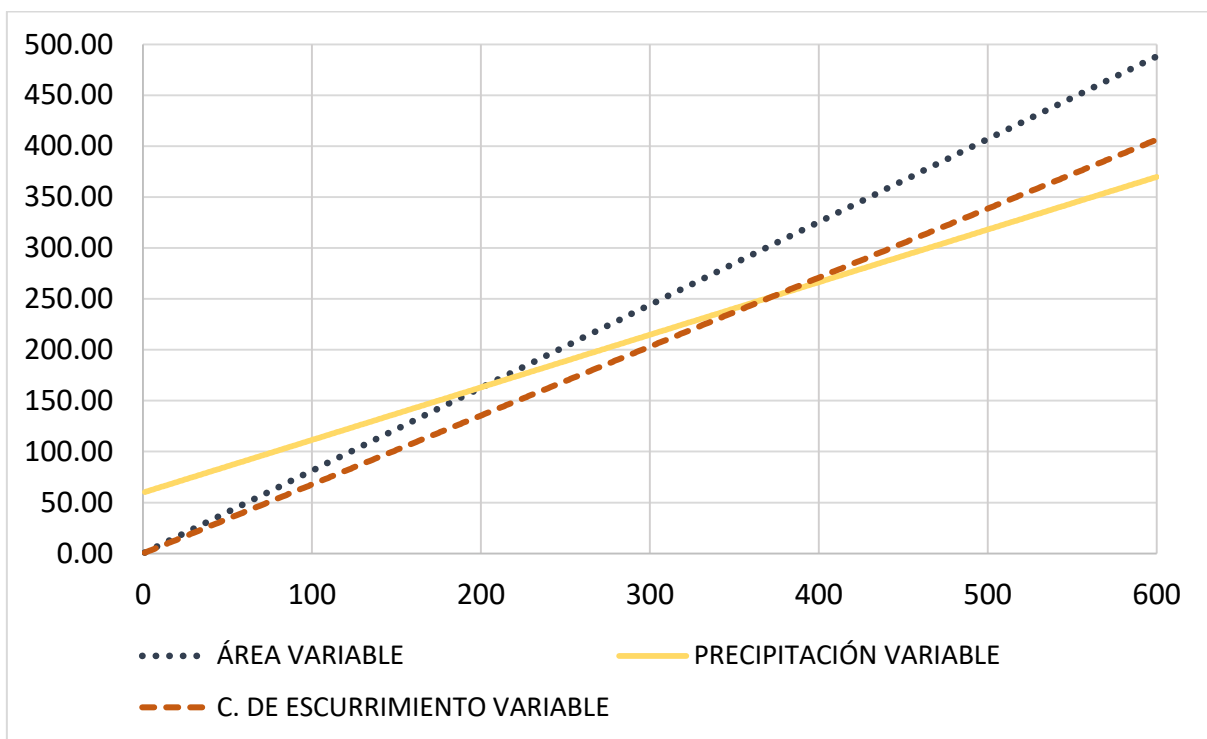


Figura 9.5 Análisis de sensibilidad NOM-011-CONAGUA-2015

En la figura 9.5, se observa que al variar el área (0 – 3000 km²) Los resultados de disponibilidad hídrica con la Norma Oficial Mexicana aumentan más que al incrementar las otras variables (precipitación y coeficiente de escurrimiento) es por ello que se presenta la necesidad de comparar dos cuencas de dimensión aproximadamente similar. Se reprodujo la información de una de las zonas de calibración de la cuenca del Río Tepalcatepec; la cuenca del Río Cajón que tiene una superficie de 1,668.11 km². Los resultados se muestran en la figura 9.6.

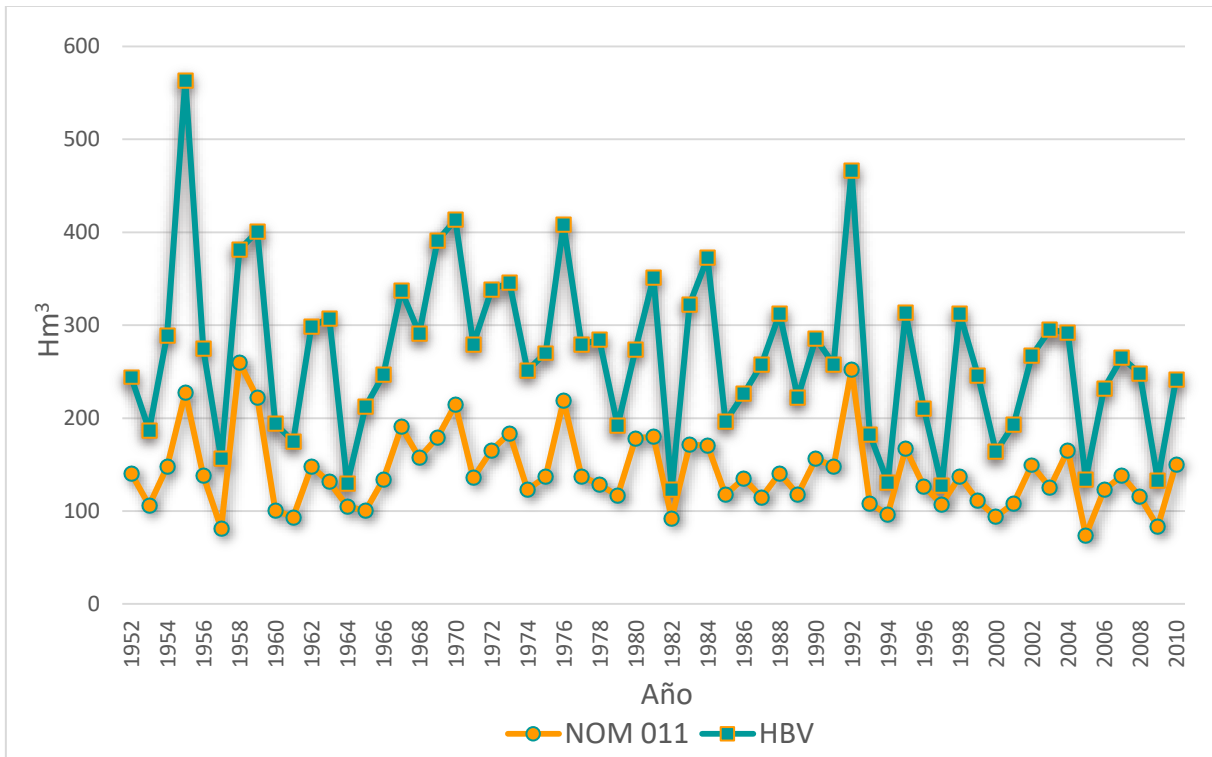


Figura 9.6 Resultados NOM-011-CONAGUA-2015 y HBV cuenca del Río Cajón

Los resultados de disponibilidad hídrica media anual mediante la NOM-011 resultaron de 142.0Hm³, con HBV resulta de 267.8Hm³. Esto indica que la Norma Oficial Mexicana se aleja de los valores de HBV en un 47% para una de las zonas del río Tepalcatepec.

Se indica entonces que al reducir el área los resultados de la metodología de la Norma también se reducen respecto de HBV, se considera entonces el área un factor determinante para el comportamiento de la Norma.

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo hidrológico HBV representa el ciclo hidrológico de una forma más precisa respecto a los resultados generados por la NOM-011, debido a que discretiza más las variables que intervienen en un sistema hidrológico, así como también se calibra y valida con datos medidos en estaciones hidrométricas; lo que indica una comparativa directa con datos reales.

Se desarrollaron tres metodologías para la obtención de la disponibilidad hídrica media anual mediante el método planteado por la NOM-011-CONAGUA-2015 los resultados indicaron poca variación entre las metodologías, por lo que se recomienda buscar la forma más simple de generar resultados, al tener información meteorológica suficiente en la zona de estudio, los polígonos de Thiessen generan una buena discretización de la cuenca, por lo que en este caso resulta favorable y sencillo hacer uso de este método.

Se expuso una metodología para la obtención del parámetro K (parámetro en función del uso y tipo de suelo), para cuencas con diferentes usos y tipos de suelo mediante el uso de sistemas de información geográfica; el valor de este parámetro lo define la CONAGUA, pero al tener en un terreno diferentes usos y tipos de suelo se tiene varios valores de K, para lo cual la Norma indica ponderarlo; mediante el uso de los SIG se delimitan las zonas para cuantificar las superficies del terreno que tienen determinado valor de K, es por ello que resultó eficiente obtener éste valor mediante la metodología desarrollada, debido a que cuantifica la superficie exacta que tiene determinado uso y tipo de suelo; es importante resaltar que este método se puede utilizar para cualquier zona en estudio, por lo que se propone y recomienda como una guía metodológica para cualquier lector que necesite obtener dicho parámetro.

Para la obtención de la disponibilidad hídrica mediante el modelo HBV fue necesario hacer el proceso de calentamiento, calibración y validación del modelo hidrológico respecto a los datos medidos por estaciones hidrométricas para lograr hacer una representación lo más realista posible de sus procesos y poder realizar la caracterización y parametrización de las

zonas de calibración o subcuencas. Las zonas de calibración fueron definidas por los puntos de calibración (estaciones hidrométricas o presas).

La fase de calibración es de gran relevancia ya que es determinante para que se puedan lograr buenos resultados, en la actualidad existen herramientas de calibración de este y otros tipos de modelos como los algoritmos evolutivos que han llegado a ser una herramienta importante para la implementación de estas herramientas en el mundo.

La presa de Agostitlán fue una de las zonas de calibración, la cual presenta el valor de función objetivo más bajo, respecto a las otras zonas de calibración; a ésta le sigue la zona definida por las presas La Sabaneta y Pucuate, las estaciones hidrométricas 18459 y 18460 fueron las que alcanzaron mejor calibración. Después de realizar el proceso de calibración se observó mucha mayor dificultad en calibrar las zonas definidas por presas que por estaciones hidrométricas, la razón principal a la que se atribuye la problemática de calibración es que en las zonas definidas por estaciones hidrométricas miden la cantidad de agua en ríos y generan cuencas de mucha mayor magnitud que la generada por el embalse de una presa, al tener cuencas de mayor superficie se cuenta con más puntos para calentar el modelo (estaciones meteorológicas), y se puede generar con mayor facilidad el modelo semidistribuido al dividir la subcuenca en microcuencas, asignando un valor de precipitación, evapotranspiración y temperatura para cada una de ellas.

El caso en las presas es distinto, ya que las cuencas generadas son relativamente pequeñas y causa mayor dificultad distribuirlo, debido a que no se generan microcuencas y los datos de meteorológicos resultan de un solo valor para toda la superficie.

Como recomendación, es necesario contar con el mayor número de puntos de medición de gasto disponibles en el terreno para así generar un modelo mejor distribuido, así también, es necesario que se cuente con la suficiente información en las bases de datos.

La calibración y validación del modelo en esta zona en estudio resultó aceptable por lo que los parámetros resultantes para cada una de las zonas de calibración se pueden utilizar para obtener un modelo parametrizado de la cuenca del río Tuxpan capaz de reproducir

cualquier tipo de evento con otros datos de entrada diferentes a los utilizados para su calibración.

Teniendo esto se pudo obtener la disponibilidad hídrica media anual en la cuenca del río Tuxpan mediante el modelo Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) para un periodo de 58 años, donde se observó una variación mínima entre los datos registrados por los aforos de las estaciones hidrométricas y presas.

Es importante mencionar que la metodología empleada en la NOM-011-CONAGUA-2015 se usa para cuencas que no han sido aforadas, y se recomienda como la base para los estudios hidrológicos pero esta no limita la implementación de nuevas metodologías, es por ello que como fin principal de este trabajo se busca lograr avances significativos en la gestión de recursos hídricos, en el área de escurrimiento superficial, por tal razón es resaltable la funcionalidad del modelo hidrológico HBV para realizar estudios en cualquier zona donde se cuente con puntos de calibración, debido a que en trabajos ya realizados anteriormente también arroja resultados satisfactorio, además de que la herramienta EVALHID lo incluye; ir aumentando las herramientas es básico para el desarrollo de la ciencia, se aconseja utilizarlo como base para la mejora de los métodos utilizados actualmente.

El apartado xxxx del presente trabajo es el desarrollo detallado de procesos para obtener el coeficiente de escurrimiento, que se marca en la NOM-011-CONAGUA-2015, mediante el uso de sistemas de información geográfica, se considera que puede funcionar como un manual para cualquier lector para la obtención de dicho coeficiente, por ello se considera como una aportación al área de la hidrología en México, para el desarrollo de próximos proyectos.

11. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

La herramienta EVALHID cuenta con cinco modelos hidrológicos, analizar el funcionamiento de cada uno de ellos, así como las variables que se emplean en cada uno de ellos, generar evaluaciones y comparativos en determinada zona de estudio para todos estos modelos sería un avance significativo.

El modelo hidrológico HBV además de generar datos de escurrimiento superficial, también hace el proceso completo de balance hidrológico, seguir esta línea y evaluar si el modelo es factible para utilizarlo como base de hidrología subterránea. El modelo hidrológico HBV generó resultados satisfactorios para la cuenca del río Tuxpan, pero esta es solo una de las seis subcuencas del sistema Cutzamala, sería importante evaluar mediante este modelo todo el sistema.

Las diferencias notables entre la metodología empleada por la NOM-011-CONAGUA-2015 y el modelo hidrológico HBV se concluyó que el área es un factor determinante, analizar otras zonas de estudio y ver el comportamiento de la Norma respecto a HBV es importante para determinar el comportamiento de cada una de las variables y proponer otras que puedan influir en el escurrimiento superficial.

Analizar en una cuenca cuencas aforadas, que tengan dentro de sí cuencas también aforadas, el modelo HBV, para determinar el posible comportamiento de similitud hidrológica en cuencas.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, B. M., Bathurst, C. J., Cunge, A. J., O'Connell, E. P., & Rasmussen, J. (1986a). An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically based, distributed modelling system. *Journal of hydrology*, 87(1), 45-59.
- Abbott, M. B., Bathurst, C. J., Cunge, J. A., O'connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986b). An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of hydrology*, 87(1), 61-77.
- Abebe, N. A., Ogden, F. L., & Pradhan, N. R. (2010). Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall–runoff model: Implications for parameter estimation. *Journal of Hydrology*, 389, 301-310.
- Adeloye, A. J., & Montaseri, M. (2002). Preliminary Streamflow Data Analyses Prior to Water Resources Study. *Hydrological Sciences Journal*, 47(5), 679-692.
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Editorial LIMUSA S.A. de C.V. grupo noriega editores.
- Arheimer, B., Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., & Strömqvist, J. (2008). Development and test of a new Swedish water quality model for small-scale and large-scale applications. *XXV Nordic Hydrological Conference NHP Report No. 50*, (pp. 483-492). Reykjavik, Iceland.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., . . . Jha, M. K. (2012). SWAT: Model Use, Calibration and Calibration. *American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 2151-0032*, 55(4), 1491-1508.
- ASF, Auditoria Superior de la Federación. (2012). *Evaluación Número 479 "Política Hídrica Nacional"*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Procuraduría Federal de la Federación de Protección al Ambiente (PROFEPA), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- Barrera, S. (1999). *Talleres de SIG I*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geografía.
- Bergström, S. (1976). *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. SMHI RHO 7, Norrköping, Sweden.

- Bergström, S. (1976). *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. SMHI RHO 7, Norrköping, Sweden.
- Bergström, S. (1995). *The HBV model, computer models of watershed hydrology*. (V.p.singh, Ed.) Water Resources Publications.
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43-69.
- Bocco, G. (2007, 11 15). *Cartografía y Sistemas de Información Geográfica en el Manejo Integrado de Cuencas*. Retrieved from Instituto Nacional de Ecología: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/452/bocco.html>
- Bunge, V., Martínez, J., & Bedolla, R. K. (2012). *Escenarios de la dinámica hídrica de la región de aporte del sistema Cutzamala*". Documento de Trabajo de la Dirección General de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.
- Burnash, R. J., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). *A generalized streamflow simulation system – conceptual modeling for digital computers*. U. S. Department of Commerce, National Weather Service and State of California, Department of Water Resources.
- Burnash, R. J., Ferral, R. L., & McGuire, R. A. (1973). *A generalized streamflow simulation system, conceptual modeling for digital computers*. US Department of Commerce, National Weather Service and State of California, Department of Water Resources.
- Cabrera, J. (s.f.). *Modelos Hidrológicos*. Retrieved from http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf
- Campos, D. F. (2008). Calibración del Método Racional en Ocho Cuencas Rurales menores de 1 650 km² de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. *Agrociencia*, 42, 615-627.
- Casas Mas, A. G. (2013). *Evaluación del recurso hídrico en la cuenca del río Turia (España) mediante la aplicación de modelos semiagregados de Precipitación-Escorrentía (Tesis Licenciatura)*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- CONAGUA. (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial.
- Cotler, H., Garrido, A., Mondragón, R., & Diaz, A. (2007). Las cuencas hidrográficas de México: un avance consensuado. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*.

- Crawford, N. H., & Linsley, R. K. (1966). *Digital Simulation on Hydrology: Stanford Watershed Model IV*. Stanford University Technical Report No. 39, Palo Alto, United States.
- Daniel, E. B., Camp, J. V., LeBoeuf, E. J., Penrod, J. R., Dobbins, J. P., & Abkowitz, M. D. (2011). Watershed modeling and its applications: A state-of-the-art review. *The Open Hydrology Journal*, 5(1), 26-50.
- Das, T., Bárdossy, A., & Zehe, E. (2006). *Influence of spatial variability of precipitation on distributed rainfall-runoff modeling*. (M. Sivapalan, T. Wagener, S. Uhlenbrook, E. Zehe, V. Lakshmi, X. Liang, . . . P. Kumar, Eds.) IAHS Publication 303: Promise and Progress.
- Duan, Q. Y., Gupta, V. K., & Sorooshian, S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of optimization theory and applications*, 76(3), 501-521.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall runoff models. *Water resources research*, 28(4), 1015-1031.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of hydrology*, 158(3), 265-284.
- Ehret, U. (2002). *Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments using Weather Radar (Tesis doctoral)*. Institute of Hydraulic Engineering, University of Stuttgart, Germany.
- El correcto uso del agua de acuerdo a su disponibilidad*. (2016). Retrieved from Nom-mx.com.mx: <http://nom-mx.com.mx/articulo/el-correcto-uso-del-agua-de-acuerdo-a-su-disponibilidad>
- Erazo, A. M. (2006). Calibración preliminar del modelo HBV a nivel mensual en la cuenca del río grande de San Miguel para completación de datos faltantes de caudal en series históricas.
- Escalante, C. A., & Reyes, L. C. (2002). *Técnicas estadísticas en hidrología*. México, UNAM, Facultad de Ingeniería.
- Estrada, F. B., & López, J. S. (2015). *Modelación hidrológica del río Palo utilizando el modelo hidrológico HBV para simular escenarios de variabilidad climática asociales al fenómeno ENOS en su fase fría La Niña (Tesis Licenciatura)*. Escuela de recursos naturales y del ambiente, programa de ingeniería sanitaria y ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.

- Estrela, T. (1992). *Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX.
- Figueroa, M. L., Ibáñez, I. L., Arteaga, R. R., Arellano, J. L., & Vázquez, M. P. (2011). Cambio de Uso de Suelo en la Cuenca de San Cristóbal de las Casas, México. *Agrociencia*, 45, 531-544.
- Gan, T. Y., Dlamini, E. M., & F, B. G. (1997). Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling. *Journal of hydrology*, 192(1), 81-103.
- García, E. (1981). *Modificaciones al sistema de clasificación climática Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana*. México: Editorial Larrios.
- García, L. R. (2015). *Evaluación del efecto del cambio climático en los escurrimientos superficiales en la cuenca del Río Tuxpán, Michoacán (Tesis Maestría)*. Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, Universidad Michoacana de Sani Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- Hundechea, Y. H., & Bárdossy, A. (2004). Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Hydrology*, 292, 281-295.
- IUSS, Grupo de Trabajo WRB. (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. . Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jajarmizadeh, M., Harun, S., & Salarpour, M. (2012). A review on theoretical consideration and types of models in hydrology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 5(5), 249-261.
- Lerma, N. (2013). *Análisis y mejora de la gestión de un sistema de recursos hídricos mediante el acoplamiento de algoritmos evolutivos y redes de flujo. Caso de aplicación al sistema Tirso-Flumendosa-Campidano. Tesis de maestría*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Lindström, G. (1997). A simple automatic calibration routine for the HBV model. *Nordic Hydrology*, 28(3), 153-168.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., & Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201(1997), 272-288.

- Lomelí, G. (2006). *Recursos Hidrológicos en México*. México: Proyecto de Investigaciones del C.C.H. de la UNAM.
- Madrid, A. G., & Ortiz, L. M. (2005). *Análisis y Síntesis en Cartografía: Algunos procedimientos*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Madrigal, J. J. (2015). *Modulo de gestión hídrica de la cuenca del río Angulo, para uso conjunto: superficial y subterráneo (Tesis Maestría)*. Morelia, UMSNH.
- Mariani, V. C., & dos Santos Coelho, L. (2011). A hybrid shuffled complex evolution approach with pattern search for unconstrained optimization. *Mathematics and Computers in Simulation*, 81(9), 1901-1909.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., L, B. R., Harmel, R. D., & Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nelder, J. A., & Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4), 308-313.
- Nieto, D. S. (2016). *Evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del río Tepalcatepec, NOM-011, HBV (Tesis Licenciatura)*. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- Olaiz, A., Camacho, H., Guillomén, E., Romero, R., & J, S. (2003). Evaluación económica y valoración social de los escenarios del manejo de agua superficial en la cuenca Lerma-Chapala. *Anuario IMTA*, 168-175.
- Paredes, J. A., Solera, A. S., Andreu, J. Á., & Lerma, N. E. (2014). *Herramienta EVALHID para la Evaluación de Recursos Hídricos (Manual Técnico v1.0)*. Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1), 275-289.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, 275-289.
- Pizarro, R., & Ramírez, C. (2000). *Análisis Comparativo de Modelos para la Estimación de Precipitaciones Areales Anuales en Períodos Extremos*. Región del Maule, Chile.
- Quintero, S. M., & Reyes, M. A. (2009, agosto 10). Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del estado de Sonora. *Revista Digital Universitaria [en línea]*, 10(8). Retrieved from <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art51/int51.htm>

- Refsgaard, J. C. (1997). Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 198(1), 69-97.
- Rodríguez, A. M., & Saborío, L. J. (1983). Evaluación Indirecta de los Recursos Hídricos de una Cuenca. *Proceedings of the Tegucigalpa Hydromath Symposium IAHS*, (p. 57). Tegucigalpa, Honduras.
- Schaefli, B., Hingray, B., Niggli, M., & Musy, A. (2005). A conceptual glaciohydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9, 95-109.
- SCS. (1972). *SCS National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology*. Washington, DC: Soil Conservation Service, US Department of Agriculture.
- Seibert, J. (2005). *HBV light version 2, User's Manual*. Uppsala University, Institute of Earth Sciences, Department of Hydrology, Uppsala, Sweden.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, 7(4), 270-292.
- Tellez, A. F. (2016). *Modelación Hidrológica del Sistema de Explotación Gállego-Cinca de la Confederación Hidrográfica del Ebro mediante el Modelo de Precipitación-Escorrentía HBV. Tesis Maestría*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Témez, J. R. (1977). *Modelo Matemático de transformación "precipitación-escorrentía"*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica ASINEL, Madrid, España.
- UNESCO. (2006). *Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas*. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°4.
- UNESCO. (2006). *Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semi-áridas y sub-húmedas secas de América Latina y el Caribe*. CAZALAC. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°3.
- USACE, United States Army Corps of Engineers. (2000). *HEC-HMS Technical Reference Manual*. Davis, United States: Hydrologic Engineering Center.
- Vélez, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual distribuido orientado a la simulación de crecidas. Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Wilby, R. L. (1997). *Contemporary Hydrology: Towards Holistic Environmental Science*. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.