



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS.
Colegio de Geografía

MODIFICACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO EN EL ESTADO DE
MÉXICO POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A :

MARIANA TONANTZIN LARA DÍAZ

DIRECTOR: GUSTAVO MANUEL CRUZ BELLO



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



AGRADECIMIENTOS



Al Fondo Mixto CONACYT – Estado de México, financiadores del proyecto “Definición de acciones sobre el riesgo en materia de adaptación y vulnerabilidad para el sector primario ante el cambio climático en el Estado de México”, del que forma parte esta tesis.

Al Dr. Gustavo Cruz Bello director de esta tesis, por compartir sus conocimientos conmigo, por su exigencia, su paciencia, su dedicación, su tiempo y su apoyo. ¡Mil Gracias!

Al MC. Antonio Hernández González, por todo su apoyo, su disposición, su desinterés, su cariño y sus ganas de ayudar en la elaboración de este trabajo.

A mis sinodales por brindarme su experiencia y revisiones para darle forma y estructura a esta tesis.

A todas aquellas personas que de manera directa o indirecta participaron en la elaboración de esta tesis. MUCHAS GRACIAS.

DEDICATORIA

Muchas son las personas que se encuentran alrededor de este proyecto, probablemente ellas conscientes o no, aportan una gran ayuda para la culminación de esta meta. Es por ello que en estas líneas quiero agradecer a todos aquellos que han aportado su grano de arena, a quienes criticaron lo escrito, así como a todos aquellos que de alguna manera colaboraron con esta investigación.

A mis padres (Luis y Martha), que han dado todo por mí y que han estado siempre conmigo, por su apoyo, su esfuerzo y su amor incondicional, por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona y profesionalmente. GRACIAS INFINITAS porque sin ustedes nunca lo hubiera logrado.

A mis hermanas, Tania y Wendy por compartir todo conmigo, por estar siempre presentes, por sus ejemplos de perseverancia y constancia, por la confianza que siempre nos hemos tenido, por ser mis cómplices. GRACIAS por resolver dudas y ayudarme siempre.

A la memoria del Dr. Jorge Caire Lomelí por impulsar el desarrollo de mi formación profesional, por sus grandes enseñanzas, consejos, por ser el gran ser humano y compartir su conocimiento conmigo.

A mis amigos, que nos apoyamos durante nuestra formación profesional, que compartimos tantas cosas, por tantos momentos inolvidables, GRACIAS por su amistad: Miriam, Mario, Gerardo y Oscar.

A Liz y Erika por su colaboración en el proyecto, por compartir tantos momentos juntas en laboratorio de geomática. GRACIAS por todo.

A mi Abue, Toño, Lola, Lulú y Betty por estar presentes a lo largo de mi vida, por su ayuda y su apoyo. GRACIAS.

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES.....	4
JUSTIFICACIÓN	8
OBJETIVO GENERAL	9
OBJETIVOS PARTICULARES	9
1.0 MARCO TEÓRICO.....	10
1.1 Conceptos de Hidrología	10
1.1.1 El ciclo hidrológico	10
1.1.2 La cuenca Hidrológica	10
1.1.3 Características fisiográficas de las cuencas	11
1.2 Balance Hídrico	12
1.3 Cambio Climático	13
1.3.1 Cambio Climático en México	14
1.4 Modelos de Circulación General de la Atmósfera	15
1.4.1 Modelo CCCma	17
1.5 Análisis Espacial	17
1.6 Métodos de simulación.....	18
1.7 Modelos de simulación hidrológica.....	18
1.8 SWAT Modelo Hidrológico	19
1.8.1 Interface con Sistemas de Información Geográfica	20
1.8.2 Componentes teóricos del modelo SWAT	20
1.8.2.1 Clima	20
1.8.2.2 Precipitación	21
1.8.2.3 Evapotranspiración.....	21
1.8.2.4 Ciclo hidrológico.....	23
1.8.2.5 Escorrentía	23
1.8.2.6 Percolación.....	25
1.8.2.7 Flujo de Retorno.....	27
1.8.2.8 Bases de datos de estadísticos de clima	27
1.8.2.9 Bases de datos de suelos	30
1.8.2.10 Base de datos de uso del suelo y vegetación	33
2.0 ZONA DE ESTUDIO.....	33
2.1 Ubicación Geográfica.....	33
2.2 Población	34
2.3 Clima.....	34

2.4 Precipitación	36
2.5 Temperatura.....	37
2.6 Orografía	37
2.7 Geología	39
2.8 Edafología	40
2.9 Uso del suelo y vegetación	42
2.10 Hidrología.....	43
2.11 Disponibilidad de Recursos Hídricos	44
2.12 Balance Hídrico	45
3.0 MATERIALES Y MÉTODOS	46
3.1 Procesamiento e ingreso de datos	46
3.1.1 Bases de datos diarios de precipitación y temperatura.....	46
3.1.2 Bases de datos de estadísticos climáticos	47
3.1.3 Bases de datos de clima futuros	48
3.1.4 Modelo digital de elevación	49
3.1.5 Red hidrológica	49
3.1.6 Cobertura de Uso del Suelo y Vegetación	49
3.1.7 Procesamiento de la información del suelo	49
3.2 Ejecución de SWAT	51
3.2.1 Crear un proyecto	52
3.2.2 Delineación de una cuenca y subcuencas	53
3.2.3 Unidades de Respuesta Hidrológica.....	54
3.2.4 Generador de bases de datos climáticos y archivos de entrada	55
3.2.5 Edición de bases de datos de SWAT	56
3.2.6 Simulación de SWAT.....	56
3.3 Salida de datos	56
3.4 Procesamiento de datos	57
3.5 Cálculo del Balance Hídrico	57
3.6 Presentación del Balance Hídrico.....	58
4.0 RESULTADOS.....	59
4.1 Precipitación	59
4.1.1 Precipitación escenario base (2008)	59
4.1.2 Precipitación escenario CGCM A2 año 2030	60
4.1.3 Precipitación Escenario CGCM A2 año 2050	61
4.1.4 Precipitación Escenario CGCM B2 año 2030	62

4.1.5 Precipitación CGCM B2 año 2050	64
4.2 Escorrentía.....	65
4.2.1 Escorrentía escenario base (2008)	65
4.2.2 Escorrentía escenario CGCM A2 año 2030	66
4.2.3 Escorrentía escenario CGCM A2 año 2050	67
4.2.4 Escorrentía escenario CGCM B2 año 2030	69
4.2.5 Escorrentía escenario CGCM B2 año 2050	70
4.3 Flujo de Retorno.....	72
4.3.1 Flujo de Retorno escenario base (2008).....	72
4.3.2 Flujo de Retorno escenario CGCM A2 año 2030	73
4.3.3 Flujo de Retorno escenario CGCM A2 año 2050	74
4.3.4 Flujo de Retorno escenario CGCM B2 año 2030	75
4.3.5 Flujo de Retorno escenario CGCM B2 año 2050	76
4.4 Evapotranspiración.....	78
4.4.1 Evapotranspiración escenario base (2008)	78
4.4.2 Evapotranspiración escenario CGCM A2 año 2030	79
4.4.3 Evapotranspiración escenario CGCM A2 año 2050	80
4.4.4 Evapotranspiración escenario CGCM B2 año 2030	82
4.4.5 Evapotranspiración escenario CGCM B2 año 2050	83
4.5 Infiltración.....	85
4.5.1 Infiltración escenario base (2008)	85
4.5.2 Infiltración escenario CGCM A2 año 2030	86
4.5.3 Infiltración escenario CGCM A2 año 2050	87
4.5.4 Infiltración escenario CGCM B2 año 2030	89
4.5.5 Infiltración escenario CGCM B2 año 2050	90
4.6 Balance hídrico.....	91
4.6.1 Balance hídrico escenario base (2008).....	91
4.6.2 Balance Hídrico CGCM A2 año 2030	93
4.6.3 Balance Hídrico CGCM A2 año 2050	95
4.6.4 Balance Hídrico CGCM B2 año 2030	97
4.6.5 Balance Hídrico CGCM B2 año 2050	99
5.0 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	103
5.1 Discusión	103
5.2 Conclusiones.....	105

BIBLIOGRAFIA.....	107
ANEXOS.....	114

INTRODUCCIÓN

El agua en la naturaleza no permanece estática, está en constante dinamismo definido en un ciclo, ya que inicia en donde posteriormente termina.

El ciclo hidrológico¹ es el proceso mediante el cual se realiza el abastecimiento de agua para las plantas, los animales y el hombre. Su fundamento es que toda gota de agua, en cualquier momento, recorre un circuito abierto donde, por ejemplo, desde el momento en que forma parte de la lluvia hasta que vuelve a formar parte de este proceso. Se parte de la nube como elemento de origen, desde ella se tienen distintas formas de precipitación, con lo que se puede considerar que inicia el ciclo (Maderey, 2005).



FIGURA 1 Ciclo hidrológico
(Fuente: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>)

El ciclo hidrológico es un proceso de movimiento general del agua (circulación y transferencia) que se desarrolla en el sistema tierra-atmósfera-oceano.

El agua es un elemento indispensable para los seres vivos, y es primordial en el desarrollo del hombre y por lo tanto es de gran importancia para el desarrollo de las civilizaciones. El hecho de que sea un elemento esencial en la vida del hombre, se ve en la necesidad de abastecer de agua llevándola a sitios en donde la necesita. El abastecimiento y distribución de agua alrededor del mundo, representa un problema de gran importancia para las poblaciones, especialmente al enfrentarse con fenómenos climáticos y meteorológicos como la sequía o inundaciones por eventos hidrometeorológicos extremos.

Como solución ante la demanda del agua, han canalizado cada vez más agua a núcleos urbanos que la requieran, la cual es extraída y llevada desde los cuerpos de agua superficiales o subterráneos. Esto implica que dichos cuerpos sean explotados, ocasionando un desequilibrio en el ecosistema.

México no está exento de los problemas que se presentan con el agua, actualmente ya afronta dificultades con este recurso vital en sectores productivos como el agrícola, forestal, pecuario y el industrial. Las deficiencias en la distribución del agua el incremento de la población y la poca disponibilidad del agua, han ocasionado que el agua de ríos y lagos sea insuficiente en algunas zonas y que las fuentes de abastecimiento subterráneas estén sobreexplotadas y en consecuencia con una disminución en la calidad del agua.

Actualmente hay aproximadamente 3.5 millones de mexicanos se encuentran en situación de poca disponibilidad de agua en términos de cantidad y calidad (CONAGUA, 2013).

A las regiones explotadas se les llama regiones hidrológicas, las cuales son una superficie determinada de territorio que contiene una o varias cuencas hidrológicas con características físicas y geográficas semejantes, y que contienen aguas que fluyen y desembocan hacia el mar o lagos (Maderey, 1994).

El cambio climático en los procesos hidrológicos tendrá profundos impactos en los sistemas naturales y las poblaciones humanas; la vida en la tierra, en los lagos, en los ríos depende de la disponibilidad de agua dulce. Los cuerpos de agua superficial y subterránea abastecen de agua a los humanos para diversos usos y la generación de energía hidroeléctrica; de acuerdo con Hardy (2003) en la década pasada existían 1.7 billones de personas o un tercio de la población del mundo que vive en áreas de escasez de agua.

Conocer el balance hídrico es importante para evaluar la disponibilidad de agua para los cultivos, estudios hidrológicos, de conservación de suelos, de drenaje, de recuperación de suelos salinos, de repoblación forestal, o el establecimiento del régimen de humedad de los suelos o de criterios de diferenciación climática. Existen varios modelos para estimar el balance de agua en el suelo.

El clima según el concepto tradicional es el promedio de alguna variable de los factores climatológicos: latitud, longitud, altitud, orografía; que interactúan entre sí, actualmente se piensa en el clima como un estado cambiante de la atmósfera. Cuando un parámetro meteorológico como la temperatura o la precipitación modifica su valor medio de muchos años, se dice entonces que es una anomalía climática (Magaña, 2004).

Para el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), el cambio climático es cualquier cambio en el clima en un largo periodo de tiempo, debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad antrópica. El cambio climático altera la circulación de la atmósfera y el océano, repercutiendo en el ciclo hidrológico, lo que se manifestará como cambios en la precipitación y la temperatura (Martínez y Fernández, 2004).

Desde mediados del siglo XX, los modelos numéricos para simular procesos de circulación atmosférica han mejorado mucho y se han usado para estudiar la variabilidad y cambio climático originando escenarios de cambio climático, desarrollados por el Panel Intergubernamental de cambio climático (Conde *et al.*, 2004).

Como herramientas para el análisis hidrológico se utilizan programas de modelación hidrológica, que utilizan variables temporales y espaciales para simular el flujo de agua, así como las entradas y salidas, de una cuenca determinada, ya sea grande o pequeña.

La herramienta que se utilizó para la elaboración de este trabajo es el SWAT (THE SOIL AND WATER ASSESSMET TOOL), es un programa de modelado hidrológico desarrollado por el servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos y la Universidad de Texas. SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para el modelado, la cuenca hidrográfica se dividió en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos.

Este modelo hidrológico fue seleccionado ya que ayudo a predecir posibles impactos en una cuenca debido al uso de suelo se obtuvieron estimaciones del balance hídrico actual, para los

años 2030 y 2050 para un modelo, el cual corre bajo cuatro diferentes escenarios hipotéticos de cambio climático.

Esta tesis forma parte del proyecto "Definición de acciones sobre el riesgo en materia de adaptación y vulnerabilidad para el sector primario ante el cambio climático en el Estado de México", desarrollado por el Centro Nacional en Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

ANTECEDENTES

Los impactos del cambio climático dependerán del sistema de abastecimiento de agua, y de la capacidad de los gestores de recursos hídricos para responder no solo al cambio climático sino también al crecimiento de la población y a los cambios en la demanda, en las tecnologías y en las condiciones económicas, sociales y legislativas. (IPCC; 1997).

En la década pasada (2000-2010) se ha fortalecido el sistema institucional para la gestión ambiental, principalmente en temas relacionados con los recursos hídricos. Sin embargo, durante este tiempo los problemas ocasionados por la escasez de agua potable, la disminución de su calidad y el aumento de desastres en las poblaciones provocados por fenómenos meteorológicos extremos, como inundaciones, se han registrado con mayor frecuencia. Para reducir la vulnerabilidad de los sistemas hídricos por el cambio climático hay varias líneas de actuación posibles.

Considerando que los ecosistemas naturales se basan en la interacción continua de todos sus elementos, en el tiempo y en el espacio, es imposible solucionar un problema en el ecosistema manipulando sólo uno de ellos: El Agua (Cotler, 2004).

El entendimiento de la dinámica del agua en un territorio pasa por el conocimiento espacial del ciclo hidrológico. Por ello, resulta conveniente utilizar un enfoque de cuenca para entender las interrelaciones entre los elementos y procesos naturales (clima-relieve-suelo-vegetación), así como la forma en que se organiza la población para apropiarse de ellos y su impacto en la cantidad, calidad y temporalidad del agua. Este enfoque nos da la posibilidad de evaluar y de explicar las externalidades resultantes de los diferentes usos del suelo (Cotler, 2004).

En Cuba en el periodo comprendido entre 1986-2004 comienzan a desarrollar y a generalizar el enfoque de manejo integral de las Cuencas. Actualmente se conoce cuál debe ser la dirección del desarrollo y ya se trabaja para lograr los objetivos fundamentales (Cotler, 2004).

El Instituto Nacional de Recursos Hídricos (INRH) de República Dominicana estimó en el 2006 el Balance Hídrico con el modelo Escenario de Emisión Débil, para los años 2010, 2030, 2050, 2100. El Modelo plantea un aumento de 2.6 °C en la temperatura y una disminución de la actividad pluvial del orden del 10% en los próximos 100 años. Debido a lo anterior los valores de evapotranspiración aumentan y el volumen total de agua disponible en el país disminuye en un 28% respecto a la línea base.

El estudio de los efectos del cambio climático en México y las medidas de adaptación, es uno de los objetivos que el Gobierno Federal plasmó en el eje rector Sustentabilidad Ambiental, junto con otros cuatro forman el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012.

El Programa Nacional Hídrico 2007-2012, estableció en el séptimo objetivo evaluar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico; las estrategias propuestas son las siguientes:

1. Evaluar los efectos del cambio climático en las variables del ciclo hidrológico.
2. Medir y evaluar los parámetros que indiquen cambio climático.
3. Promover y apoyar la investigación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, en materia de medidas de adaptación ante el cambio climático.

Mientras que el Programa Nacional Hídrico 2013-2018, estableció como estrategias para reducir la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático, lo siguiente:

1. Incrementar la participación y corresponsabilidad de estados y municipios para acciones de adaptación frente al cambio climático o variabilidad climática.
2. Crear o fortalecer fondos financieros para la adaptación al cambio climático y para el mantenimiento y rehabilitación de infraestructura hidráulica.
3. Incrementar el intercambio de información con instancias nacionales e internacionales.

En México se han realizado informes sobre los posibles escenarios, basados en modelos globales de la atmosfera, por lo que se efectuaran estudios con modelos de escala regional para evaluar con mejor detalle los efectos del cambio climático. (CONAGUA, 2010). Ejemplo de lo anterior se ve reflejado en las siguientes referencias y eventos:

- a) El Instituto Nacional de Ecología invitó a reconocidos investigadores de instituciones académicas, organizaciones gubernamentales y no-gubernamentales a plasmar sus experiencias y enriquecer la discusión sobre el tema durante el Seminario de “Gestión integral de cuencas: teoría y práctica” desarrollado en la Ciudad de México los días 9 y 10 de junio de 2004. Este evento reunió alrededor de doscientos interesados en el tema, pertenecientes a instituciones del Gobierno Federal y de 26 Estados, instituciones académicas y asociaciones civiles. A través de las ponencias se expusieron ideas, argumentos y recomendaciones con el propósito de afinar la aplicación del manejo integral de cuencas como un instrumento de política ambiental en México.
- b) El Institut de Recherche pour le Développement (IRD) de Francia y la Universidad de Guadalajara, mediante un convenio de cooperación firmado en septiembre de 2001 con la finalidad de llegar a comprender tanto la evolución de la problemática ambiental y social en la cuenca Lerma de Río Lerma desde la década de los años 50, como sus consecuencias sobre el deterioro del balance del lago de Chapala y sus relaciones con el abastecimiento de agua a la zona conurbada de Guadalajara.
- c) Como resultado de la participación de investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) y del Instituto de Geografía (IG) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en el área de Vulnerabilidad en los Recursos Hídricos del proyecto “Estudio de País, México: México ante el cambio climático”, cuyos resultados fueron publicados en la Primera Comunicación de México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (INE 1997), en el CCA se desarrolló un modelo de balance térmico-hidrológico (MBTH) para poder dar algunas conclusiones importantes sobre la vulnerabilidad en las zonas hidrológicas de México ante un cambio climático, pronosticado para el año 2050 o 2075 por tres modelos; dos de ellos de circulación general, cuyos resultados fueron analizados y preparados por Conde et al (2004).

- d) A partir del 2004, el Sistema Mesoamericano de Alerta Temprana para Seguridad Alimentaria (MFEWS, por sus siglas en inglés) ha implementado un modelo automatizado de Índice de Balance Hídrico (IBH) para la región Centroamericana. Este modelo es un indicador del desarrollo del cultivo basado en el abastecimiento y demanda de agua durante el periodo de crecimiento.

- e) Maderey et, al, (2005) realizaron una investigación de tres cuencas en el centro del país; para el análisis se estimó el balance hídrico actual y el de tres escenarios, resultantes de la aplicación de tres modelos en los cuales se supone que el contenido de bióxido de carbono (CO₂) en la atmosfera se duplicará entre los años 2025 y 2050. Los resultados indican que, con el cambio climático en la región centro de México, habría una disminución de agua aprovechable en las tres cuencas hidrológicas (Lerma-Chapala-Santiago), y aumentará la vulnerabilidad de la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago, que actualmente tiene problemas con el recurso del agua con el cambio climático se agravarían.

Aunado a los antecedentes mencionados, las evaluaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, sugieren que el aumento de la temperatura hará que la evapotranspiración incremente, que la humedad en el suelo disminuya y que se puede experimentar una disminución del escurrimiento del 10% al 20% (IPCC, 2007).

México recibe aproximadamente 1, 449, 471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos (CONAGUA, 2018).

Derivado de lo anterior, se vuelve trascendental el uso de modelos para estimar y predecir los componentes del ciclo hidrológico, los cuales se han incrementado en las últimas décadas debido al perfeccionamiento de los sistemas de cómputo.

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ha sido utilizado en numerosas investigaciones a nivel mundial; la aplicación de este modelo se ha llevado a cabo en países como Estados Unidos, Canadá Australia, India, Italia, Alemania y Sudamérica con diferentes fines. Actualmente se ha extendido la aplicación del modelo a países africanos, muchas de éstas han sido impulsadas por las necesidades de organismos gubernamentales, que requieren

evaluaciones directas del cambio de cobertura y cambio climático sobre los recursos hídricos (Mata, 2008).

En México hay algunas investigaciones que utilizaron el modelo SWAT:

Torres-Benites et, al, (2004), aplicaron SWAT en la cuenca “El Tejocote” en el Estado de México, con la finalidad de comparar los valores simulados y observados de la producción de agua, sedimentos, gastos medidos y biomasa durante un periodo de cinco años. Así mismo analizar su posible aplicación en cuencas que no cuenten con estaciones de aforo.

Torres-Benites et, al, (2005) aplicaron el modelo SWAT a la cuenca del Río Laja en Guanajuato, calibraron el modelo para comparar los escurrimientos medidos y los simulados, con un periodo de calibración de cinco años de observación (1993-1997).

Abad (2006), modeló el comportamiento hidrológico de las cuencas: El Chuveje y Arroyo Real, ubicadas en Querétaro para identificar las áreas de mayor percolación, producción de agua, escurrimiento y producción de sedimentos, y así analizar el efecto de diferentes cambios de cobertura.

JUSTIFICACIÓN

En México, la medición de la calidad y cantidad del agua se realiza de manera periódica y directa en un reducido número de sitios a través de estaciones de monitoreo hidrométrico y de calidad del agua. Según informes de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 1990), en nuestro país no se cuenta con la suficiente infraestructura hidrométrica para la medición en cauces, ríos y cuencas y que solamente las cuencas de mayor impacto social, económico y ambiental poseen ésta. Ante esta circunstancia, un modelo de simulación hidrológica brinda la posibilidad de reproducir los componentes del ciclo hidrológico lo que permite al investigador simular condiciones futuras, que afectarían a uno o varios de los procesos físicos que intervienen en dicho ciclo.

Se plantea como una alternativa para evaluar la calidad y la cantidad de agua en las cuencas que no cuentan con la suficiente infraestructura de medición de caudales y otras variables, el empleo de modelos hidrológicos de simulación, debido a su fácil operación, a su bajo costo y a la confiabilidad de los resultados que arrojan.

Como se indicó en el Cuarto Foro Mundial del Agua (IMTA, 2006), tres de los cinco ejes temáticos relacionados con los principales retos del tema agua a nivel global son: agua y saneamiento para todos, en donde una de las acciones contempla el desarrollo de metodologías para reducir pérdidas de agua, recuperar volúmenes y mejorar eficiencias; agua para la alimentación y el medio ambiente, permite establecer políticas apropiadas y eficaces para el manejo sustentable del recurso hídrico; manejo de riesgos, permite el desarrollo de sistemas de alerta hidrometeorológica temprana y en tiempo real para la prevención de inundaciones y construye herramientas que ayudan a conocer la disponibilidad del recurso hídrico para apoyar los planes sobre el uso del agua.

El problema de trabajar a escala de cuencas lo representa la manipulación de grandes volúmenes de datos, su análisis y la posterior toma de decisiones.

El manejo de cuencas proporciona el marco conceptual, espacial e integral que permite el manejo del ecosistema, de recursos naturales, incluyendo el recurso hídrico.

OBJETIVO GENERAL

Determinar los impactos del cambio climático sobre el balance hídrico del Estado de México.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Analizar el comportamiento de los procesos hidrológicos a escala local y regional.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos por el modelo de simulación en la cuenca hidrológica.
- Determinar los impactos del cambio climático mediante el modelado de los procesos hidrológicos (escorrentía, evaporación, infiltración, precipitación y flujo de retorno) actuales y futuros en el Estado de México.
- Cuantificar la disponibilidad de agua para los años 2030 y 2050, de acuerdo a los modelos climáticos aplicados.

1.0 MARCO TEÓRICO

1.1 Conceptos de Hidrología

1.1.1 El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un reflejo de las complejas interacciones de fenómenos meteorológicos, biológicos, químicos y geológicos. Es el movimiento del agua (aguas superficiales, aguas subterráneas y agua en la vegetación) a la atmosfera y de regreso a la Tierra en forma de precipitación. La transferencia de agua de los tejidos de las plantas a la atmosfera se llama transpiración. El agua de lluvia que se infiltra en el suelo se mueve hacia el subsuelo, parte de esta agua ayuda a recargar los acuíferos subterráneos, y otra parte se evapora. El agua que se encuentra en la superficie terrestre o muy cerca de ella se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento. El vapor de agua, se eleva y se transporta por la atmosfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la Tierra en forma de precipitación (UNAM, 1970, Figura 2).

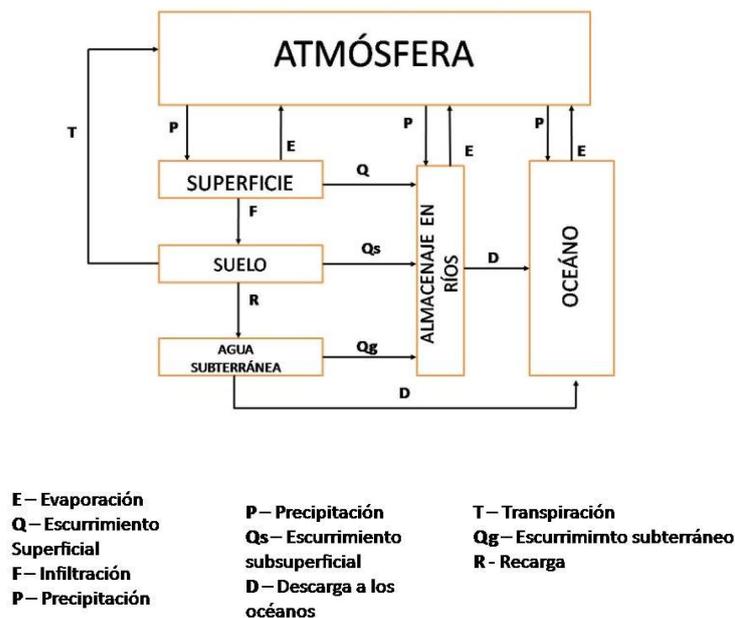


FIGURA 2 Ciclo Hidrológico. Representación cualitativa (Fuente: Hidrología, UNAM, 1970).

1.1.2 La cuenca Hidrológica

El funcionamiento de una cuenca se basa en los principios del ciclo del agua y sus relaciones con suelo y agua; al hablar de cuenca hidrográfica es hablar del comportamiento del agua.

CONAGUA (2006) señala que la cuenca hidrológica es la unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parte aguas o divisoria de las aguas -aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad-, en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida o terminal que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica está a su vez integrada por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas (Figura 3).

Llamas (1989), por su parte, afirma que una cuenca es un espacio geográfico cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por las precipitaciones y cuyos excedentes en agua o en materias sólidas transportadas por el agua forman, en un punto espacial único, una desembocadura.

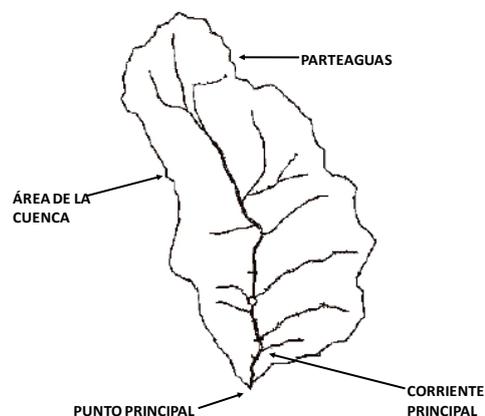


FIGURA 3. Esquema de una cuenca hidrográfica
(Fuente: <http://www.cuencaamanalcovalle.org>)

1.1.3 Características fisiográficas de las cuencas

Según Springall (1970), las cuencas hidrológicas presentan fisiográficamente cinco principales características:

Parteaguas: es una línea imaginaria que divide a las cuencas adyacentes; formado por los puntos de mayor elevación topográfica.

En ocasiones con fines de planeación o manejo es necesario dividir una cuenca de gran tamaño en subcuencas, las cuales están a su vez delimitadas por sus respectivos parteaguas.

Red de drenaje: Es el sistema de cauces por los que fluye el agua de manera temporal o permanente. La forma de drenaje proporciona indicios de las condiciones del suelo y de la superficie de la cuenca.

Área de una cuenca: es una superficie en proyección horizontal encerrada por el parteaguas. Generalmente esta área se determina con un planímetro y se expresa en kilómetros cuadrados.

Pendiente de la cuenca: Tiene una importante y compleja relación con la infiltración, el escurrimiento superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea al flujo de los cauces. Es uno de los factores físicos que controlan el tiempo del flujo sobre el terreno y tiene influencia directa en la magnitud de las crecidas (Campos, 1992).

1.2 Balance Hídrico

En todo sistema o subsistema del ciclo hidrológico, el principio que indica que el agua no se crea ni se destruye se refleja en la denominada ecuación del balance hídrico, la cual permite relacionar las cantidades de agua que circulan por el ciclo. Esta ecuación permite establecer la relación entre los distintos componentes de un sistema hidrológico. Aunque dicha interrelación exhibirá variación espacial y temporal, para una escala y un periodo de tiempo determinado es posible establecer una ecuación de balance hídrico para cada subsistema.

La ecuación de Balance Hídrico es la ley más importante en hidrología, y aunque su expresión es muy simple, la cuantificación de sus términos es normalmente complicada, principalmente por la falta de mediciones realizadas directamente en campo y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas (a acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en una cuenca. La evaluación de los recursos hídricos de una cuenca requiere de una estimación correcta del balance hídrico, es decir, comprender el ciclo en sus diferentes fases, la manera en que el agua se recibe por precipitación y se reparte entre el proceso de evapotranspiración, escorrentía e infiltración. (Dingman, 2002).

En general se puede afirmar que del agua que cae en un determinado lugar (precipitación), una parte retorna a la atmósfera por evapotranspiración, otra parte escurre en la superficie

(escorrentía) a través de la red de drenaje hasta alcanzar los cauces principales y finalmente el mar, el resto se infiltra en el terreno.

El balance hídrico es un balance matemático de los componentes del ciclo hidrológico en una cuenca. Se expresa al igualar las diferencias entre las entradas y las salidas de agua en una cuenca por un periodo de tiempo determinado. De acuerdo con Campos (1992) la ecuación del Balance Hídrico es:

$$\text{CAMBIO DE ALMACENAMIENTO} = \text{ENTRADAS} - \text{SALIDAS}$$

Esta ecuación permite establecer la relación entre los distintos componentes de un sistema hidrológico. Aunque dicha interrelación exhibirá variación espacial y temporal, para una escala y un periodo de tiempo determinado es posible establecer una ecuación de balance hídrico para cada subsistema. Misma que puede ser de gran utilidad, puesto que permite estimar algún componente del balance hídrico en función de los componentes conocidos.

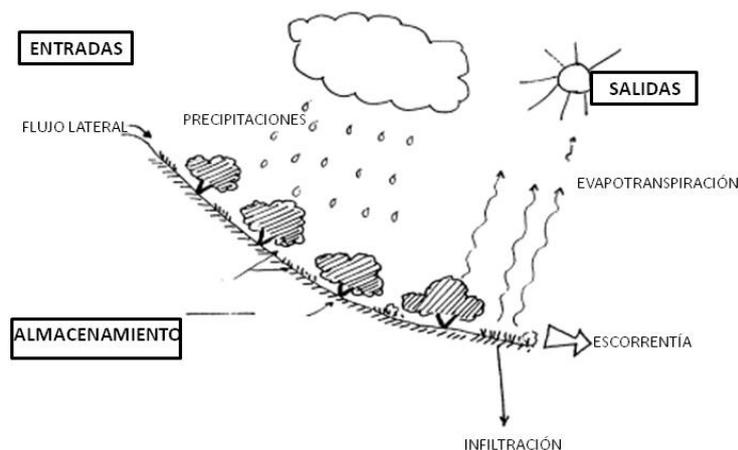


FIGURA 4: Esquema del Balance Hídrico

1.3 Cambio Climático

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) define este fenómeno como una desviación estadística importante en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (décadas o incluso más). Por su parte, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC, 1992) define cambio climático como una modificación de clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición y comportamiento de la atmósfera del planeta y se suma a la variabilidad natural del clima, observada durante períodos de tiempo comparables.

El problema consiste en que los volúmenes de Gases Efecto Invernadero (GEI), especialmente el bióxido de carbono (CO₂), emitidos durante los últimos 150 años de industrialización, superan la capacidad de captura de la biosfera y el resultado neto es el aumento constante de las concentraciones de estos gases, mismos que obstaculizan la emisión de energía hacia el espacio exterior y acrecientan el proceso natural de efecto invernadero causante del calentamiento global (UICN-ORMA, 2003).

Las proyecciones indican que estos cambios irán acompañados tanto de incrementos como de disminuciones en las precipitaciones, y éstas, variarán dependiendo las características de cada región (UICN-ORMA, 2003).

1.3.1 Cambio Climático en México

El país vive ya los efectos del calentamiento global provocado por el cambio climático. Por su ubicación geográfica, topografía y aspectos socioeconómicos, México es especialmente vulnerable a los impactos del cambio climático, debido a que 56 % del territorio nacional corresponde a zonas áridas y semiáridas; cuenta con una población de más de 100 millones de habitantes; además, se registra una pérdida promedio anual de alrededor de 260 mil hectáreas de bosques templados; hay una baja disponibilidad y desigual distribución del agua; casi dos terceras partes de los suelos del país no son aptos para la agricultura y está sujeto a la incidencia de tormentas tropicales y huracanes (INE, 2006).

Los estudios del cambio climático global y sus posibles impactos en México, tienen como antecedente fundamental el primer Estudio de País: *“México ante el cambio climático”*. Este documento presenta la comparación entre las condiciones actuales y los posibles cambios climáticos, en el supuesto de que se duplicara la emisión de CO₂ en la atmósfera, en relación a las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero. Los resultados de estos estudios indican que probablemente se presenten, entre otros, los siguientes fenómenos dentro del territorio nacional:

- Modificación del régimen y la distribución espacial y temporal de las precipitaciones pluviales.
- Cambios en la humedad de suelos y aire, con alteraciones de los procesos de evaporación-transpiración y recarga de acuíferos.

- Agudización de las sequías, desertificación del territorio y potencial modificación de la regionalización ecológica: reducción drástica de ecosistemas boscosos templados y tropicales.
- Alta incidencia de incendios forestales, intensificando los problemas de deforestación, erosión, liberación de carbono y pérdida de biodiversidad.
- Alteración de cuencas hidrológicas, así como del régimen y distribución de escurrimientos superficiales e inundaciones.
- Aumento del nivel del mar con impactos sobre ecosistemas costeros y marinos (manglares, humedales y zonas de inundación).
- Cambios en el régimen de vientos y de insolación.

Algunas regiones costeras estarán expuestas a inundaciones, y sin embargo, la agricultura, sobre todo la de temporal, tendrá pérdidas cuantiosas a causa de sequías más frecuentes; el área con potencial de producción de granos básicos se reducirá en forma considerable; los ecosistemas forestales y las especies que los integran sufrirán daños irreversibles; el abasto de agua para riego y consumo humano se verá afectado, en tanto la infraestructura productiva podrá experimentar daños severos. No se puede dejar de lado las implicaciones directas que el cambio climático traería en la población, como el aumento de cierto tipo de enfermedades, la migración campo-ciudad y la escasez de agua, aunados al incremento de la población y su concentración en ciertos centros urbanos.

El Gobierno de México reconoce que el cambio climático constituye el principal desafío ambiental global de este siglo, y, que representa, a mediano y largo plazo, una de las mayores amenazas para el proceso de desarrollo y el bienestar humano (PECC, 2009). Bajo ese criterio el gobierno mexicano ha impulsado de manera institucional programas y estrategias para estudiar los efectos que tendrá el cambio climático en el país.

1.4 Modelos de Circulación General de la Atmósfera

Las predicciones del clima futuro se basan en modelos numéricos denominados Modelos de Circulación General (GCMs, por sus siglas en inglés), que simulan el sistema climático en la tierra mediante algoritmos matemáticos. Los modelos incluyen los factores físicos que determinan el clima, como el aumento de radiación solar y las tasas de pérdida, humedad, presión barométrica,

la temperatura del océano, la salinidad y la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero (IPCC, 2007).

Los MGC tienen como propósito simular numéricamente cambios en el clima como resultado de cambios lentos en algunas condiciones de frontera (tales como la constante solar) o parámetros físicos (cómo la concentración de los gases efecto invernadero). Funcionan a una escala global y tienen baja resolución por lo que no son muy indicados para estudios e investigaciones de zonas específicas (PAHO, 2010).

Por lo general representan la atmósfera y el océano en una cuadrícula de 1° a 4° en latitud y longitud con 10 o más de 200 capas verticales en cada fluido (Figura5).

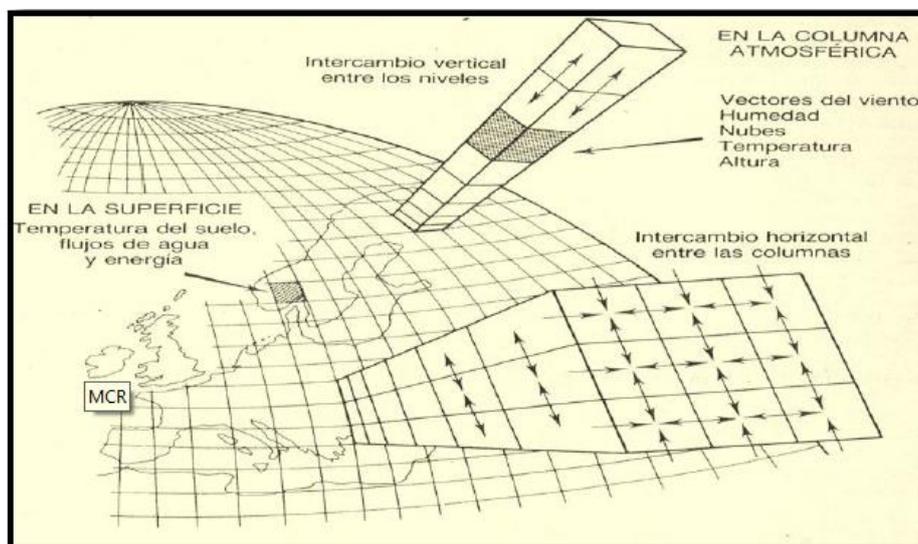


FIGURA 5: Elementos de los Modelos Climático de Circulación General (Henderson-Sellers y MacGuffie 1990).

De acuerdo con el IPCC (2000) los escenarios de cambio climático se definen como una representación posible y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas que han sido construidas expresamente para investigar sus posibles consecuencias. Si bien, los escenarios de emisiones abordan los principales factores determinantes de las emisiones futuras, desde la demografía hasta la evolución tecnológica y económica, ninguno considera políticas futuras explícitamente para tratar al cambio climático (IPCC, 2001; IPCC, 2007).

En la elaboración de escenarios de cambio climático es necesaria la elaboración de escenarios GEI, los cuales consideran un conjunto de posibles condiciones del desarrollo global para los próximos cien años.

1.4.1 Modelo CCCma

El CCCma (Canadian Center for Climate Modelling and Analysis) forma parte del Servicio Meteorológico y de Medio Ambiente de Canadá. Se dedica a la investigación de modelos atmosféricos y oceánicos, la variabilidad y la predicción del clima, el ciclo del carbón entre otras áreas. Ha desarrollado un gran número de modelos de simulación climática para la predicción del clima, el estudio del cambio climático y su variabilidad (Hardy, 2003).

El modelo utilizado para esta tesis es el CGCM2, la componente atmosférica del modelo es esencialmente el AGCM2 (Atmospheric General Circulation Model). Éste es un modelo espectral con truncamiento triangular en la onda número 32 (que da una resolución de la rejilla de la superficie de $3.7^{\circ} \times 3.7^{\circ}$) y 10 niveles verticales (Hardy, 2003).

La componente oceánica está basada en un código de resolución $1.8^{\circ} \times 1.8^{\circ}$ y 29 niveles verticales. El modelo usa flujos de calor y de agua ajustados, éstos son obtenidos del funcionamiento desacoplado de los modelos de océano y atmósfera (de 10 y 4000 años de duración respectivamente), seguidos de una adaptación en la cual los campos de ajuste son modificados por una integración de 14 años del modelo conjunto. Una parte importante en cualquier modelo es la máscara mar – tierra que es la base para modelar los escenarios (Hardy, 2003, Figura 6).



FIGURA 6: Máscara del modelo CGCM
(Fuente: <http://elclima.esparatodos.es/ccma/index.htm>)

1.5 Análisis Espacial

El análisis espacial es la combinación de técnicas y herramientas que buscan separar, procesar, clasificar y presentar con criterios cartográficos el estudio cuantitativo y cualitativo de aquellos fenómenos geográficos que se manifiestan en el espacio y que son objeto de nuestro estudio (Fischer, 2006).

Estas herramientas se pueden utilizar en un SIG y pueden ser de diferentes tipos, gráficas para la composición de cartografía y estadísticas de distinta índole que permiten describir, inferir, significar y predecir cuantitativamente estos fenómenos (Fischer, 2006).

El análisis espacial es una rama de la investigación cuyo desarrollo es relativamente reciente. Apoyándose sobre los métodos estadísticos y los modelos matemáticos, utilizando los mapas, los sistemas de información geográfica y diversos útiles de simulación, integrando también los resultados de encuestas sobre los comportamientos en el espacio y sus representaciones, el análisis espacial es empleado por muchas otras disciplinas además de la geografía, en economía espacial, historia, agronomía, arqueología, ciencias del medio ambiente, entre otros (Fischer, 2006).

1.6 Métodos de simulación

La simulación es una forma indirecta de investigación de la respuesta o conducta de un sistema, entendiéndose por sistema al arreglo de componentes físicos, un conjunto o colección de casos, unidos o relacionados de tal manera que forman y actúan como una unidad, una entidad o un todo (Becht, 1974).

Según Hillel (1977), la simulación de un sistema se realiza a través de un modelo matemático, cuyos componentes esenciales son: variables exógenas o de entrada, las cuales son independientes del estado interno del sistema y que actúan sobre él, induciendo cambios; variables endógenas o de salida, son dependientes; variables de estado, que caracterizan las condiciones del sistema y determinan los procesos que influyen sobre las variables endógenas y parámetros que controlan la medida de las respuestas generadas por cambios de estado.

1.7 Modelos de simulación hidrológica

De acuerdo con Benavides, *et al.* (2008) los modelos de simulación hidrológica son representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales que permiten estudiar su funcionamiento y las respuestas a diferentes factores incorporados al modelo, así como las modificaciones de sus componentes. En general, los modelos hidrológicos funcionan a nivel de cuencas y subcuencas teniendo cinco componentes básicos:

- 1) Procesos y características hidrológicas de las cuencas

- 2) Datos de entrada
- 3) Ecuaciones gobernantes
- 4) Límites y condiciones iniciales
- 5) Salidas de datos

Según Junes (1985), los modelos empleados en simulación hidrológica pueden ser: físicos, analógicos y digitales. Los dos primeros son usados en hidráulica e hidrología, pero con el gran desarrollo de la computación, desde finales de la década de los años sesenta, han quedado relegados y los modelos digitales se han convertido en una poderosa herramienta de simulación. Según Torres, *et al.* (2004), el objetivo de un modelo hidrológico es determinar con eficiencia y precisión los procesos del ciclo hidrológico en una cuenca, y estimar el comportamiento y la magnitud (abundancia y carencia) del agua.

El uso de los modelos de simulación hidrológica es primordial para entender y predecir los flujos de agua, para resolver problemas prácticos y para la administración y planeación del uso de los recursos hídrico en una cuenca, región o país.

1.8 SWAT Modelo Hidrológico

El Soil Water Assessment Tool (SWAT) es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas (Arnold *et al.*, 1990). Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes. El SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca.

Para el modelamiento la cuenca se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos, esto permite al modelo reflejar las diferencias en evapotranspiración de varios cultivos y suelos. SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés) obtenidas del cruce de los diferentes tipos del suelo y coberturas del terreno. Esto incrementa la precisión y brinda una mejor descripción física del balance hídrico (Torres-Benites *et al.*, 2005).

SWAT es un modelo matemático conformado por un conjunto de modelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. Es un modelo de simulación continua temporal de un día, el cual analiza los impactos a largo plazo, es decir, los sedimentos en los almacenamientos en periodos de 10, 15, 50 y 100 años, así como para la programación de prácticas agrícolas (Torres-Benites *et al.*, 2004).

El modelo está basado en principios físicos, es decir, en lugar de integrar modelos de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y salida, SWAT usa modelos semiempíricos que requieren de datos específicos acerca del clima, propiedades físicas del suelo, topografía y vegetación que hay en la cuenca (Torres-Benites *et al.*, 2004).

SWAT permite simular el cambio climático mediante la manipulación de entrada de información climática de las variables de precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento (Torres-Benites *et al.*, 2004).

1.8.1 Interface con Sistemas de Información Geográfica

La interface SWAT 2005 se emplea con el software ArcGIS 9.X. La interface se puede emplear para simular cuencas simples o un sistema múltiple de cuencas hidrológicamente conectadas. La interface está diseñada para facilitar el uso del modelo mediante la combinación de datos geográficos digitales.

Los datos de entrada son: modelo de elevación digital (DEM), tipos de suelos, cobertura del terreno, red hidrográfica y datos climáticos.

Los conjuntos de datos espaciales para ArcSWAT se pueden crear en cualquier proyección cartográfica. Sin embargo, la misma proyección se debe utilizar para todas las capas de información antes de cualquier proceso.

1.8.2 Componentes teóricos del modelo SWAT

1.8.2.1 Clima

Específicamente, las variables climáticas requeridas por SWAT son precipitación, temperatura mínima y máxima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa diarias. Si no hay datos disponibles para una porción del período que ocupan los datos de entrada el generador climático puede simularlos.

El modelo crea una serie de datos climáticos para cada subcuenca de manera independiente.

1.8.2.2 Precipitación

La precipitación es la caída de partículas sólidas o líquidas de agua (lluvia, nieve o granizo); es la primera fase del ciclo hidrológico y fuente primaria que origina las corrientes superficiales. La formación de la precipitación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal manera que se enfríe y parte de su humedad se condense.

La precipitación se mide en milímetros (mm), por la altura que alcanza sobre una superficie plana y horizontal. Un milímetro de precipitación equivale a un litro de agua por metro cuadrado.

Emplea el modelo desarrollado por Nicks (1974) para llenar datos faltantes de precipitación diaria en registros de medición.

SWAT usa cadenas de Markov para definir un día como húmedo o seco, al generar un número al azar entre 0.0 y 1.0 y compararlo con las probabilidades mensuales de recibir precipitación si el día anterior fue húmedo o seco. Este número aleatorio se compara a la probabilidad apropiada húmedo-seco.

Si el número aleatorio es igual a o menor a la probabilidad húmedo-seco, el día se define como húmedo. Si el número aleatorio es más grande que la probabilidad húmedo-seco, el día se define como seco; se considera un día húmedo cuando existe un día con 0.1 mm de lluvia o más.

Cuando se crea un día húmedo, la cantidad de precipitación es generada desde una distribución sesgada o una distribución exponencial. Cuando ocurre un evento de precipitación, la lámina se calcula a partir de la generación de una distribución de la precipitación diaria.

1.8.2.3 Evapotranspiración

Cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación (emisión de vapor de agua por una superficie) y transpiración de las plantas.

El modelo utiliza tres métodos para el cálculo de la evapotranspiración potencial: el método Penman-Monteith (Monteith, 1965), donde se requieren datos de radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento; el método Priestley-Taylor que requiere datos de radiación

solar, temperatura y humedad relativa; y el método Hargreaves, el cual sólo requiere de la entrada de datos de temperatura.

Para este estudio se aplicó el método Penman-Monteith, y su ecuación es la siguiente:

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot C_p \cdot e^{\circ} [e_z^{\circ} - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma \cdot (1 + r_c / r_a)}$$

Donde:

λE es el calor latente de densidad de flujo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

E es la tasa de evaporación de profundidad (mm d^{-1})

Δ es la pendiente de la curva de saturación de presión de vapor-temperatura de/dT ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

H_{net} es la radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G es la densidad de flujo de calor al suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

ρ_{air} es la densidad del aire (Kg m^{-3})

C_p es el calor específico a presión constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

e_z° es la presión de vapor de saturación del aire a la altura z (kPa)

e_z es la presión de vapor de agua del aire a la altura z (kPa)

γ es la constante psicométrica ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

r_c es la resistencia del dosel de la planta (s m^{-1})

r_a es la resistencia a la difusión de la capa de aire (resistencia aerodinámica) (s m^{-1})

La ecuación combina componentes que describen la energía necesaria para mantener la evaporación, la resistencia requerida del mecanismo para remover el vapor de agua, las condiciones aerodinámicas y la resistencia superficial.

1.8.2.4 Ciclo hidrológico

Según Sánchez (2004) el ciclo hidrológico es definido como el movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea. El ciclo hidrológico en el modelo SWAT está basado en la ecuación general del balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{sup} - E_a - W_{subt} - Q_{subs})$$

Donde:

SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm)

SW_0 es el contenido de agua inicial en el día i (mm)

t es el tiempo (días)

R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i

Q_{sup} es el escurrimiento superficial en el día i

E_a es la evapotranspiración en el día i

W_{subt} es la percolación en el día i

Q_{subs} es el escurrimiento superficial que regresa al cauce (flujo de retorno) en el día i

1.8.2.5 Escorrentía

La escorrentía es el movimiento de agua que proviene de la precipitación sobre una región y que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de la cuenca, se considera como superficial, subsuperficial o subterráneo. La escorrentía se presenta cuando la cantidad de agua de lluvia excede la capacidad de infiltración.

Se expresa en volumen representada por metros cúbicos (m^3) o en altura de agua (mm) en relación a la superficie.

SWAT proporciona dos métodos para estimar el escurrimiento superficial: el método de la curva numérica, propuesta por el Servicio de Conservación del Suelo (SCS, por sus siglas en inglés: USDA-SCS, 1972) y el método de infiltración propuesto por Green y Ampt (1911).

Para este trabajo el escurrimiento superficial fue calculado por el método de la curva numérica. El uso de datos de precipitación diaria es particularmente importante para esta técnica debido a que, en muchas localidades, los datos de precipitación con incrementos de tiempo de menos de un día no existen. También, las manipulaciones de los datos de precipitación y los cálculos de escurrimiento superficial son más eficientes para datos tomados diariamente que en intervalos más cortos.

Su fundamento es que la escorrentía está determinada por las condiciones del suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que se realice en este.

De esta manera, la ecuación de la curva numérica es:

$$Q_{swf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)}$$

Donde:

Q_{swf} es la escorrentía acumulada (mm)

R_{day} es la cantidad de lluvia en el día (mm)

I_a es la abstracción inicial que incluye el almacenamiento en superficie, la intercesión e infiltración antes de la escorrentía (mm)

S es el parámetro de retención (mm), el parámetro de retención varía espacialmente por cambios en los suelos, el uso del suelo, las prácticas de manejo y la pendiente y temporalmente por los cambios en el contenido de agua del suelo.

El parámetro de retención se expresa como:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Donde:

CN es el número de curva en el día.

Las abstracciones iniciales I_a , suelen aproximarse a $0.2S$ y la ecuación se convierte en:

$$Q_{swf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)}$$

La escorrentía solo ocurrirá cuando $R_{day} > I_a$, es decir cuando la cantidad de precipitación excede la cantidad de agua que se infiltra y el suelo se satura.

1.8.2.6 Percolación

Proceso por el cual el agua penetra en los estratos de la superficie del suelo y se mueve hacia el manto freático. El agua primero cubre la deficiencia de humedad del suelo y posteriormente cualquier exceso pasa a formar parte del agua subterránea. El movimiento lento que adquiere al llegar a la zona de saturación se llama percolación.

Para este componente SWAT usa una técnica de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa en el suelo en la zona de raíces, utilizando varias ecuaciones según la textura y la conductividad hidráulica de los suelos.

Cuando la capa de suelo se congela, el flujo de salida no se calcula. El volumen de agua disponible para la infiltración en la capa de suelo se calcula:

$$\begin{aligned} SW_{ly, excess} &= SW_{ly} - FC_{ly} & \text{si } SW_{ly} > FC_{ly} \\ SW_{ly, excess} &= 0 & \text{si } SW_{ly} \leq FC_{ly} \end{aligned}$$

Donde:

$SW_{ly, excess}$ es el volumen de drenado de agua en la capa de suelo en un día (mm), SW_{ly} es el contenido de agua de la capa de suelo en un día (mm)

FC_{ly} es el contenido de agua de la capa de suelo a capacidad de campo (mm)

La cantidad de agua que se mueve de una capa a la capa subyacente de almacenamiento se calcula utilizando la metodología de enrutamiento. Para calcular la cantidad de agua que se filtra a la capa inferior se utiliza la siguiente ecuación:

$$W_{perc,ly} = SW_{ly, excess} \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right)$$

Donde:

$W_{perc,ly}$ es la cantidad de agua que se filtra a la capa de suelo subyacente en un día (mm)

$SW_{ly, excess}$ es el volumen agua drenada en la capa del suelo en un día (mm)

Δt es tiempo transcurrido (hrs)

TT_{perc} es el tiempo de viaje de percolación (hrs). Cuando la HRU tiene un índice alto de temporada de lluvia, no permite la percolación, por lo que la ecuación será la siguiente:

$$SW_{ly-1} \leq FC_{ly+1} + 0.5 \cdot (SAT_{ly+1} - FC_{ly+1})$$

Donde:

SW_{ly+1} es el contenido de agua de la capa de suelo subyacente (mm)

FC_{ly+1} es el contenido de agua de la capa de suelo subyacente a capacidad de campo (mm)

SAT_{ly+1} es la cantidad de agua en la capa de suelo subyacente cuando está completamente saturado (mm).

El tiempo de viaje de percolación es único para cada capa, este se calcula:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}}$$

Donde:

TT_{perc} es el tiempo de viaje de percolación (hrs)

SAT_{ly} es la cantidad de agua en la capa de suelo cuando está completamente saturado (mm)

FC_{ly} es el contenido de agua de la capa de suelo en el campo capacidad (mm)

K_{sat} es la conductividad hidráulica de la capa saturada (mm·h⁻¹).

1.8.2.7 Flujo de Retorno

El flujo de retorno es el volumen de caudal procedente de las aguas subterráneas que regresa a la superficie. Para las aguas subterráneas el modelo considera dos sistemas: uno bajo en donde el acuífero contribuye al flujo de retorno de las corrientes dentro de la cuenca y uno profundo en donde el acuífero contribuye al flujo de retorno de las corrientes fuera de la cuenca.

1.8.2.8 Bases de datos de estadísticos de clima

La entrada de datos estadísticos de clima permite al modelo SWAT simular las condiciones climáticas de la cuenca y subcuencas en cualquier período de tiempo. Los datos estadísticos requeridos por el modelo se generan a partir de la información diaria de temperatura máxima y mínima, precipitación, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa (Neitsch, *et al.*, 2004). Los datos requeridos por el modelo son los siguientes:

Promedios mensuales. Se calcula para los datos correspondientes a temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), precipitación (mm), radiación solar (MJ/m²/día), temperatura del punto de rocío (°C) y velocidad del viento (m/s). Para el cálculo se utiliza una ecuación general (se usa como ejemplo la temperatura máxima):

$$\mu mx_{mon} = \frac{\sum_{d=1}^N T_{mx,mon}}{N}$$

Donde:

μmx_{mon} es la temperatura media máxima diaria del mes (°C)

$T_{mx,mon}$ es la temperatura máxima diaria en el mes (°C)

N es el número total de los registros diarios de temperatura máxima para el mes.

Desviación estándar mensual. Se calcula para los datos correspondientes a temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. La ecuación para calcular estos valores es la siguiente (se usa como ejemplo la temperatura máxima):

$$\sigma_{mx_{mon}} = \sqrt{\left(\frac{\sum_{d=1}^N (T_{mx,mon} - \mu_{mx_{mon}})^2}{N - 1} \right)}$$

Donde:

$\sigma_{mx_{mon}}$ es la desviación estándar de la temperatura máxima diaria en el mes (°C)

$T_{mx,mon}$ es la temperatura máxima diaria en el mes (°C)

$\mu_{mx_{mon}}$ es el promedio de temperatura máxima diaria en el mes (°C)

N es el número total de registros diarios de temperatura máxima para el mes.

Sesgo mensual, solo es requerido para la precipitación diaria del mes y se calcula con la siguiente fórmula:

$$g_{mon} = \frac{N \cdot \sum_{d=1}^N (R_{day,mon} - \bar{R}_{mon})^3}{(N - 1) \cdot (N - 2) - (\sigma_{mon})^2}$$

Donde:

g_{mon} es el coeficiente de sesgo de la precipitación en el mes

N es el número total de registros de precipitación diaria para el mes

$R_{day,mon}$ es la cantidad de precipitación para el mes (mm)

\bar{R}_{mon} es la precipitación media en el mes (mm)

σ_{mon} es la desviación estándar de la precipitación diaria en el mes (mm)

Los valores de precipitación diaria de 0 mm se incluyen en el cálculo del sesgo.

Probabilidades de precipitación, para su cálculo SWAT usa el método de las cadenas de Markov.

Corresponden a las probabilidades de que se presente un día de lluvia después de un día seco en el mes ($P_i(W/D)$), y de que se presente un día de lluvia después de un día de lluvia en el mes

($P_i(W/W)$). Estos valores se calculan con las formulas siguientes:

$$P_i(W/D) = \frac{days_{W/D,i}}{days_{dry,i}}$$

Donde:

$days_{W/D,i}$ es el número de veces que un día húmedo es seguido de un día seco en un mes para todo el tiempo de registros

$days_{dry,i}$ es el número de días secos en un mes durante todo el período de registro. Un día seco es un día con 0 mm de precipitación y un día de lluvia es un día con precipitación mayor a 0 mm.

$$P_i(W/W) = \frac{days_{W/W,i}}{days_{wet,i}}$$

Donde:

$P_i(W/W)$ es la probabilidad de un día de lluvia después de un día de lluvia en un mes

$days_{W/W,i}$ es el número de veces en un día húmedo seguido un día de lluvia en un mes para todo el período de registro

$days_{wet,i}$ es el número de días lluviosos en un mes durante todo el período de registro.

Promedio del número de días de precipitación en el mes. Este parámetro es calculado con la siguiente fórmula:

$$\bar{d}_{wet,i} = \frac{days_{wet,i}}{yrs}$$

Donde:

$\bar{d}_{wet,i}$ es el número promedio de días de precipitación en un mes

$days_{wet,i}$ es el número de días lluviosos en un mes durante todo el período de registro

yrs es el número de años de registros.

1.8.2.9 Bases de datos de suelos

La base de datos de suelo utilizada por el modelo SWAT contienen información sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos. Las propiedades físicas rigen el movimiento de agua y el aire a través del perfil, teniendo un impacto importante en el ciclo hidrológico, y las propiedades químicas se utilizan para establecer los niveles iniciales de los diferentes elementos químicos en el suelo. Es requisito indispensable contar con datos de las propiedades físicas, la información sobre las propiedades químicas es opcional.

Las variables requeridas en la base de datos de suelos de acuerdo con Neitsch, *et al.* (2004) son las siguientes:

1. Número de capas del perfil del suelo. Se pueden ingresar de 1 a 10 capas.
2. Grupo hidrológico del suelo (A, B, C o D) conforme a la clasificación del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de los Estados Unidos de América (NRCS) basada en las características de infiltración de los suelos.
3. La profundidad máxima de enraizamiento en el perfil del suelo (mm). Es la suma total de cada una de las profundidades de las capas del perfil. Si no se especifica la profundidad, el modelo asume que las raíces se pueden desarrollar en la profundidad total del perfil.
4. La profundidad desde la superficie del suelo hasta la parte inferior de cada capa (mm).
5. La densidad aparente húmeda (mg/m^3 o g/cm^3). La densidad aparente del suelo expresa la relación entre la masa de partículas sólidas y el volumen total del suelo y se calcula:

$$\rho_b = M_s/V_t$$

Donde:

ρ_b es la densidad aparente

M_s la masa de partículas sólidas

V_t el volumen total del suelo

Los valores de densidad aparente deberían estar entre 1.1 y 1.9 mg/m^3 .

6. Capacidad de agua disponible en la capa del suelo (mm del suelo H₂O/mm). El agua disponible en las plantas, también conocida como la capacidad de agua disponible, se calcula restando la fracción de agua presente en el punto de marchitez permanente a la capacidad de campo permanente:

$$AWC=FC-WP$$

Donde:

AWC es el contenido de agua de la planta

FC es el contenido de agua a capacidad de campo

WP es el contenido de agua en el punto de marchitez permanente

La capacidad de agua disponible se calcula mediante la determinación de la cantidad de agua liberada entre la capacidad de campo *in situ* (el contenido de agua del suelo a potencial mátrico, - 0.033 MPa) y el punto de marchitez permanente (el contenido de agua del suelo a potencial mátrico, -1.5 MPa).

1. Conductividad hidráulica saturada (mm/h). La conductividad hidráulica saturada, **K_{sat}**, relaciona la proporción del flujo de agua y el gradiente hidráulico, y es una medida de la facilidad de movimiento del agua a través del suelo.
2. Contenido de carbono orgánico en el suelo (% del peso del suelo). Es la porción de una muestra de suelo que pasa a través de un tamiz de 2 mm.
3. Contenido de arcilla (% del peso del suelo). El porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro equivalente y menor a 0.002 mm.
4. Contenido de limo (% del peso del suelo). El porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro equivalente entre 0.05 y 0.002 mm.
5. Contenido de arena (% del peso del suelo). El porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro entre 2.0 y 0.05 mm.
6. Contenido fragmento de roca (% del peso total). El porcentaje de la muestra que tiene un diámetro de partículas superior a 2 mm.

7. Albedo del suelo. La relación de la cantidad de radiación solar reflejada por un cuerpo por la cantidad incidente sobre este, expresado como una fracción. El valor del albedo debe informar cuando el suelo está en o cerca de la capacidad de campo.
8. Factor de erosionabilidad del suelo: Algunos suelos se erosionan más que otros, aun cuando los demás factores son iguales. Esta diferencia se denomina erosionabilidad del suelo y es causada por las propiedades del suelo mismo. Wischmeier y Smith (1978) la definen como la pérdida de suelo determinado, por erosión, medido en unidad de parcela que equivalente a 22.1 m (72.6 pies) de largo, con una pendiente uniforme de 9% en sentido longitudinal, en barbecho continuo arriba y debajo de la pendiente. El barbecho continuo se define como la tierra labrada que ha sido mantenida sin vegetación durante más de dos años. Las unidades de medida del factor de erosionabilidad son equivalentes a las unidades inglesas de 0.01 (ton acre hr) / (acre ft-ton inch).

Wischmeier y Smith (1978) notaron que un tipo de suelo usualmente llega a ser menos susceptible a la erosión cuando disminuye la fracción de limo, aunque se incremente la fracción de arena o arcilla, por lo que desarrollaron una ecuación general para calcular el factor de erosionabilidad del suelo cuando el contenido de limo y arena muy fina llegan a ser menores que el 70 % de la distribución del tamaño de la partícula del suelo:

$$K_{USLE} = \frac{0.00021 \cdot M^{1.14}(12 - OM) + 3.25 \cdot (c_{soilstr} - 2) + 2.5 \cdot (c_{perm} - 3)}{100}$$

Donde:

K_{USLE} es el factor de erosionabilidad del suelo

M es el parámetro de tamaño de las partículas

OM es el porcentaje de materia orgánica

$c_{soilstr}$ es la clave de la estructura usada en la clasificación del suelo

c_{perm} es la clase de permeabilidad.

El parámetro de tamaño de las partículas (M), es calculado con la siguiente fórmula:

$$M = (m_{silt} + m_{vfs}) \cdot (100 - m_c)$$

Donde:

m_{silt} es el porcentaje de contenido de limo

m_{vfs} es el porcentaje de contenido de arena

m_c es el porcentaje de contenido de arcilla.

El porcentaje de materia orgánica OM , de una capa es calculado:

$$OM = 1.72 \cdot orgC$$

Donde:

$orgC$ es el porcentaje de contenido de carbón orgánico.

1.8.2.10 Base de datos de uso del suelo y vegetación

La base de datos de uso de suelo y vegetación contiene la información que se necesita para simular el crecimiento de la cobertura vegetal en condiciones ideales y permite cuantificar el impacto de algunas tensiones en el crecimiento de la vegetación. Esta información es importante ya que influye en la escorrentía, la evapotranspiración y la erosión superficial en una cuenca hidrográfica. El uso de suelo y vegetación se reclasifica conforme a las coberturas genéricas utilizadas por SWAT (Neitsch, *et al.*, 2004).

2.0 ZONA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación Geográfica

El Estado de México se localiza entre los meridianos $98^{\circ} 35'$ y $100^{\circ} 37'$ de Longitud oeste y los paralelos $18^{\circ} 20'$ y $20^{\circ} 17'$ de Latitud Norte. Se ubica en la parte central de la República Mexicana y colinda al norte con los estados de Querétaro e Hidalgo; al este con los estados de Tlaxcala y Puebla, al sur con el Distrito Federal y los estados de Morelos y Guerrero y al oeste con el estado de Michoacán. Su división política comprende actualmente 125 municipios con una extensión de 22,357 km². El Estado de México representa el 1.1% de la superficie del país (INEGI, 2007, Figura.7).

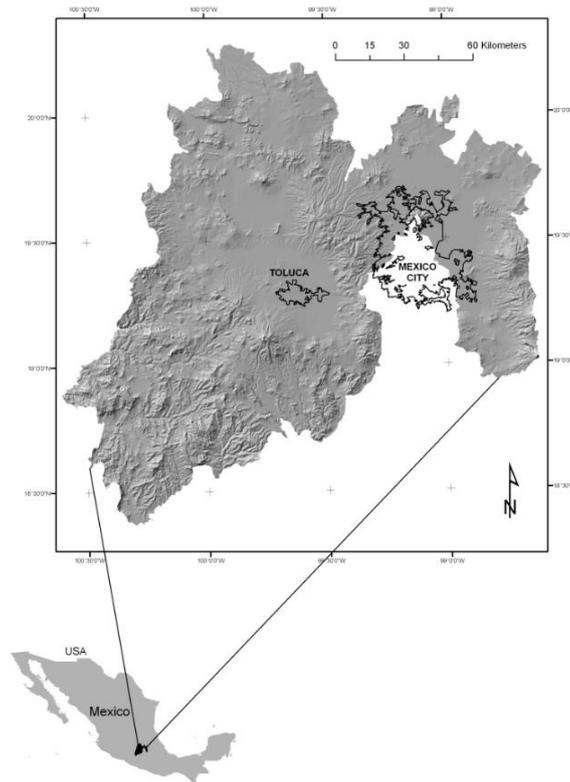


FIGURA 7: Ubicación Geográfica del Estado de México

El Estado de México se encuentra localizado dentro de cuatro de las trece Regiones Hidrológico-administrativas de CONAGUA: IV Balsas, VIII Lerma- Santiago- Pacifico, IX Golfo Norte y XII Aguas del Valle de México (Conagua, 2010).

2.2 Población

Se estima que lo conforman más de 15 millones de habitantes aproximadamente, lo que equivale al 14% de la población total del país, situación que lo ubica como la entidad federativa con mayor población, seguida por el Distrito Federal con poco más de 8.5 millones de habitantes.

La población estatal se encuentra altamente concentrada en la Zona Metropolitana del Valle de México, que considera dentro de sus límites a 59 municipios del Estado; del total de la población, 86.99% reside en localidades urbanas y 13.01% en rurales. (INEGI,2007).

2.3 Clima

Las condiciones de temperatura y precipitación en el estado dan lugar al predominio de los climas templados en poco más de la mitad de su territorio.

El 73% del estado presenta clima templado subhúmedo, localizado en los valles altos del norte, centro y este; el 21% es cálido subhúmedo y se encuentra hacia el suroeste, el 6% seco y semiseco, presente en el noreste, y 0.16% clima frío, localizado en las partes altas de los volcanes (INEGI, 2007, Tabla 1).

Climas conforme a la clasificación climática de Köppen, modificado por Enriqueta García (Figura 8).

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	% DE LA SUPERFICIE ESTATAL
Aw(w)	Cálido subhúmedo	21
BS1kw	Seco y Semiseco	6
C(w)(w)	Templado subhúmedo	73
E(T)H	Frío	0.16

TABLA 1: Climas del Estado de México

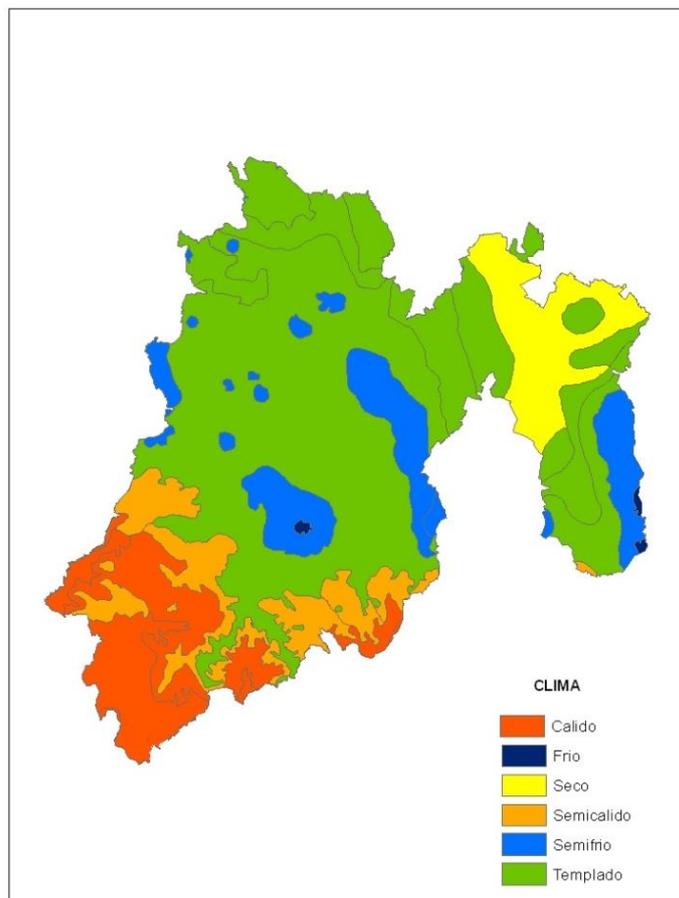


FIGURA 8: Climas del Estado de México

2.4 Precipitación

Las lluvias se presentan durante el verano de junio a septiembre, la precipitación media del estado es de 900 mm anuales, superior a la media nacional de 773.5 mm (Figura 9). La forma de las distribuciones es semejante, aunque los valores absolutos de la precipitación durante la época de lluvias (junio-septiembre) son mayores en el Estado de México mientras que en el estiaje (octubre-mayo), la precipitación en el estado es inferior al promedio nacional (CONAGUA,2010).

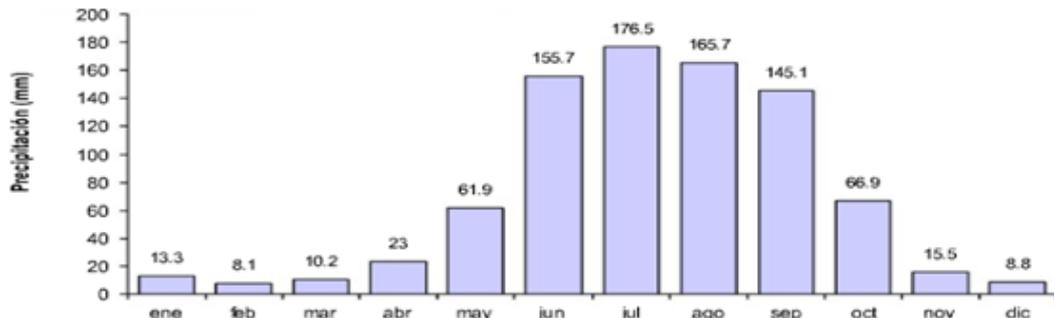


FIGURA 9: Precipitación mensual del Estado de México
(Fuente: CONAGUA)

La precipitación media anual en el territorio estatal es muy variable. Las mayores precipitaciones se presentan en el suroeste del estado, donde los valores medios anuales superan los 1,200 mm (INEGI, 2007, Figura 10).

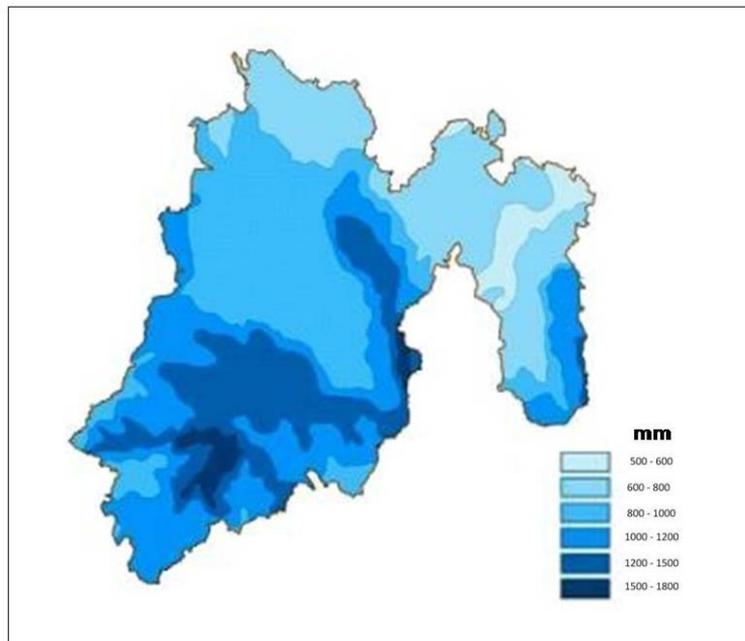


FIGURA 10: Precipitación en el Estado de México

2.5 Temperatura

La temperatura media anual es de 15.2°C, las temperaturas más bajas se presentan en los meses de enero y febrero (alrededor de 3.0C). La temperatura máxima promedio se presentan entre abril y mayo y es alrededor de 25°C. Los meses más calurosos corresponden al periodo abril a junio mientras que los más fríos son de diciembre a febrero. Los valores medios más bajos están alrededor de 5.75° C y los máximos de 22.9° C con diferencias entre las temperaturas mensuales máxima y mínima de hasta 20° C (INEGI, 2007, Figura 11).

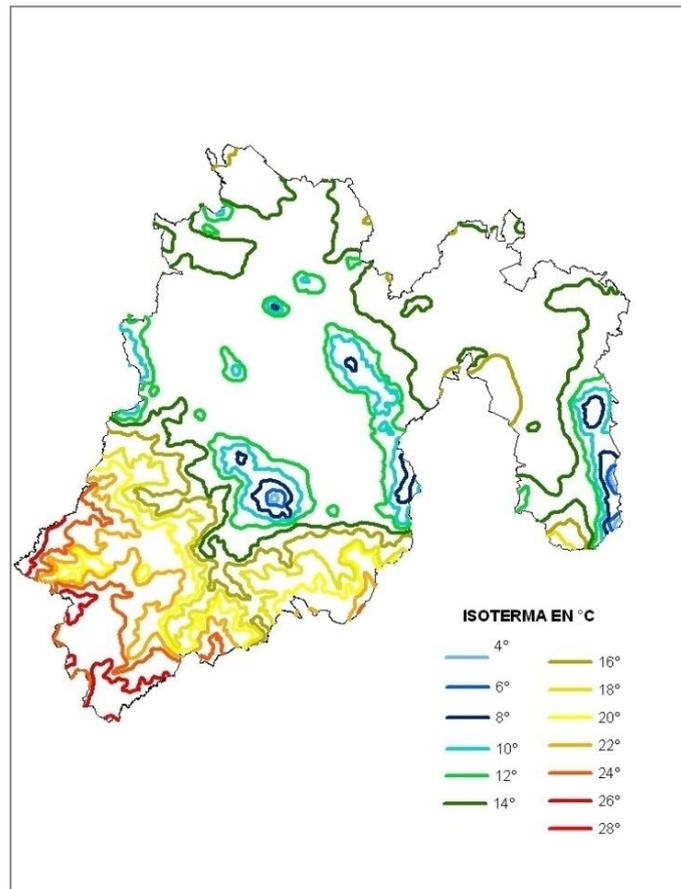


FIGURA 11: Temperatura del Estado de México

2.6 Orografía

La orografía o paisaje natural del Estado de México está dominada por montañas y valles. Las montañas se localizan desde la Cuenca del Balsas, a menos de 500 msnm, hasta más de 5,000 msnm en dos de los cinco volcanes más altos del país: el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl. En el altiplano se encuentran amplios valles, que son de gran productividad agrícola (INEGI, 2007, Figura 12).

La superficie estatal forma parte de las provincias Eje Volcánico y Sierra Madre del Sur.

En el suroeste hay una sierra conformada por rocas metamórficas, sedimentarias, ígneas intrusivas e ígneas extrusivas o volcánicas; en un valle ubicado entre serranías, en esta zona se encuentra la altura más baja (400 msnm) en el cañón que ha formado el río San Pedro (INEGI, 2007).

En el centro se encuentra un lomerío con sierras de origen ígneo extrusivo o volcánico, volcanes de edad geológica cuaternaria y valles; se incluyen las depresiones que dieron origen al lago de Texcoco (INEGI, 2007).

Al sureste está la elevación más importante, el volcán Popocatepetl con 5 500 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2007).

En el estado de México existen 22 sierras, mismas que conforman las diferentes cuencas del estado (INEGI, 2007).



FIGURA 12: Provincias Fisiográficas del Estado de México

2.7 Geología

La litología del estado de México está constituida por afloramientos de rocas de origen ígneo, sedimentario y metamórfico, siendo las rocas ígneas extrusivas las que ocupan una mayor extensión. Las rocas de esta entidad datan del Triásico (metamórficas) hasta el Cuaternario (representado por rocas ígneas de composición basáltica, así como por depósitos lacustres y aluviales, INEGI, 2007).

Las principales estructuras geológicas que se presentan son aparatos volcánicos, algunos de los cuales se cuentan entre los más notables del país: el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl y el Nevado de Toluca. Además, existen fracturas y fallas regionales, asociadas a los fenómenos de vulcanismo y mineralización. Los aspectos de geología económica más importantes están relacionados con las rocas que por su naturaleza primaria y las estructuras que las han afectado, constituyen zonas favorables para la explotación de acuíferos, de yacimientos minerales y de bancos de materiales para la construcción (INEGI, 2007, Figura 13).

Eje Volcánico

Esta provincia cubre la mayor parte del estado en su porción norte. Limita al sur con la Sierra Madre del Sur. Está caracterizada geológicamente por el predominio de rocas volcánicas cenozoicas que datan del Terciario y del Cuaternario.

Las principales estructuras de esta provincia son los aparatos volcánicos formados por conos cineríticos y derrames de lavas. De entre estos sobresalen el Popocatepetl, el Iztaccíhuatl y el Nevado de Toluca, que son los volcanes más notables del país, todos ellos formados por rocas andesíticas (INEGI, 2007).

Sierra Madre del Sur

Abarca la extensión conocida como Cuenca del Balsas, la cual cubre la porción sur de la entidad; limita al norte con Eje Volcánico.

Las rocas más antiguas de esta provincia son las metamórficas del Triásico. Las rocas del Cretácico son sedimentarias, litológicamente clasificadas como calizas y calizas interestratificadas con lutitas. Aunque no cubren mucha extensión, estas rocas afloran discordantemente cubriendo las rocas metamórficas del Triásico, en localidades como Tonicato, Ixtapan y Zumpahuacán. Las

rocas del Terciario son en su gran mayoría volcánicas. Del Cuaternario existen rocas volcánicas de tipo basáltico que, por sus estructuras bien conservadas, evidencian la actividad volcánica reciente. Estas estructuras se ven al sureste de Tejupilco (INEGI, 2007).

Por último, son del Cuaternario los depósitos aluviales que rellenan los valles de los ríos que drenan hacia la cuenca del Río Balsas. Además de las estructuras volcánicas, en esta provincia existen fallas y fracturas que en los distritos mineros aparecen mineralizadas (INEGI, 2007).

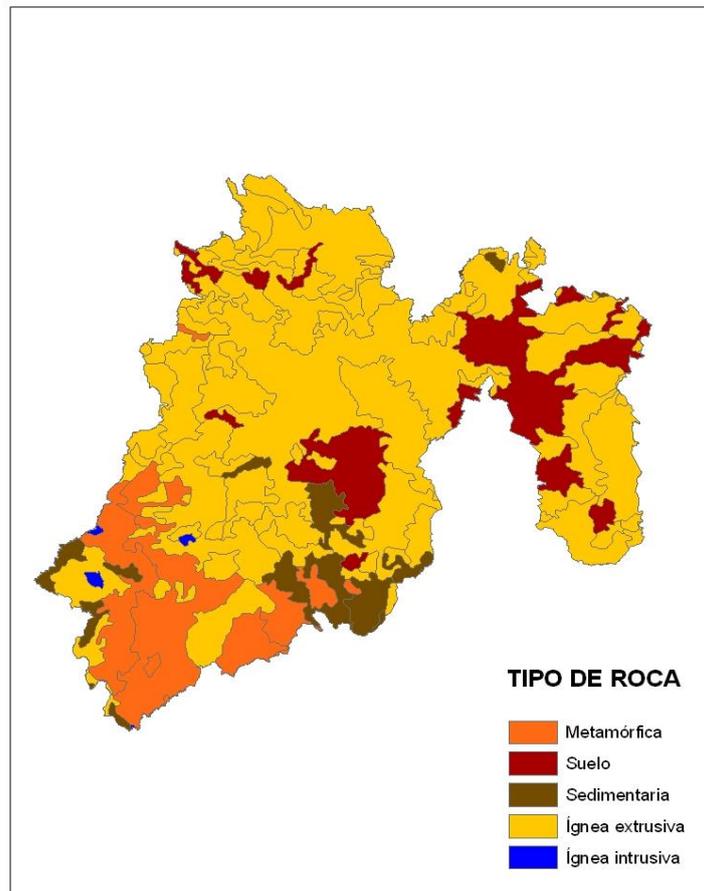


FIGURA 13: Geología del Estado de México

2.8 Edafología

Los suelos predominantes son los Andosoles, esto es, suelos jóvenes derivados de cenizas volcánicas. Se extienden en el 22% del estado; se consideran de baja calidad agrícola o para fines pecuarios. Le siguen los Feozem, que cubren el 21% del territorio estatal y se localizan en las partes intermedias y bajas de montañas (Piedemonte), de buena aptitud de uso ganadero. Los Vertisoles, suelos de zonas planas y los de mayor productividad agrícola ocupan un 14% del territorio estatal, siguiendo con 11% del territorio los Regosoles o suelos poco desarrollados y con

pedregosidad, ubicados mayormente en la Cuenca del Balsas. Su rendimiento agrícola es limitado y depende del grado de desarrollo que tenga, así como de su exposición a laderas y pendientes que provocan su erosión (INEGI, 2007).

Con un 8% le siguen los Cambisoles o suelos cambiantes con alto contenido de arcilla, que forman grietas en el suelo cuando se secan. Se encuentran en los valles, siendo productivos para la agricultura si cuentan con riego. El 24% restante se distribuye entre Planosoles (7%), Litosoles (5%), Luvisoles (4%) y un 9% para Acrisoles, Histosoles, Fluvisoles, Gleysoles y Solonchak. Buena parte de los suelos, de buen rendimiento agrícola (Vertisoles y Feozem), son los que más rápidamente están pasando de uso agrícola a urbano e industrial, con lo que se presiona a los suelos de vocación forestal, provocando así fuerte erosión y pérdida de la biodiversidad (INEGI, 2007, Figura 14).

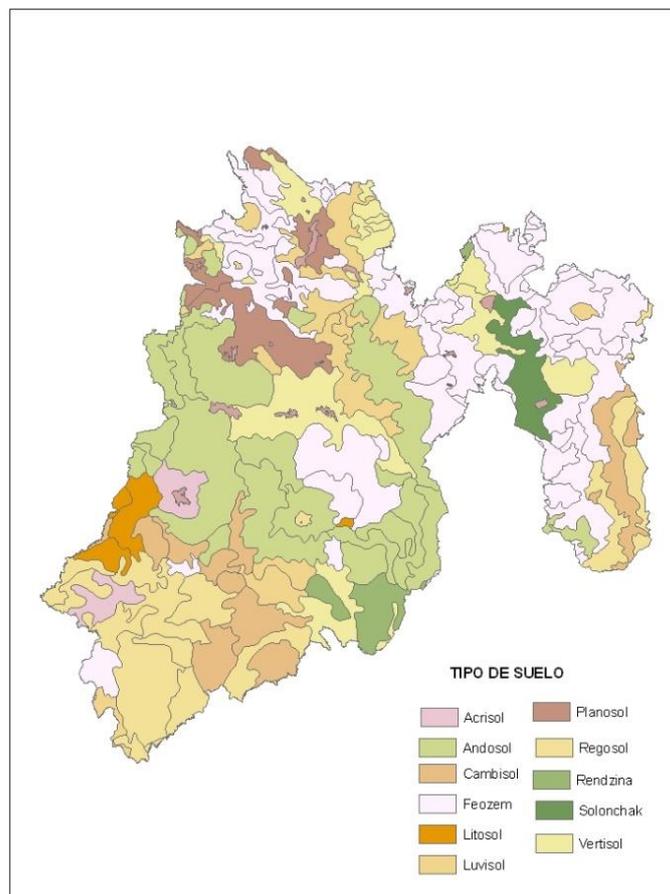


FIGURA 14: Edafología del Estado de México

2.9 Uso del suelo y vegetación

En el estado se practica la agricultura de riego y de temporal siendo los principales cultivos: maíz, chícharo verde, cebada, frijol, papa, alfalfa, trigo, aguacate y guayaba (INEGI, 2007).

En el oriente de la entidad existe aptitud agrícola, para el cultivo de la calabaza, chile, ejote, frijol, jitomate, sorgo y soya entre otros; en el aspecto pecuario es factible la crianza de bovinos de carne, bovinos de leche, caprinos y ovinos de diferentes razas; por lo que respecta al uso forestal es factible el aprovechamiento industrial de recursos maderable y no maderables, así como la explotación forestal para uso doméstico. En el norte de la entidad existe aptitud agrícola, para el cultivo de aguacate, ajo, berenjena, brócoli, calabacita, cebada, chícharo, durazno, pera, pata de gallo, higo, jitomate y avena entre otros; en el aspecto pecuario es factible criar mediante pastoreo extensivo a ganado caprino, bovino de carne y bovino de leche de diferentes razas; en el aspecto forestal sería posible en algunos casos lograr el aprovechamiento forestal industrial, comercial y para uso doméstico. En el área ocupada por la Subprovincia de los Lagos y Volcanes de Anáhuac existe aptitud agrícola de temporal y riego para el cultivo de ajo, alcachofa, apio, cebada, centeno, garbanzo, ejote y perejil entre otros; por lo que respecta a lo pecuario sería factible criar bovinos, caprinos y ovinos; en cuanto a lo forestal sería posible aprovechar los recursos para el aprovechamiento industrial, comercial y doméstica. En la porción sur del territorio estatal, Subprovincia de la Depresión del Balsas existe aptitud agrícola, para el cultivo de sorgo, cebada, avena, soya, camote, chile y sandía entre otros; en el aspecto pecuario es factible la crianza de ovinos, bovinos y caprinos; en cuanto a los recursos forestales, resultaría factible primordialmente la explotación industrial y para consumo doméstico. En la porción del territorio ocupada por la Subprovincia de las Sierras y Valles Guerrerenses existe aptitud agrícola para el cultivo de apio, cártamo, ciruelo, garbanzo, girasol, durazno, manzana, chabacano y avena entre otros; resultaría igualmente factible criar ganado de diferentes razas, así como aprovechar los recursos maderables para consumo doméstico y explotación industrial (INEGI, 2007).

Las características en cuanto su vegetación predominante es de un 80% representada por la selva baja caducifolia compuesta de árboles, matorrales y otros tipos de yerbas que sólo registran algún follaje en el período de lluvias (INEGI, 2007).

Se tienen especies comunes que se utilizan en la industria, medicina, ornato, construcción, ebanistería y otros usos; encinos, ceibas, ocotes, tepehuajes, fresnos, café; frutales: guayabo

arrayán, nanche, tamarindo, durazno, toronja, ciruelo, pinzán, chirimoya, lima, capulín, níspero y guajes (INEGI, 2007).

Arboles maderables: cedros, madroño, cuitas, cubata, huizache, casahuate, palma, cuahuilote, chirare, zopilote, cascalote, nogal, sauz y espino herrero (INEGI, 2007).

Plantas de ornato: tulipanes de diferentes colores y clases, bugambilias, rosales, teresitas, lirios, acuáticos y platanillos, las dalias, geranios, pascuas, acacias, hortensias, la flor de vara blanca, una variedad de azucenas y otras flores silvestres (INEGI, 2007, Figura 15).

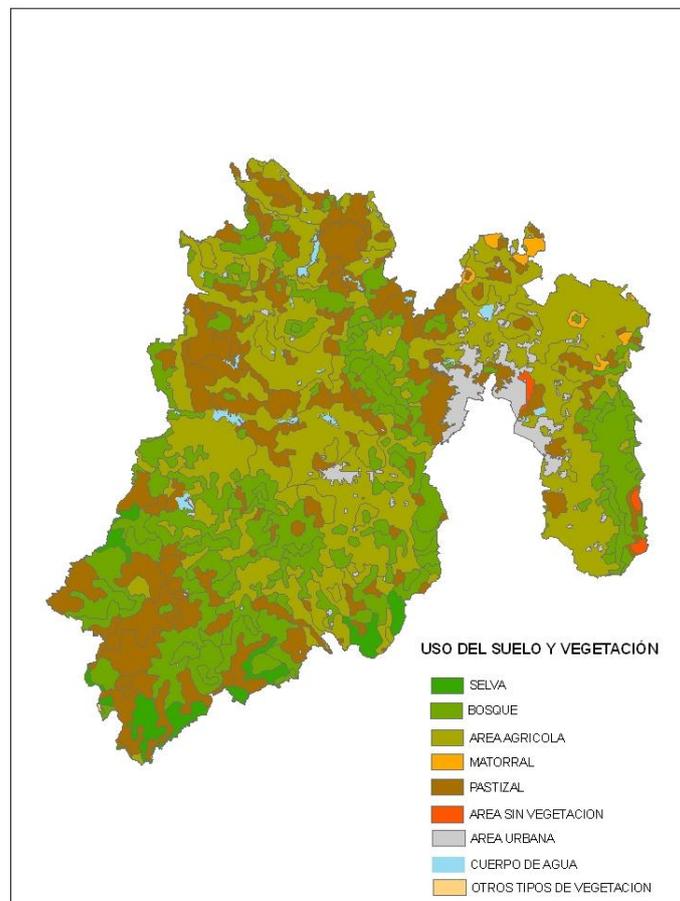


FIGURA 15: Uso del Suelo y Vegetación del Estado de México

2.10 Hidrología

El estado forma parte del origen de tres importantes cuencas hidrológicas para el país: La del Río Lerma, la del Río Balsas, y la del Río Pánuco (INEGI, 2007).

Dentro del territorio del Estado de México se localiza el Organismo de Cuenca IV Balsas, donde se da el nacimiento del río Balsas, que es uno de los ríos más importantes del país. El área de la cuenca comprendida dentro del territorio del Estado de México es de 8,740 km², superficie

repartida entre parte de las cuencas de los ríos Atoyac, Amacuzac, Poliutla y Cutzamala. Su escurrimiento medio anual estimado es de 2,913.6 hm³ (INEGI, 2007).

En el Organismo de Cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico, la cuenca principal que se ubica dentro del Estado de México es la del río Lerma, el cual recorre dentro del estado unos 170 kilómetros. Las cuencas que conforman el Alto Lerma dentro del estado tienen una extensión de 5,306 km² y son: Cuenca Río Lerma 1 (Alzate), Cuenca La Gavia (Ramírez), Cuenca Río Jaltepec (Tepetitlán) y Cuenca Río Lerma 2 (Tepuxtepec). El escurrimiento superficial natural es de 1,128.8 hm³ anuales (INEGI, 2007).

En el Organismo de Cuenca IX Golfo Norte, el Estado de México tiene una extensión de 1,803 km², 8.85% de la superficie total estatal. Presenta un escurrimiento natural de 213.3 hm³ anuales. Consta de las cuencas de los ríos San Juan y Tula (INEGI, 2007). En el organismo de Cuenca XIII Aguas del Valle de México, la porción del Estado de México se localiza en la zona noroeste y este del estado, en la Cuenca de México, con una superficie de 6,507 km² y un escurrimiento medio anual de 590.8 hm³ (INEGI, 2007).

La entidad tiene un déficit de agua por sobreexplotación de mantos freáticos y aguas superficiales, por el deterioro de las cuencas debido a deforestación, cambio de uso de suelo y erosión, y por la contaminación a ríos y arroyos por aguas residuales industriales y municipales no tratadas. Lo anterior compromete seriamente las posibilidades de abastecer de agua limpia a una población creciente, afectando también a la importante actividad pesquera del estado, que ocupa el primer lugar nacional en producción pesquera continental, alejando así las posibilidades de desarrollo sustentable (INEGI, 2007, Figura 16).

2.11 Disponibilidad de Recursos Hídricos

En el territorio del Estado de México se generan 4,873 hm³ de escurrimiento medio anual, de los cuales se utilizan 1,427 hm³, lo que la convierte en una importante entidad exportadora de agua, hacia la Ciudad de México.

Uno de los principales problemas en el estado consiste en que el 75% de la población se concentra en 59 municipios de la Zona Metropolitana del Valle de México y un 11% en 14 municipios de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Esto ha provocado la sobreexplotación de los acuíferos locales y ha hecho necesaria la construcción de infraestructura para la transferencia de

importantes volúmenes de agua desde las cuencas de los ríos Lerma y Cutzamala hacia el Valle de México (CONAGUA, 2010).

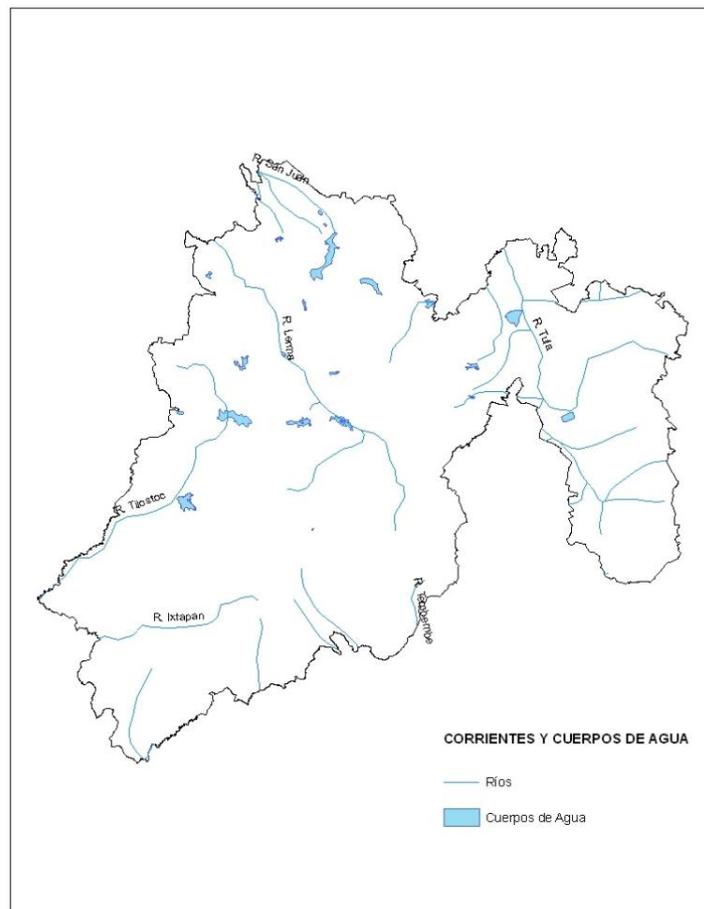


FIGURA 16: Hidrología del Estado de México

2.12 Balance Hídrico

El volumen total que recibe el Estado de México por precipitación es de 22,472 millones de metros cúbicos (mm^3) pero gran parte, aproximadamente 80 % regresa a la atmósfera por evapotranspiración. Del total de agua disponible, 1,067 mm^3 se infiltran y 3,707 mm^3 escurren, incorporándose a ríos, arroyos y embalses de la entidad. Por región hidrográfica, el Balsas recibe la mitad del volumen de precipitación y también participa con un importante volumen de escurrimiento. La región Lerma destaca por su participación en la infiltración y por lo tanto en la recarga de mantos freáticos (CONAGUA, 2010, Tabla 2).

REGIÓN	Precipitación		Percolación		Escorrentamiento	
	mm	mm ³	mm ³	m ³ /s	mm ³	m ³ /s
Pánuco	771	6367	383	12.14	748	23.72
Lerma	915	4735	524	16.62	799	25.33
Balsas	1254	11370	160	5.07	160	68.48
Estado	999	22472	1067	33.83	3707	117.53

TABLA2: Balance Hídrico en las Regiones comprendidas en el Estado de México
(Fuente: CAEM 2011)

Además del aporte natural, la entidad recibe al año 109.8 mm³ de agua proveniente de las presas Tuxpan y El Bosque, ambas pertenecientes al estado de Michoacán, que junto con las presas mexiquenses Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo, Villa Victoria y Chilesdo alimentan el Sistema Cutzamala. Por otra parte, el Estado de México exporta al año un volumen aproximado de 540.2 mm³ de agua potable al Distrito Federal a través de los sistemas Lerma-Cutzamala, Norte y Oriente (Estado de México, 2010).

3.0 MATERIALES Y MÉTODOS

Para elaborar este trabajo la información se procesó para usar la interface del modelo SWAT con el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS 9.3. La información requerida por SWAT fue la siguiente: bases de datos de clima y suelos, Modelo de Elevación Digital (DEM), máscara del área de estudio, Red Hidrológica, Tipos de Suelos y Uso de Suelo y Vegetación.

La proyección utilizada para la elaboración de este trabajo fue UTM (Universal Transversa de Mercator) Zona 14, DATUM D North American 1983.

En la figura 17, se pueden observar los pasos que se siguieron para la realización de este trabajo.

3.1 Procesamiento e ingreso de datos

3.1.1 Bases de datos diarios de precipitación y temperatura

Para generar las bases de datos diarios de temperatura y precipitación para la simulación de factores climáticos al año 2008, se utilizaron datos diarios de 1961 al 2008. Para esto se tomaron en cuenta 71 estaciones climáticas, del Servicio Meteorológico Nacional, dentro de el Estado de México y aquellas ubicadas hasta una distancia de 20 km fuera del límite estatal.

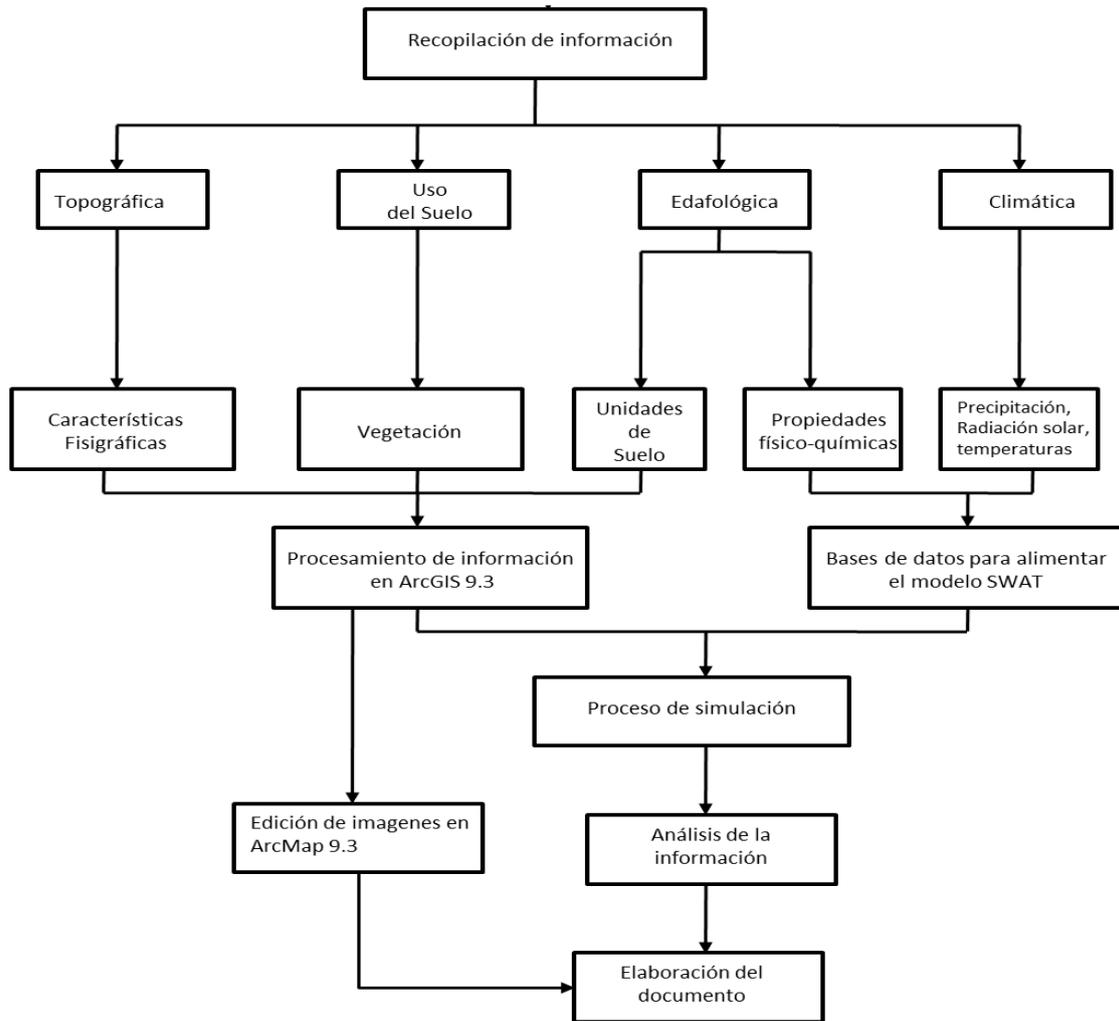


FIGURA 17: Diagrama de flujo metodológico.

3.1.2 Bases de datos de estadísticos climáticos

Los estadísticos empleados son los promedios, desviaciones estándar de las temperaturas máxima y mínima y la precipitación, para esta última también se calculó el sesgo, las probabilidades de días húmedos o secos y el promedio de días con lluvias, promedios de radiación, velocidad del viento y de temperatura del punto de rocío. Estos factores fueron calculados con las formulas sugeridas por el manual de SWAT, a excepción de los datos de radiación, temperatura del punto de rocío y velocidad del viento. Para la temperatura de punto de rocío y velocidad del viento se empleó LocClim desarrollado por la FAO (2006), este programa calcula los datos por medio de la interpolación de los datos de las estaciones meteorológicas de la FAO, los cuales vienen incluidos en el programa (con el método de inversa a la distancia). Este programa emplea las coordenadas geográficas del lugar de donde se requiere información. Para el cálculo de la

radiación se usó el programa RADG1, desarrollado por el Colegio de Postgraduados en Agricultura, este programa utiliza datos de latitud en grados y minutos y los promedios de precipitación, temperaturas máxima y mínima.

Las bases de datos de estadísticos de los años 2030 y 2050 se utilizaron los datos de precipitación, temperaturas máxima y mínima de los escenarios de cambio climático A2 y B2 del modelo CGCM que fueron mencionados anteriormente, siguiendo los mismos pasos para la generación de estadísticos actuales.

3.1.3 Bases de datos de clima futuros

Las bases de datos de clima requeridas por SWAT se generaron a partir de los escenarios de cambio climático correspondientes al modelo CGCM escenarios A2 y B2. Estos escenarios fueron generados Velázquez-Alfaro (2011) en el proyecto que lleva como nombre: "Efectos del cambio climático en el sector primario de dos especies de importancia económica para el Estado de México", proyecto donde radica la presente investigación. El procedimiento para elaborar los escenarios fue el siguiente:

Los datos que se utilizaron para la generación de escenarios, se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional, estos corresponden a registros diarios de temperatura mínima, máxima y precipitación de los siguientes estados: Estado de México, Guerrero, Hidalgo, Michoacán, Morelos, Puebla y Tlaxcala.

Mediante una programación, con el software SAS (Statistical Analysis System), se procesó la información y por medio de un búfer de 20 km alrededor del estado elaborado con ArcGIS 9.3, con la finalidad de cubrir la totalidad de la superficie del Estado con información de estaciones meteorológicas.

Con el programa Statistical Downscaling se generaron 20 simulaciones de los años 1961 a 2100, a los archivos generados se les incluyeron las coordenadas geográficas de su estación climática respectiva, obteniendo escenarios de cambio climático con datos diarios de temperatura máxima, mínima y precipitación. Se seleccionaron 71 estaciones climatológicas (Anexo H).

3.1.4 Modelo digital de elevación

El Modelo de Elevación Digital (DEM) del Estado de México fue generado a partir de las curvas de nivel del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI, 2005) correspondientes a las cartas topográficas escala 1:50 000. El tamaño de celda horizontal fue de 30 x 30 metros y 1 metro de resolución vertical.

3.1.5 Red hidrológica

A partir de los vectores (corrientes perennes) a escala 1:50 000 del INEGI (2005), se obtuvo la red hidrológica, esta información permitió a SWAT tener mayor precisión en la delimitación de cuencas, subcuencas y la red de drenaje (Anexo C).

3.1.6 Cobertura de Uso del Suelo y Vegetación

La capa de uso de suelo y vegetación se obtuvo a partir de la Serie III de la carta denominada Uso de suelo y Vegetación de INEGI (2002). Esta capa se reclasificó de acuerdo al método de la Curva Numérica del manual de SWAT. Donde las zonas urbanas se reclasificaron con base a la información contenida en el Censo de población 2005 de INEGI, para el Estado de México. Así, se clasificaron como zonas urbanas de alta densidad a las localidades con más de 100,000 habitantes.

3.1.7 Procesamiento de la información del suelo

Los polígonos de las unidades de suelo se obtuvieron de las cartas edafológicas del INEGI (1977 y 1988) a escala 1:250 000. Para generar la base de datos de propiedades físicas de los suelos se digitalizaron los perfiles con información edafológica contenidos en las cartas. Cada punto que representa un perfil de suelo contiene un identificador y las propiedades físicas y químicas del suelo. En una misma capa se integró la información digitalizada de los perfiles a escala 1: 250,000 y el vector de polígonos de suelos de INEGI (2005) 1: 50,000 esto para contar con mayor número de datos.

En total se procesaron 1,217 perfiles. Se modificaron los porcentajes de arena, arcilla y limo a 70 perfiles, con base en el triángulo de texturas de suelos, para que coincidieran con los rangos aceptados por SWAT.

Los horizontes de los perfiles se organizaron de menor a mayor tomando dos criterios; el primero el identificador del perfil, y el segundo, la profundidad de cada horizonte¹. Se verificó que la profundidad del último horizonte fuera igual o inferior a la profundidad total del perfil.

Relación entre perfiles y polígonos:

Como SWAT requiere la información de las características físicas del suelo para cada polígono fue necesario asignarle a cada polígono el perfil más cercano que tuviera la misma unidad de suelo, para esto se calcularon los centroides de los polígonos y mediante un cálculo de distancias en ArcInfo se determinó el perfil más cercano a cada polígono.

Entrada de información en SWAT:

Se generó una hoja de cálculo para verificar que la información obtenida de los perfiles estuviera dentro de los rangos aceptados por el modelo SWAT, posterior a esta verificación se integró la información.

1. La base de datos de suelos contiene la siguiente información sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos del estado:
2. Identificador del perfil
3. Número de horizontes
4. Clave del suelo (clasificación FAO68)
5. Profundidad del perfil (mm)
6. Color del suelo húmedo
7. Símbolo del horizonte

¹ NOTA: tener en orden los horizontes evita problemas al correr el modelo SWAT

8. Límite superior (mm)
9. Límite inferior (mm)
10. Porcentajes de arena limo y arcilla
11. Materia orgánica

Con esta información se calcularon valores de suelo requeridos por el modelo (Figura 18).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
	SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZM	ANION	E	SOL_CPK	TEXTURE	SOL_Z1	SOL_BDI	SOL_AVC	SOL_K1	SOL_CBN	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	SOL_ALB1	USLE_K1	SOL_EC1	SOL_EC2
1	EHA76_2	1	B	230				3	23	163	0.18	25.91	3.1	20	24	56		0.08	0.026		
2	EHA76_3	1	B	210				3	12	163	0.18	25.91	1.1	16	22	62		0.25	0.026		
3	EHA76_4	1	D	490				8	17	16	0.13	2.29	3.1	30	36	34		0.07	0.04		
4	EHA76_5	1	B	250				3	13	163	0.18	25.91	8.3	16	22	62		0.00	0.026		
5	EHA76_6	2	D	590				9	21	16	0.13	2.29	1.5	38	20	42		0.22	0.04		44
6	EHA76_7	1	B	110				4	11	16	0.15	13.21	4.0	29	36	36		0.04	0.02		
7	EHA76_8	1	C	480				9	14	16	0.12	4.32	1.9	26	26	48		0.17	0.04		
8	EHA76_9	2	D	980				12	28	14	0.11	0	3.1	40	28	32		0.08	0.007		66
9	EHA76_10	1	D	300				8	30	16	0.13	2.29	3.4	38	30	32		0.06	0.02		
10	EHA76_11	2	D	470				10	21	16	0.13	0	2.2	36	20	44		0.14	3		21
11	EHA76_12	2	C	880				9	14	16	0.12	4.32	1.3	24	22	54		0.25	0.079		88
12	EHA76_15	1	B	250				3	11	163	0.18	25.91	0.6	16	22	62		0.25	3		
13	EHA76_16	1	C	350				9	35	16	0.12	4.32	0.7	24	24	52		0.25	0.02		
14	EHA76_17	1	C	460				9	26	16	0.12	4.32	1.9	24	24	52		0.17	0.04		
15	EHA76_19	2	D	1000				12	35	14	0.11	0	0.9	42	20	38		0.25	0.026		60
16	EHA76_20	3	C	1000				9	19	16	0.12	4.32	1.6	32	20	48		0.21	0.079		77
17	EHA76_22	1	B	250				4	16	16	0.15	13.21	0.6	24	30	46		0.25	0.02		
18	EHA76_23	1	C	480				9	21	16	0.12	4.32	1.3	26	28	46		0.25	0.04		
19	EHA76_24	2	B	1000				4	14	16	0.15	13.21	2.2	24	44	32		0.14	0.02		48
20	EHA76_25	2	C	670				9	16	16	0.12	4.32	1.6	32	22	46		0.20	0.04		25
21	EHA76_26	3	B	1000				4	22	16	0.15	13.21	0.5	20	34	46		0.25	0.04		59
22	EHA76_27	1	B	310				3	31	163	0.18	25.91	1.9	14	12	74		0.17	0.026		
23	EHA76_30	1	D	480				8	30	16	0.13	2.29	2.2	34	38	28		0.14	0.04		
24	EHA76_31	1	B	270				3	27	163	0.18	25.91	0.7	20	20	60		0.25	0.026		
25	EHA76_32	1	B	1000				4	19	16	0.15	13.21	2.4	22	34	44		0.12	0.02		
26	EHA76_33	3	C	1000				9	16	16	0.12	4.32	1.0	32	16	52		0.25	0.04		41
27	EHA76_34	1	C	350				9	35	16	0.12	4.32	0.9	30	22	48		0.25	0.04		
28	EHA76_35	1	C	320				9	15	16	0.12	4.32	3.2	26	24	50		0.07	0.04		
29	EHA76_36	1	B	450				4	30	16	0.15	13.21	0.7	28	34	38		0.25	0.04		
30	EHA76_37	1	B	500				4	19	16	0.15	13.21	0.3	24	38	38		0.25	0.04		
31	EHA76_38	1	C	440				9	13	16	0.12	4.32	1.4	24	26	50		0.24	0.04		
32	EHA76_39	1	D	1000				9	19	16	0.13	2.29	2.5	32	44	24		0.12	0.04		
33	EHA76_40	3	D	1000				12	23	14	0.11	0	1.6	40	26	34		0.21	0.026		79
34	EHA76_41	2	C	760				9	28	16	0.12	4.32	0.5	26	18	56		0.25	0.04		56
35	EHA76_42	1	C	400				9	16	16	0.12	4.32	2.0	30	20	50		0.16	0.04		
36	EHA76_43	3	B	1000				4	23	16	0.15	13.21	1.1	24	38	38		0.25	0.04		33
37	EHA76_44	2	C	490				9	15	16	0.12	4.32	1.3	24	28	48		0.25	0.04		49
38	EHA76_47	1	C	460				9	17	16	0.12	4.32	0.7	26	28	46		0.25	0.04		

FIGURA 18: Base de datos de suelos

3.2 Ejecución de SWAT

Con la información generada y almacenada en la base de datos denominada SWATMEX se procesó la información según el manual de SWAT (Figura 19).

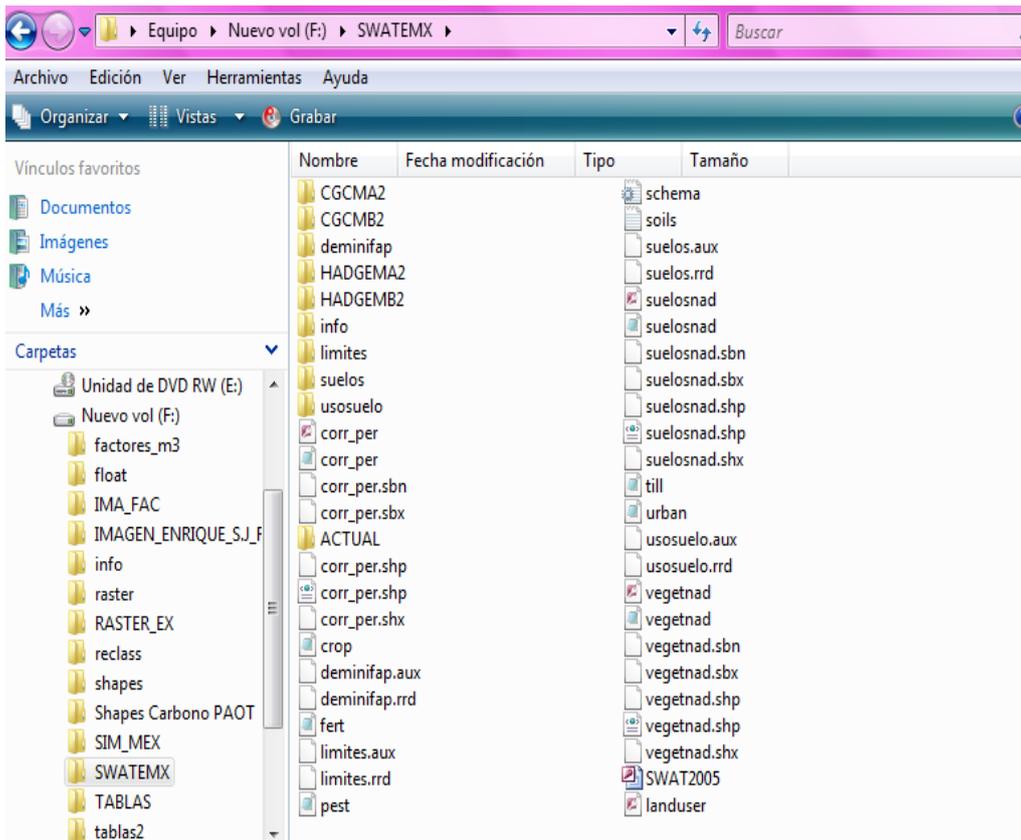


Figura 19: Estructura del directorio de SWAT

3.2.1 Crear un proyecto

Se creó un archivo que contiene enlaces a los datos e incorpora todas las funciones de los SIG contenidas en un archivo denominado "proyecto". El proyecto contiene una liga a la interfaz gráfica para el usuario que incluye menús, botones y herramientas. Los principales pasos seguidos para la creación de un proyecto son los siguientes:

Una vez activada la extensión ArcSWAT, la interfaz principal se puso en marcha, se nombró el proyecto, se asignó el directorio de trabajo además de estructuras de geodatabases, que fueron creadas anteriormente (Figura 20).

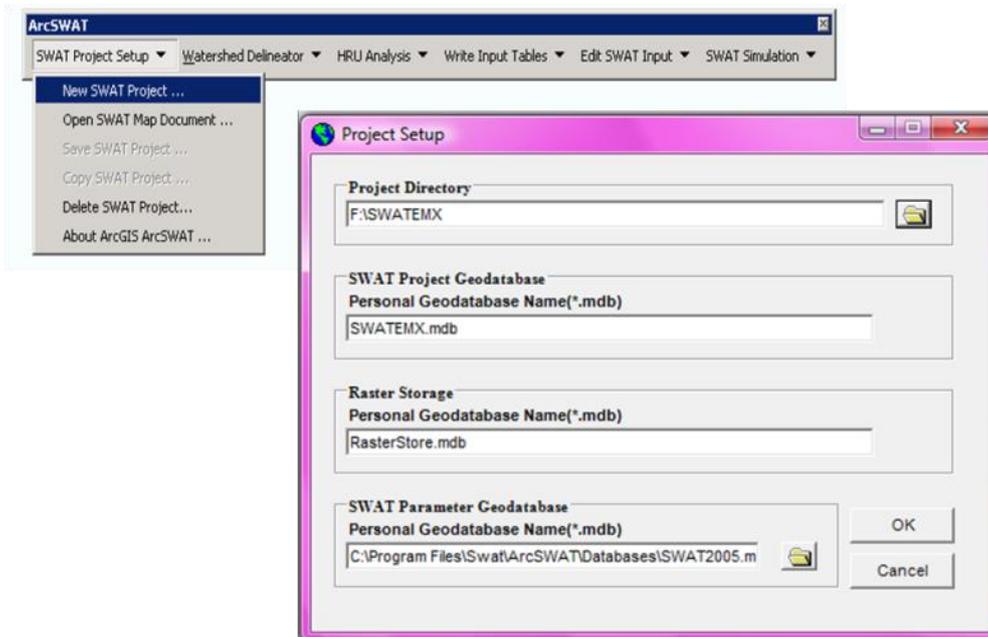


FIGURA 20: Proyecto nuevo de SWAT y directorio de trabajo

3.2.2 Delineación de una cuenca y subcuencas

Después de la configuración de un proyecto, se activó el botón del delineador de cuencas, las funciones de esta herramienta se dividen en cinco partes, a través de las cuales se definieron las cuencas y subcuencas automáticamente usando y combinando el DEM, la red hidrológica y la máscara que definió los límites, el modelo delineó las cuencas y calculó la dirección y acumulación de las corrientes de agua.

Esta herramienta comprobó la información de la proyección del DEM y permitió comprobar que las propiedades de este son correctas e hizo los cambios necesarios en cada subcuenca, tales como pendientes, elevaciones máximas, mínimas y promedios.

Las cuencas y subcuencas fueron delineadas seleccionando la opción basada en el DEM. Las subcuencas están definidas en un área de 3, 000 hectáreas, es decir el área mínima que tiene que cubrir una corriente para delimitar una cuenca.

Esta función fue importante porque determinó los detalles de la red hidrológica y el tamaño y número de subcuencas que se crearon. Por último, se estimaron características básicas de la cuenca y subcuencas y por ende asignó un identificador para cada subcuenca (Figura 21).

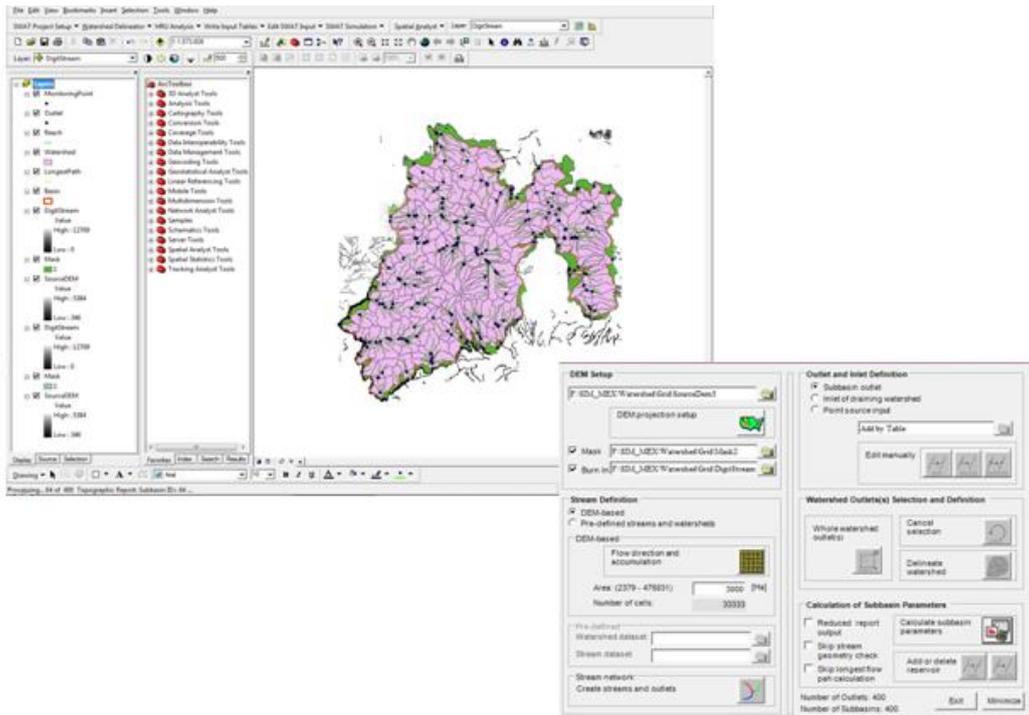


FIGURA 21: Delineación de cuenca.

3.2.3 Unidades de Respuesta Hidrológica.

Las subcuencas se dividen en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés) que presentan homogeneidad en cuanto a los tipos de suelo, los usos y coberturas vegetales y la pendiente del territorio, de manera que cada subcuenca posee al menos una HRU. La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en la evapotranspiración para varios tipos de suelo y vegetación. La escorrentía se determina separadamente para cada HRU y es canalizada en función del modelo digital de elevación para obtener el total de la cuenca. Esto aporta una mayor precisión en la descripción física del balance de agua (Figura 22).

Esta opción permitió especificar el uso del suelo y las pendientes que fueron necesarios para el modelado, para determinar las HRU distribuidas en cada una de las subcuencas. Para las pendientes fueron consideradas dos clases de 0 – 10% y >10%.

La información generada hasta este proceso, sirvió como base para la simulación hidrológica de todos los escenarios.

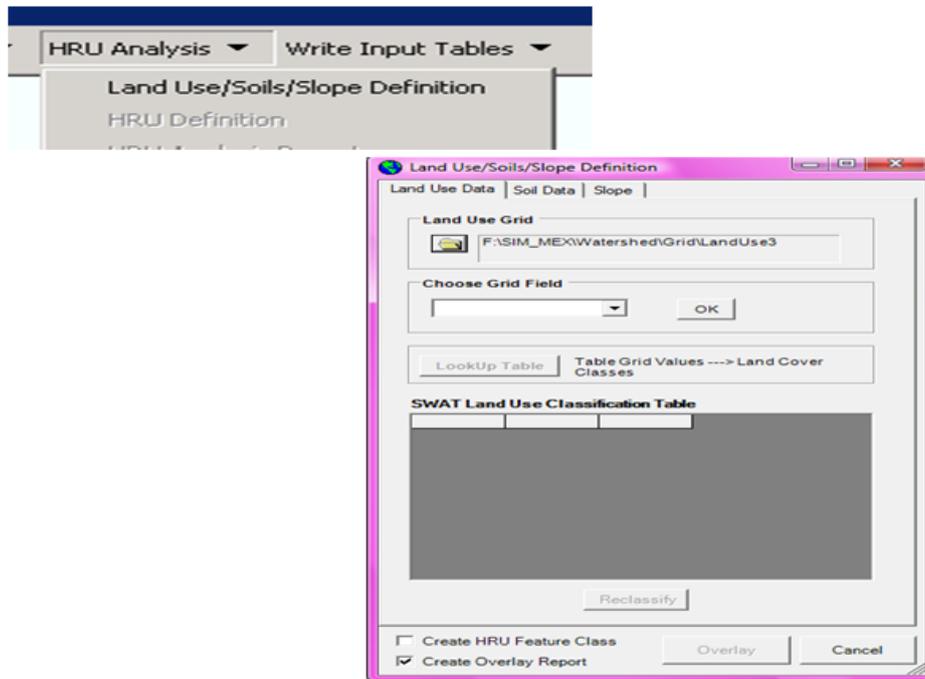


FIGURA 22: Definición de HRU

3.2.4 Generador de bases de datos climáticos y archivos de entrada.

En este menú se ligaron las bases de datos de estadísticos y datos diarios. Por medio de estas tablas SWAT alimentó al generador climático para simular el comportamiento del clima en cada subcuenca (Figura 23).

Se ingresó la información de los estadísticos de cinco escenarios y únicamente para el escenario base (2008) se ingresaron datos diarios de temperatura y precipitación.

Si no existen datos diarios, el modelo los simula basándose en la información de los datos estadísticos.

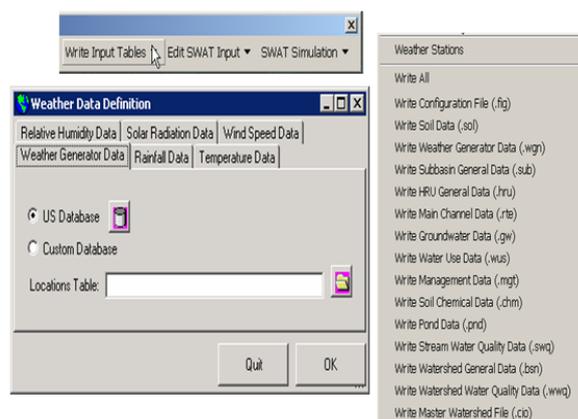


FIGURA 23: Menú del Generador de bases de datos.

3.2.5 Edición de bases de datos de SWAT

Después de ligar la información de los estadísticos y los datos diarios, se editaron las bases de datos generadas, donde se contienen los datos necesarios para la modelización de los suelos, de los usos y coberturas vegetales, entre otros; con la finalidad de realizar los cambios que sean necesarios para la simulación hidrológica. Finalmente, el programa crea una base de datos con todos los parámetros necesarios para la modelización de cada HRU (Figura 24).

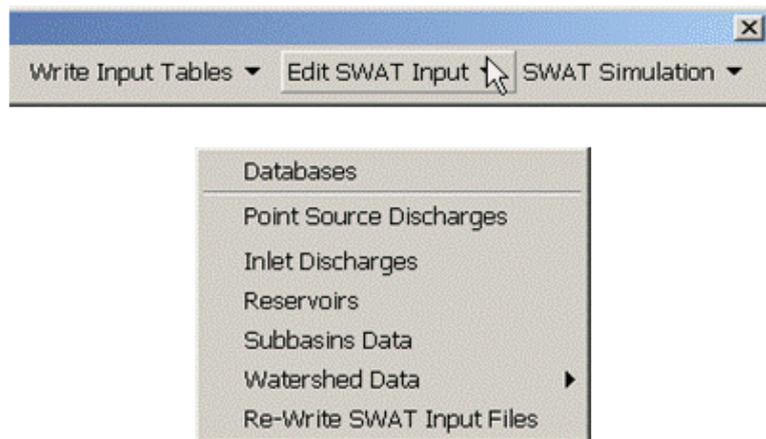


FIGURA 24: Menú Edición de bases de datos de SWAT

3.2.6 Simulación de SWAT

El modelo permite seleccionar el periodo de simulación. Las simulaciones para este estudio se realizaron en periodos de un año.

El tipo de distribución empleado para estimar los datos faltantes de precipitación fue exponencial empleando los factores predeterminados en el modelo y que de acuerdo al manual de usuario funcionan en la mayoría de los casos, la frecuencia de salida de resultados fue mensual.

Se realizaron simulaciones para el escenario base (2008) y para los escenarios A2 Y B2 del modelo CGCM.

3.3 Salida de datos

SWAT exporta los resultados de cada simulación a tablas con formato MDB (Microsoft Data Base), de esta manera se pueden exportar los factores necesarios para calcular el balance hídrico.

Los factores componentes del balance hídrico que se extrajeron de cada base de datos fueron:

PRECIP: Precipitación total (mm).

ET: Evapotranspiración real. durante el paso de tiempo (mm).

PERC: Percolación. Agua que se filtra más allá de la zona de la raíz durante el paso. Recarga de acuíferos (mm).

SURQ: Escorrentía. Contribución de los escurrimientos superficiales al flujo de la corriente con el paso del tiempo (mm).

GW_Q: Flujo de retorno. Cantidad total de agua que entra en los acuíferos superficiales y profundos durante el paso del tiempo (mm).

3.4 Procesamiento de datos

Los resultados de los componentes del balance hídrico se obtuvieron a nivel de subcuenca, a través de datos de salida mensuales.

El modelo generó una cuenca y 501 subcuencas dentro del Estado de México, tomando como referencia características naturales y no límites políticos, por lo cual los datos necesarios para generar el balance hídrico no cubrían toda la superficie del Estado. Para solucionar este problema se generaron extrapolaciones de las subcuencas, con el programa ArcInfo, para rellenar las partes faltantes y obtener datos para todo el Estado (Figura 25).

3.5 Cálculo del Balance Hídrico

Una vez que los datos de los factores necesarios para el balance hídrico cubrían todo el estado, se convirtieron a metros cúbicos (m^3), con la finalidad de obtener unidades de volumen.

Se convirtieron los milímetros (unidades de salida de los datos) a metros y se multiplicó por el área de cada pixel cuadrado equivalente a 900, para obtener metros cúbicos (m^3).

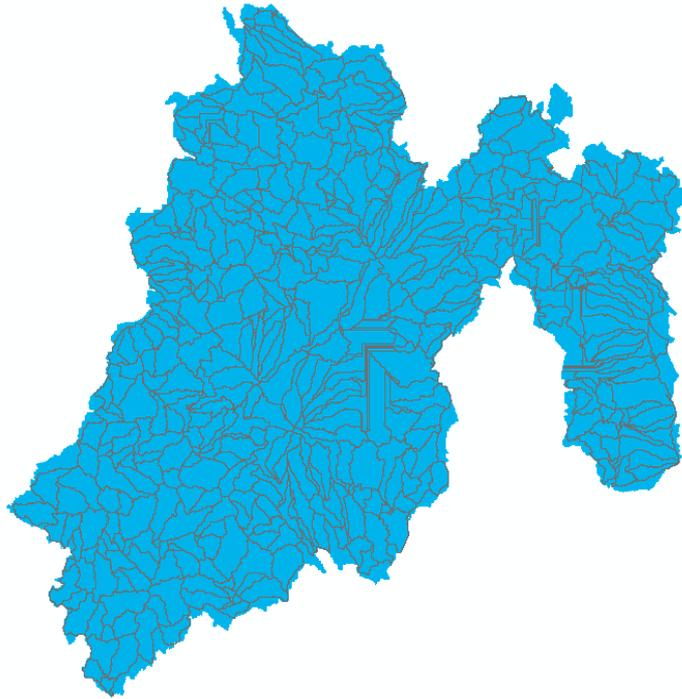


FIGURA 25: Subcuencas generadas por SWAT

Con los resultados en metros cúbicos se aplicó la siguiente fórmula para calcular el balance hídrico, con la herramienta *raster calculator* de ArcGis:

$$\Delta S = P + R + B - F - ET$$

Donde:

ΔS es el balance hídrico

P es la precipitación

R es la escorrentía

B es el flujo de retorno

F es la infiltración

ET es la evapotranspiración real

3.6 Presentación del Balance Hídrico

Se generaron capas de los balances hídricos de las subcuencas en el Estado de México, estas capas se reclasificaron y se utilizaron cinco rangos para hacer comparaciones.

CLASE	RANGO m ³
1	-553 - 1005
2	1005 - 2564
3	2564 - 4123
4	4123 - 5683
5	5683 - 7242

TABLA 3: Rangos del Balance Hídrico

4.0 RESULTADOS

De acuerdo con la simulación realizada con el modelo SWAT, se muestran los siguientes resultados, cabe especificar que están divididos en resultados globales, es decir, para toda la cuenca y por otro lado a nivel de las subcuencas generadas por el modelo.

Después de analizar el comportamiento de las distintas fases del ciclo hidrológico en los escenarios base (2008), y futuros (2030 y 2050), se compararon cuantitativamente los resultados de los escenarios, con el fin de apreciar en su conjunto la variación de los elementos del balance hídrico.

4.1 Precipitación

4.1.1 Precipitación escenario base (2008)

La precipitación total obtenida para este escenario fue de 21, 733, 127,745.46 m³.

El rango mínimo de precipitación en el Estado está distribuido en toda la superficie.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
519 -1361	17138	77
1361 - 2203	5182	23
2203 - 3044	0	0
3044 - 3866	0	0
3866 - 4728	0	0

TABLA 4: Porcentaje y superficie de la distribución de la precipitación para el escenario base (2008)

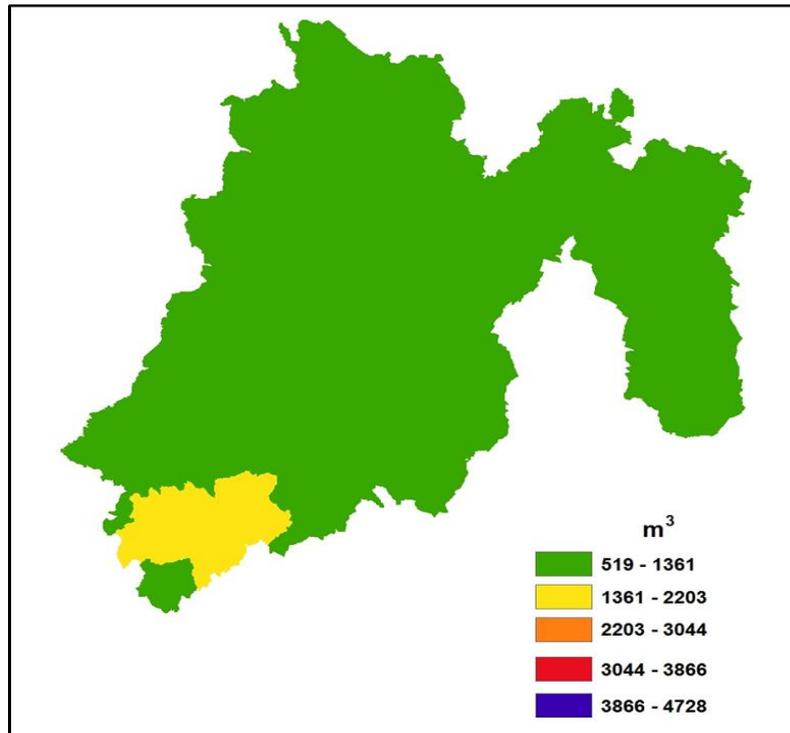


FIGURA 26: Distribución de la precipitación, escenario base (2008).

La distribución superficial para el escenario base (2008) de la precipitación mostro que el mayor porcentaje de precipitación está distribuido en la zona suroeste del Estado (correspondiente a los municipios de Tlatlaya, Amatepec, Sultepec y Tejupilco) con valores de 1361 m³ a 2203 m³ equivalente al 23% (5182 km²) de la superficie del territorio: El resto del Estado 77% (17,138 km²) tuvo una precipitación con valores de 519 m³ a 1,361 m³. (Figura 26; Tabla 4).

4.1.2 Precipitación escenario CGCM A2 año 2030

La figura 27 muestra la variabilidad espacial de la precipitación, que fue proyectada para el año 2030 con el modelo CGCM para el escenario A2. El total de la precipitación calculada para este escenario fue de 34, 471, 624,351.26 m³.

Se estimó que la precipitación para el año 2030 en el estado aumentaría en 58.6% respecto al escenario base (2008).

En el estado el rango mínimo de precipitación fue distribuido en toda la superficie.

El rango con valores máximos se concentró en parte de los municipios: Tlatlaya, Amatepec, Sultepec y Tejupilco.

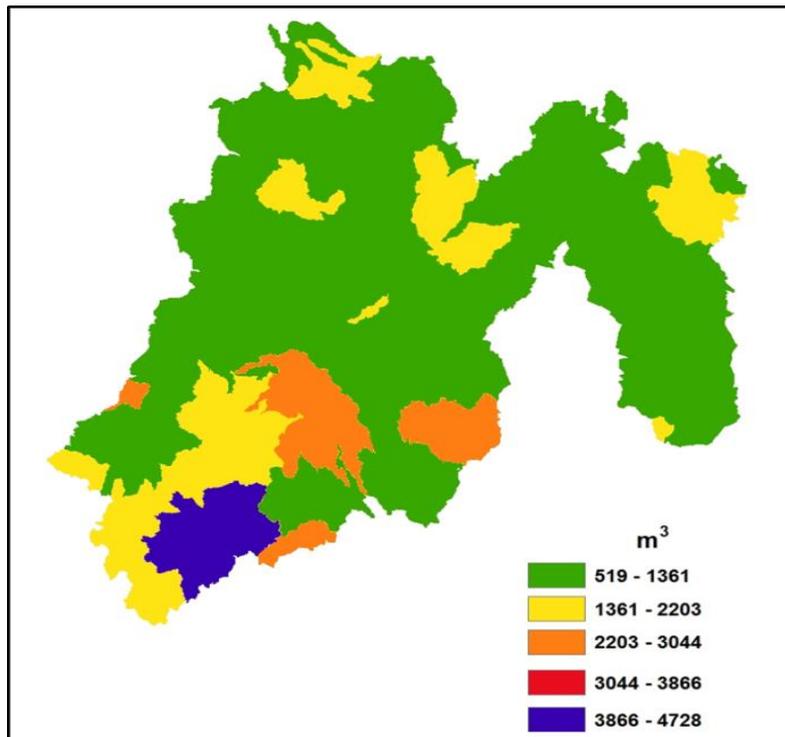


FIGURA 27: Distribución de la precipitación, escenario CGCM A2 año 2030.

Como se observa para este escenario la distribución superficial de la precipitación presentó fuertes cambios, el 70% del territorio del Estado (15,698 km²) con valores de 519 a 1,361 m³, el rango de valores de 1,361 a 2,203 m³ corresponde al 18% (3948 km²) distribuido en todo el territorio, el 8% del estado (1698 km²) tiene valores de 2,203 a 3,044 m³ y el 4% (977 km²) de 3,866 a 4,728 m³ correspondiente a la parte baja de la Sierra Madre Oriental (Figura 27, Tabla 5).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
519 - 1361	15698	70
1361 - 2203	3948	18
2203 - 3044	1698	8
3044 - 3866	0	0
3866 - 4728	977	4

TABLA 5: Porcentaje y superficie de la distribución de la precipitación para el escenario CGCM A2 año 2030

4.1.3 Precipitación Escenario CGCM A2 año 2050

La figura 28 muestra la proyección de precipitación del escenario A2 para el año 2050 con el modelo CGCM, el total de la precipitación que se obtuvo para este escenario fue 34, 757, 187,093.14 m³. La precipitación presentó el 59.9 % de aumento respecto al escenario base (2008). En el estado el rango mínimo de precipitación fue distribuido en toda la superficie.

El rango con valores máximos se concentró en parte de los siguientes municipios Amatepec, Tlatlaya, Sultepec y Tejupilco.

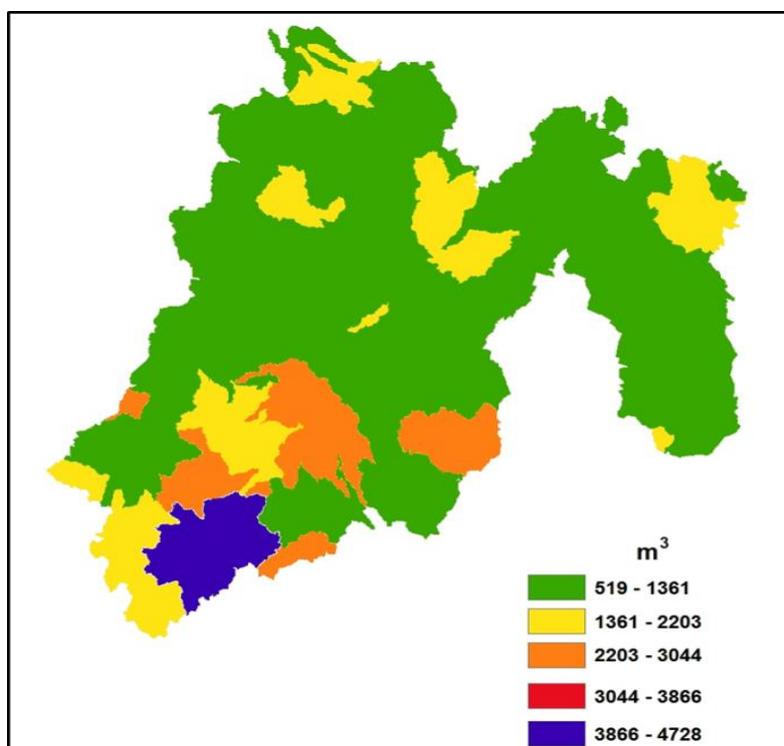


FIGURA 28: Distribución de la precipitación, escenario CGCM A2 año 2050.

Para este escenario, las precipitaciones más bajas con valores de 519 a 1,361 m³ corresponden al 70% del territorio estatal (15,698 km²), el rango de 1,361 a 2,203 m³ corresponde al 16% (3,520 km²), el 10% (2,125 km²) al rango de 2,203 a 3,044 m³, mientras que el 4% (977 km²) restante presenta valores de 3,866 a 4,728 m³ (Figura 28, Tabla 6).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
519 - 1361	15698	70
1361 - 2203	3520	16
2203 - 3044	2125	10
3044 - 3866	0	0
3866 - 4728	977	4

TABLA 6: Porcentaje y superficie de la distribución de la precipitación para el escenario CGCM A2 año 2050

4.1.4 Precipitación Escenario CGCM B2 año 2030

Para el escenario futuro B2 el total de la precipitación, que se proyectó para el año 2030 por el modelo CGCM (Figura 29) fue de 33, 897, 586, 799.65 m³.

La precipitación para este escenario aumentó 56% comparado con el escenario base (2008).

En el estado el rango mínimo de precipitación está distribuido en toda la superficie.

El rango máximo de precipitación se ubicó en Amatepec, Sultepec, Tejuzilco y Tlatlaya.

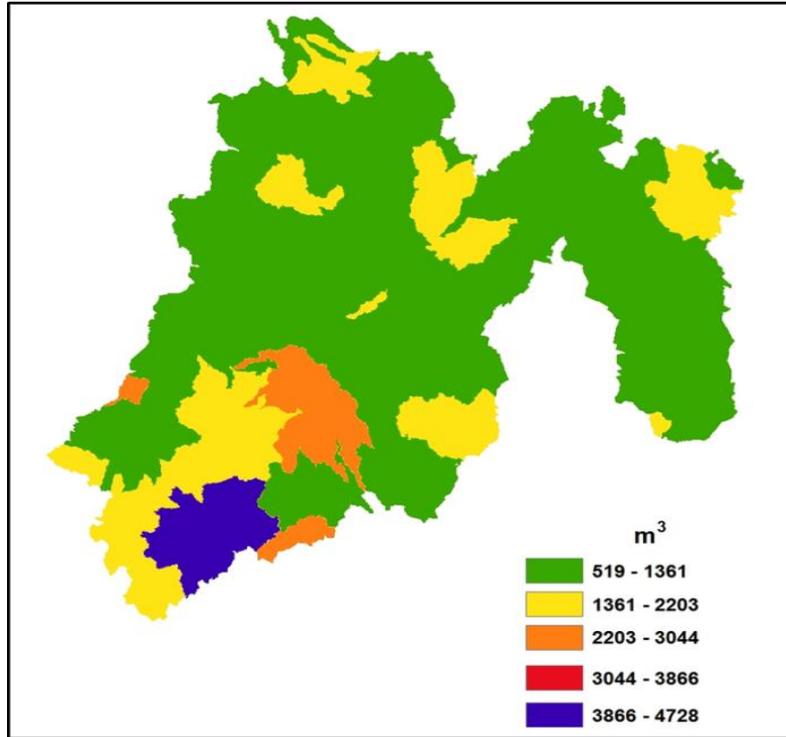


FIGURA 29: Distribución de la precipitación, escenario CGCM B2 año 2030.

En la tabla 7 se muestra la variabilidad de la precipitación, el 70% de la superficie del estado (15,698 km²) presentó valores de 519 a 1,361 m³, el 20% de la superficie (4,476 km²) presentó valores de 1,361 a 2,203 m³, el 5% (1,169 km²) tiene valores de 2,203 a 3,044 m³ y el 4% (977km²) con valores de 3,866 a 4,728 m³ (Figura 29, Tabla 7).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
519 -1361	15698	70
1361 - 2203	4476	20
2203 - 3044	1169	5
3044 - 3866	0	0
3866 - 4728	977	4

TABLA 7: Porcentaje y superficie de la distribución de la precipitación para el escenario CGCM B2 año 2030

4.1.5 Precipitación CGCM B2 año 2050

En la figura 30 se muestra el escenario B2 de precipitación para el año 2050, según el modelo CGCM, el total de la precipitación calculada para este escenario fue de 34, 156, 373,951.53 m³.

Se puede observar un aumento del 57.2% comparándolo con el escenario base (2008).

En el estado el rango mínimo de precipitación está distribuido en toda la superficie.

Con respecto a las zonas con el rango de valores máximos de precipitación presentes en parte de los municipios de Amatepec, Sultepec, Tejuzilco y Tlatlaya.

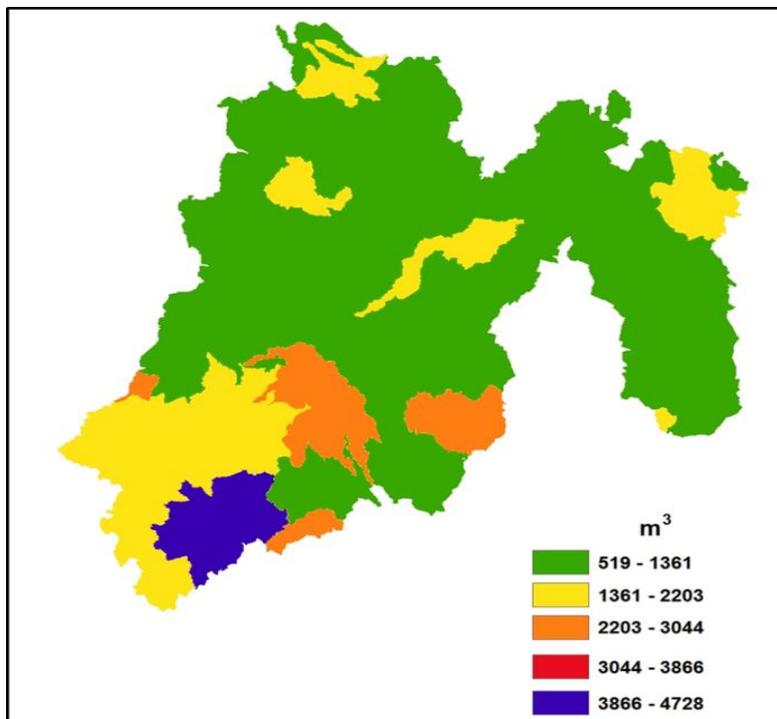


FIGURA 30: Distribución de la precipitación, escenario CGCM B2 año 2050

En la tabla 8 se puede observar la distribución de la precipitación, el 68% (15,152 km²) de la superficie estatal tiene valores entre 519 y 1,361 m³, el 20% (4,393 km²) de 1,361 a 2,203 m³, el 8% (1,698 km²) de 2203 a 3,044 m³, mientras que el 4% restante presenta valores de 3,866 a 4,728 m³ (Figura 30, Tabla 8).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
519 - 1361	15252	68
1361 - 2203	4393	20
2203 - 3044	1698	8
3044 - 3866	0	0
3866 - 4728	977	4

TABLA 8: Porcentaje y superficie de la distribución de la precipitación para el escenario CGCM B2 año 2050

La distribución de la precipitación de cada escenario mostró que no es uniforme, existe un cambio entre los escenarios comparados con el actual, sin embargo, presentó condiciones similares en los escenarios proyectados (Figura 31).

El aumento de la precipitación no se presentó en toda la superficie del Estado, el mayor incremento se observó en el sureste, correspondiente a los municipios de Sultepec, Zacualpan, Almoloya de Alquisiras, Tonatico, Ixtapan y Coatepec de Harinas.

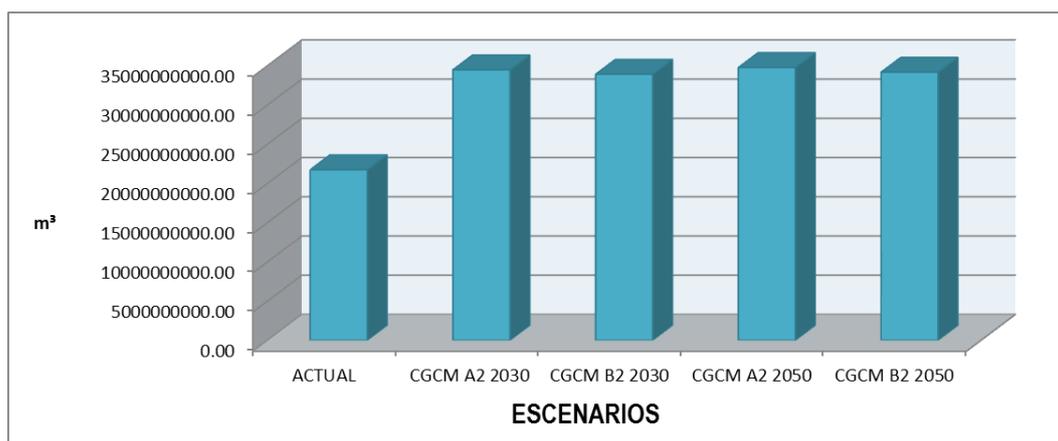


FIGURA 31: Comparación de los escenarios de precipitación.

4.2 Escorrentía

4.2.1 Escorrentía escenario base (2008)

La figura 32 muestra la proyección del escenario base (2008) con el modelo CGCM. La escorrentía total que se obtuvo en el estado para este escenario es de 2,379,987,321.87 m³.

El rango mínimo de escorrentía predomina en la mayor parte del territorio del Estado.

La zona que presentó la mayor cantidad de escorrentía se ubica en la parte suroeste del Estado, correspondiente al municipio de Sultepec.

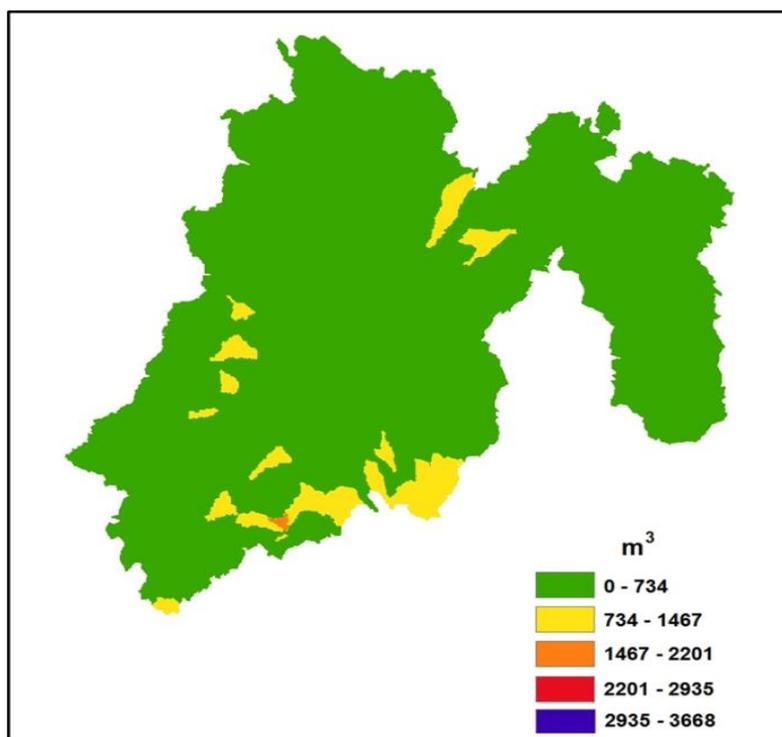


FIGURA 32: Distribución del escurrimiento, escenario base (2008).

La distribución de la escorrentía mostró que el 94.4% (21,063 km²) de la superficie estatal presentó un escurrimiento con valores de 0 a 734 m³, mientras que el 5.5% (1,238 km²) restante presentó valores de 734 a 1,467 m³ (Figura 32, Tabla 9).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 734	21063	94.4
734 - 1467	1238	5.5
1467 - 2201	19	0.1
2201 - 2935	0	0
2935 - 3668	0	0

TABLA 9: Porcentaje y superficie de la distribución de la escorrentía para el escenario base (2008)

4.2.2 Escorrentía escenario CGCM A2 año 2030

Para el escenario futuro A2, la escorrentía proyectada para el año 2030 por el modelo CGCM (Figura 33) fue de 3, 913, 127, 944.29 m³.

La escorrentía para el año 2030 en el Estado aumentó el 64.4% respecto al escenario base (2008).

En el estado el rango mínimo de escorrentía está distribuido en toda la superficie.

El rango con valores máximos se concentró en los municipios Sultepec y Amatepec.

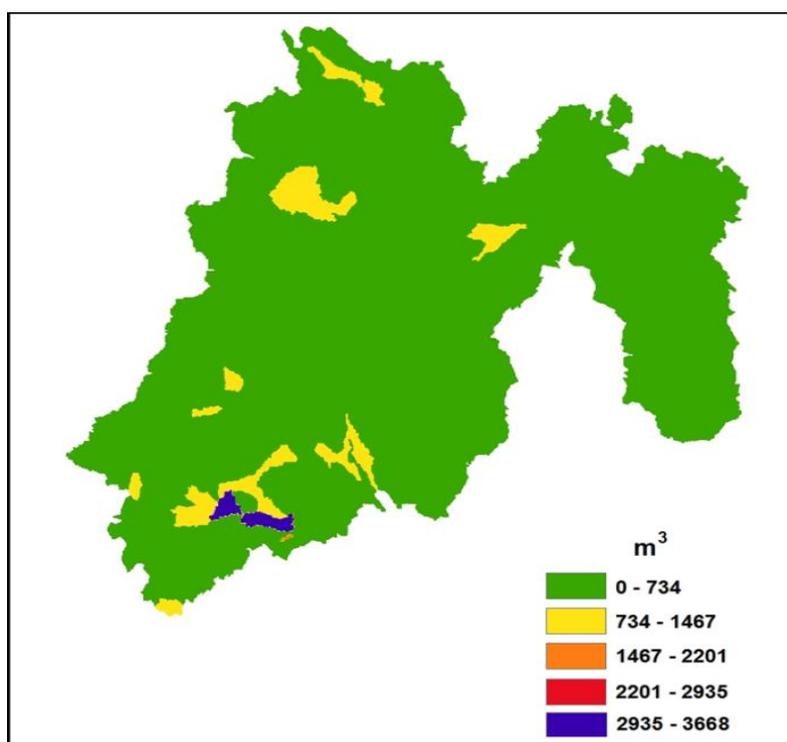


FIGURA 33: Distribución del escurrimiento, escenario CGCM A2 año 2030

En la tabla 10 se puede observar la distribución de la escurrimiento, mostrando que el 94.8 % de la superficie equivalente a 21,167 km² tiene valores de 0 a 734 m³, el 4.6 % (1,018 km²) tiene valores de 734 a 1,467 m³, el 0.6 % (132 km²) tiene valores de 2,935 a 3,668 m³, mientras que el 0.02% restante (4 km²) tiene valores de 1,467 a 2,201 m³.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 734	21167	94.8
734 - 1467	1018	4.6
1467 - 2201	4	0.02
2201 - 2935	0	0
2935 - 3668	132	0.6

TABLA 10: Porcentaje y superficie de la distribución de la escurrimiento para el escenario CGCM A2 año 2030.

4.2.3 Escurrimiento escenario CGCM A2 año 2050

En la figura 34 se muestra el escenario A2 de escurrimiento para el año 2050, según el modelo CGCM. El total calculado para este escenario fue de 4,146,037,521.26 m³.

La escurrimiento presentó el 74.2 % de aumento respecto al escenario base (2008).

En el estado el rango mínimo de escorrentía está distribuido en toda la superficie.

El rango con valores máximos se concentró en Amatepec y Sultepec.

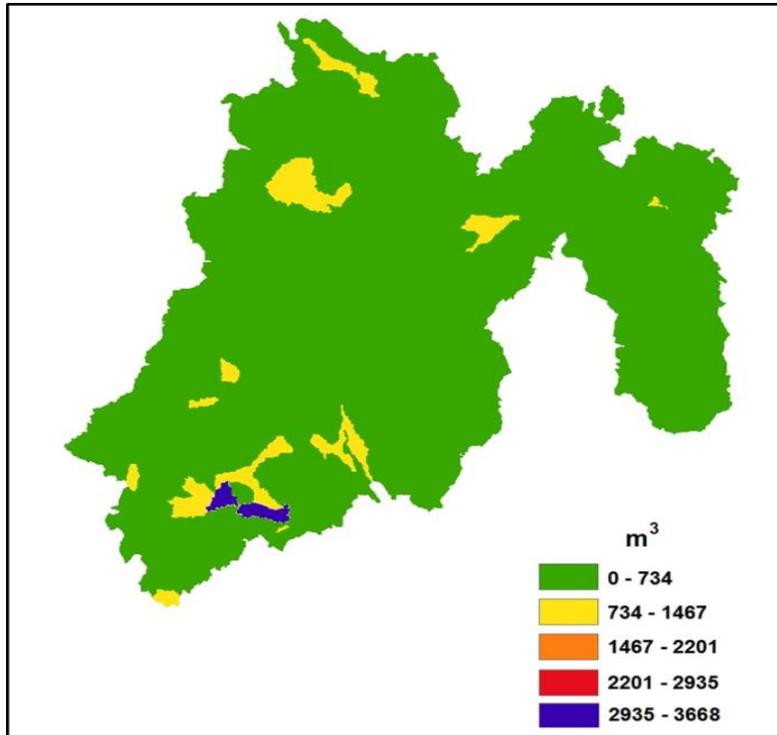


FIGURA 34: Distribución del escurrimiento, escenario CGCM A2 año 2050

Para este escenario la distribución de la escorrentía mostro que el 95% (21,152 km²) tiene valores de 0 a 734 m³, el 5% que equivale a 1,030 km² tiene valores de 734 a 1,467 m³ y el 1% restante (132 km²) tiene valores de 2,935 a 3,668 m³ (Figura 34, Tabla 11).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 734	21158	95
734 - 1467	1030	5
1467 - 2201	0	0
2201 - 2935	0	0
2935 - 3668	132	1

TABLA 11: Porcentaje y superficie de la distribución de la escorrentía para el escenario CGCM A2 año 2050

4.2.4 Escorrentía escenario CGCM B2 año 2030

La figura 35 muestra la variabilidad espacial de la escorrentía, proyectado para el año 2030 con el modelo CGCM para el escenario B2, el total calculado para este escenario fue de 3, 749, 234, 488.97 m³.

La escorrentía para el año 2030 en el Estado aumentó el 57.5% respecto al escenario base (2008). En el estado el rango mínimo de escurrimiento está distribuido en toda la superficie.

El rango máximo de escorrentía está distribuido en parte de los municipios de Amatepec y Sultepec.

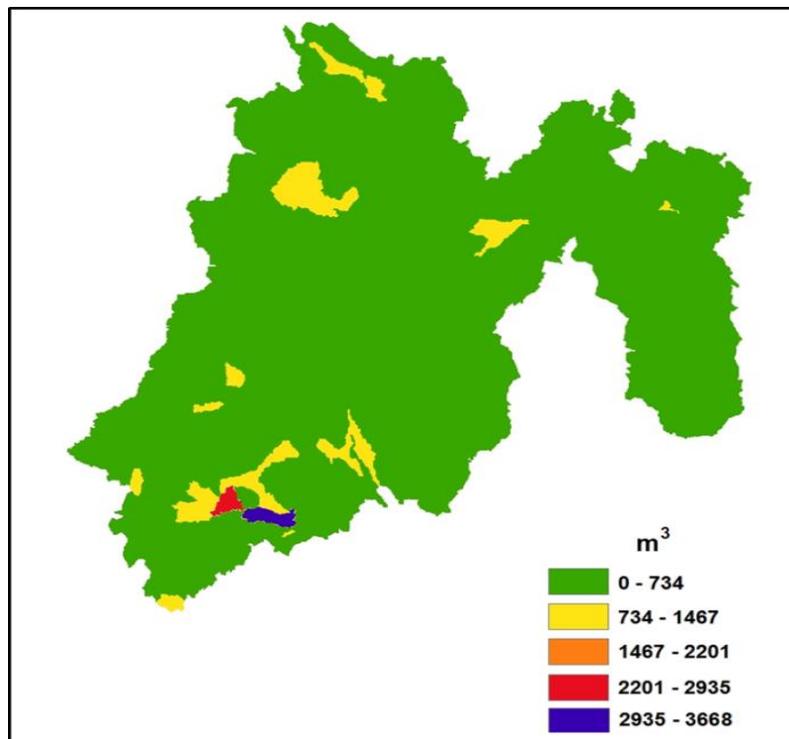


FIGURA 35: Distribución del escurrimiento, escenario CGCM B2 año 2030

Para este escenario la distribución de la escorrentía mostró que el 94.8% (21,158 km²) tiene valores de 0 a 734 m³, el 4.5% que equivale a 1,030 km² tiene valores de 734 a 1467 m³, el 0.3% (76 km²) tiene valores de 2,935 a 3,668 m³ y el 0.3% restante tiene valores de 2201 a 2935 m³, con superficie de 56 km² (Figura 35, Tabla12).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 734	21158	94.8
734 - 1467	1030	4.6
1467 - 2201	0	0
2201 - 2935	56	0.3
2935 - 3668	76	0.3

TABLA 12: Porcentaje y superficie de la distribución de la escorrentía para el escenario CGCM B2 año 2030

4.2.5 Escorrentía escenario CGCM B2 año 2050

Para el escenario futuro B2 la escorrentía, proyectado para el año 2050 por el modelo CGCM fue de 3, 812, 615,876.17 m³ (Figura 36).

La escorrentía presentó un 60.2 % de aumento respecto al escenario base (2008).

En el estado el rango mínimo de escorrentía está distribuido en toda la superficie.

Con respecto a las zonas con el rango de valores máximos de escorrentía estas se presentaron en parte de los municipios de Sultepec y Amatepec.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 734	21158	94.8
734 - 1467	1026	4.6
1467 - 2201	4	0.02
2201 - 2935	0	0
2935 - 3668	132	0.6

TABLA 13: Porcentaje y superficie de la distribución de la escorrentía para el escenario CGCM B2 año 2050

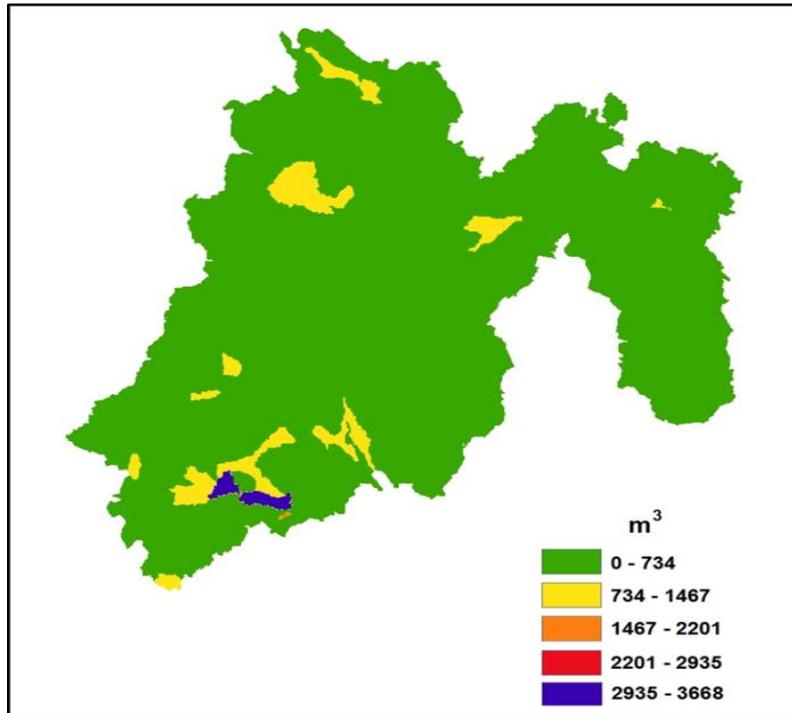


FIGURA 36: Distribución del escurrimiento, escenario CGCM B2 año 2050

En la tabla 13 se puede observar la distribución de la escorrentía, el 94.8% (21,158 km²) de la superficie estatal tiene valores entre 0 y 734 m³, el 4.6% (1,026km²) de 734 a 1467 m³, el 0.6% (132 km²) de 2,935 a 3,668 m³, mientras que el 0.02 % (4 km²) restante presenta valores de 1,467 a 3,668 m³.

La escorrentía en los escenarios futuros presentó un incremento respecto al escenario base (2008), esto significa que aumentó el volumen de agua escurriendo (Figura 37).

El escenario A2 para el año 2050 presentó el mayor volumen calculado y el escenario B2 para el año 2030 obtuvo el menor volumen de escorrentía, lo que significa que el escurrimiento incrementó.

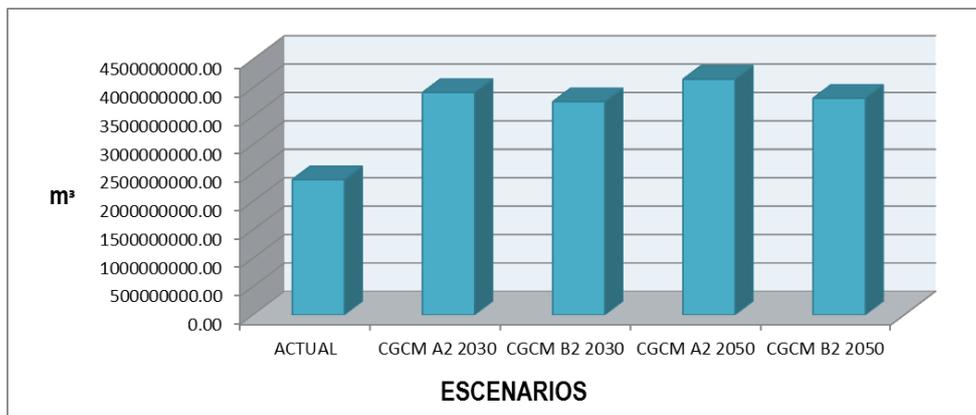


FIGURA 37: Comparación de los escenarios del escurrimiento.

4.3 Flujo de Retorno

4.3.1 Flujo de Retorno escenario base (2008)

La figura 38 muestra la variabilidad espacial del flujo de retorno, para el escenario base (2008). El total calculado para este escenario fue de 2,081,951,328.70 m³.

En el estado el rango mínimo de volumen de flujo de retorno está distribuido en toda la superficie.

Con respecto a las zonas con el rango de valores máximo está distribuido en partes de los municipios de Valle de Bravo, Sultepec y Amatepec.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 448	20229	91
448 - 976	1592	7
976 - 1464	499	2
1464 - 1952	0	0
1952 - 2240	0	0

TABLA 14: Porcentaje y superficie de la distribución del flujo de retorno para el escenario base (2008)

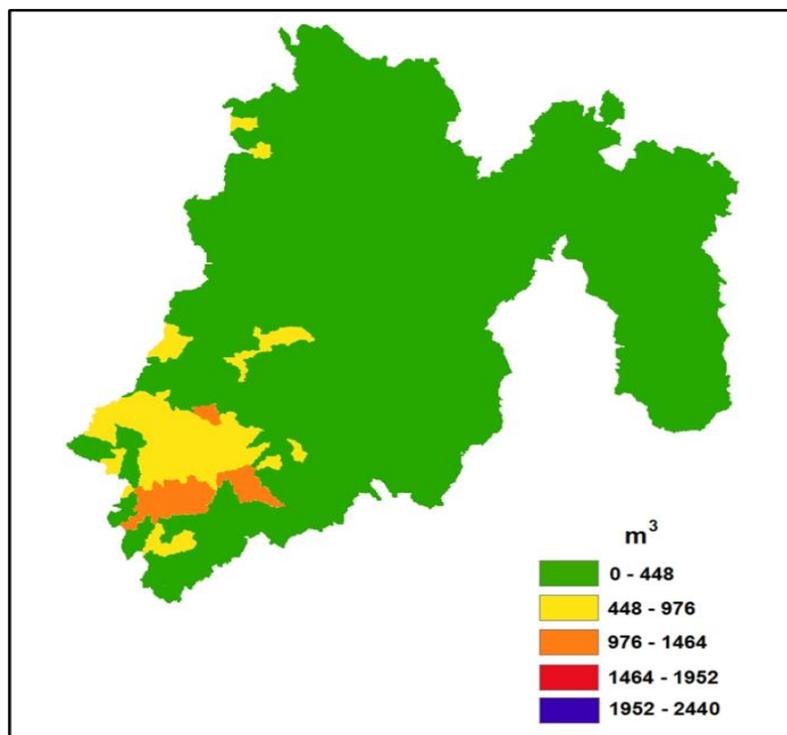


FIGURA 38: Distribución del flujo de retorno, escenario base (2008)

Como se observa la distribución espacial del flujo de retorno en 20,229 km², 91% del territorio del Estado, principalmente en el este, presenta valores en el rango de 0 a 448 m³, el 7% de la

superficie estatal equivalente a 1,592 km² con un rango de 448 a 976 m³ principalmente en el oeste del Estado, mientras que el 2% restante de la superficie del Estado equivalente a 499 km² tiene el mayor rango de flujo de retorno de 976 m³ a 1464 m³ ubicado al suroeste (Figura 38, Tabla 6).

4.3.2 Flujo de Retorno escenario CGCM A2 año 2030

El flujo de retorno total obtenido para este escenario fue de 5, 962, 272, 551.74 m³ (Figura 37).

El flujo de retorno para el año 2030 en el Estado aumentó el 186.4% respecto al escenario base (2008).

En el estado el rango mínimo de volumen de flujo de retorno está distribuido en toda la superficie.

El rango con valores máximos se concentró en Sultepec, Tejupilco y Amatepec.

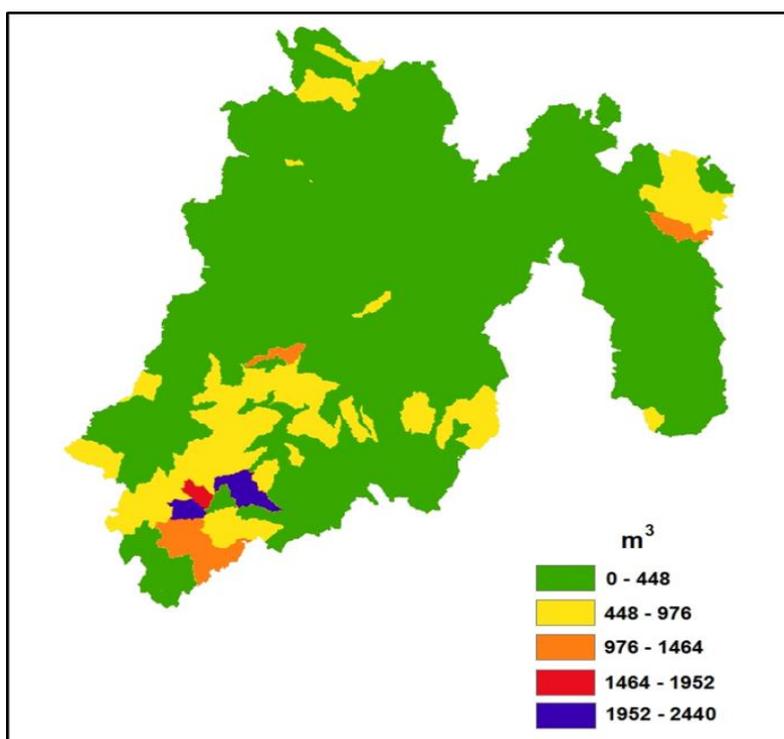


FIGURA 39: Distribución del flujo de retorno, escenario CGCM A2 año 2030

La distribución superficial para el escenario A2 del flujo de retorno mostró que el mayor porcentaje 82.2% (18,297 km²) tiene valores de 0 a 448 m³, el 14.7% (3,270 km²) tiene valores de 448 a 976 m³, el 2.2% (484 km²) con valores de 976 a 1464 m³, y el resto del Estado equivalente al 1% (214 km²) de la superficie tiene un flujo de retorno entre 1952 y 2440 m³ (Figura 39, Tabla 15).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 448	18297	82
448 - 976	3270	14.7
976 - 1464	484	2.2
1464 - 1952	55	0.2
1952 - 2240	214	1.0

TABLA 15: Porcentaje y superficie de la distribución del flujo de retorno para el escenario CGCM A2 año 2030

4.3.3 Flujo de Retorno escenario CGCM A2 año 2050

La figura 40 mostró variabilidad espacial del flujo de retorno, proyectado para el año 2050 con el modelo CGCM para el escenario A2. El total del flujo de retorno calculado para este escenario fue de 6, 108, 808, 984.45 m³.

El flujo de retorno para el año 2050 en el Estado aumentó el 193.4% respecto al escenario base (2008).

Los valores contenidos en el rango mínimo se distribuyen en toda la superficie estatal.

El rango con valores máximos se concentró en parte de los municipios Amatepec, Sultepec y Tejupilco.

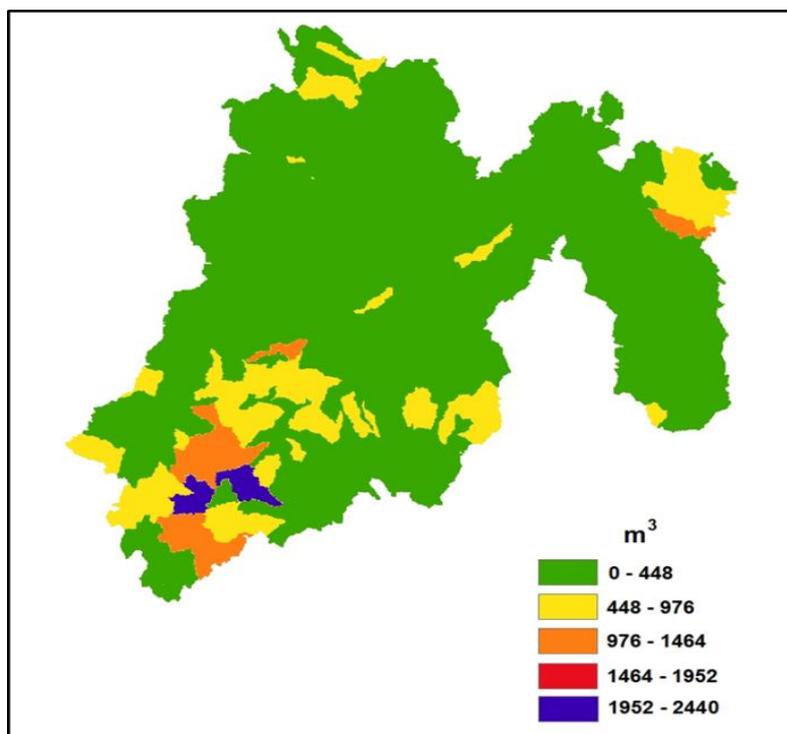


FIGURA 40: Distribución del flujo de retorno, escenario CGCM A2 año 2050.

Como se observa para este escenario la distribución superficial de flujo de retorno presentó fuertes cambios, el 82% del territorio del Estado (18,202 km²) presentó valores de 0 a 448 m³, el rango de valores de 448 a 976 m³ corresponde al 13% del territorio (2,965 km²), a nivel estatal el 4% (884 km²) tiene valores de 976 a 1,464 m³ y el 1% (269 km²) de 1,952 a 2,440 m³ (Tabla 16).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 448	18202	82
448 - 976	2965	13
976 - 1464	884	4
1464 - 1952	0	0
1952 - 2240	269	1.0

TABLA 16: Porcentaje y superficie de la distribución del flujo de retorno para el escenario CGCM A2 año 2050

4.3.4 Flujo de Retorno escenario CGCM B2 año 2030

La figura 41 muestra la proyección del escenario B2 de flujo de retorno para el año 2030 con el modelo CGCM, el total del flujo de retorno para este escenario fue de 5, 854, 955, 959.86 m³.

El flujo de retorno presentó un 181.2 % de aumento respecto al escenario base (2008).

En el estado las zonas con el rango de valores mínimo de flujo de retorno se encuentran distribuidas en toda la superficie estatal.

El rango máximo de flujo de retorno cubre parte de los municipios de Amatepec, Tejupilco y Sultepec.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 448	18201	81.5
448 - 976	3457	15.5
976 - 1464	393	1.8
1464 - 1952	92	0.4
1952 - 2240	177	0.8

TABLA 17: Porcentaje y superficie de la distribución del flujo de retorno para el escenario CGCM B2 año 2030

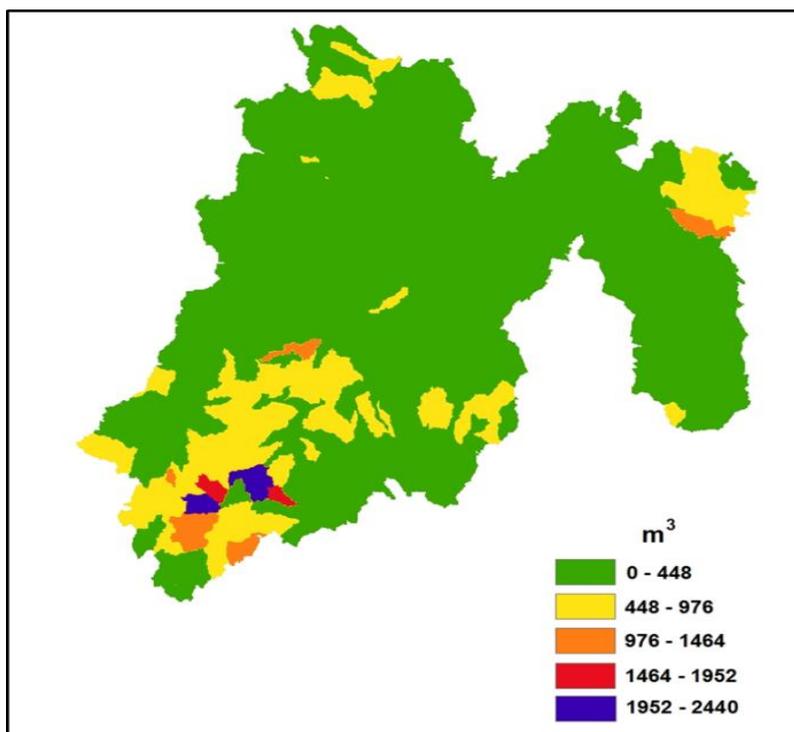


FIGURA 41: Distribución del flujo de retorno, escenario CGCM B2 año 2030

Para este escenario, el flujo de retorno proyectado para el año 2050 (Tabla 17), más bajo con valores de 0 a 448 m³ se distribuye en 81.5% del territorio estatal (18,201 km²), el rango de 448 a 976 m³ corresponde al 15.5% (3,457km²), el 1.8% (393 km²) presento valores en el rango de 976 a 1,464 m³, el 0.4% equivalente a 92 km² con valores de 1,464 a 1,952 m³, mientras que el 0.8% (177 km²) restante presento valores de 1,952 a 2,240 m³.

4.3.5 Flujo de Retorno escenario CGCM B2 año 2050

Para el escenario futuro B2 el total del flujo de retorno, proyectado para el año 2050 por el modelo CGCM (Figura 42) fue de 5, 936, 480, 216.09 m³.

El flujo de retorno para este escenario aumentó el 185.1% comparándolo con el escenario base (2008).

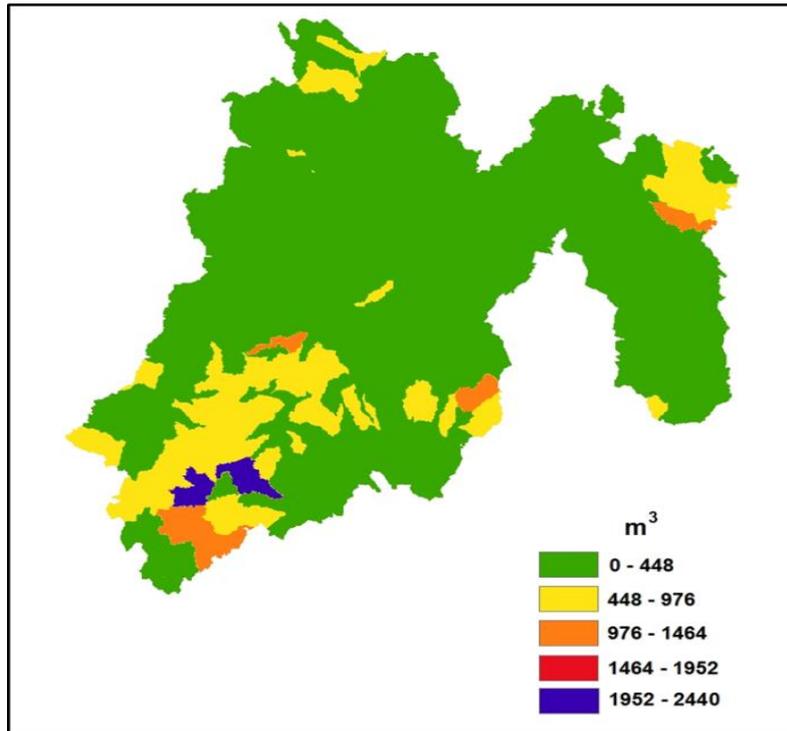


FIGURA 42: Distribución del flujo de retorno, escenario CGCM B2 año 2050

Las zonas que presentaron el rango mínimo de valores de flujo de retorno están distribuidas en toda la superficie estatal.

Con respecto a las zonas con el rango de valores máximos de flujo de retorno se presentaron en parte de los municipios de Sultepec, Tejuzilco y Amatepec.

En la tabla 18 se muestra la variabilidad del flujo de retorno, el 81% de la superficie del estado (18,116 km²) presentó valores de 0 a 448 m³, el 15% de la superficie (3,345 km²) presentó valores de 448 a 976 m³, el 3% (590 km²) tiene valores de 976 a 1464 m³ y el 1% (269 km²) tiene valores de 1,952 a 2,440 m³.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 448	18116	81
448 - 976	3345	15
976 - 1464	590	3
1464 - 1952	0	0
1952 - 2240	269	1

TABLA 18: Porcentaje y superficie de la distribución del flujo de retorno para el escenario CGCM B2 año 2050

El flujo de retorno presentó un incremento drástico entre el escenario actual y los escenarios simulados (Figura 43).

El comportamiento entre los escenarios proyectados presentó pocas diferencias.

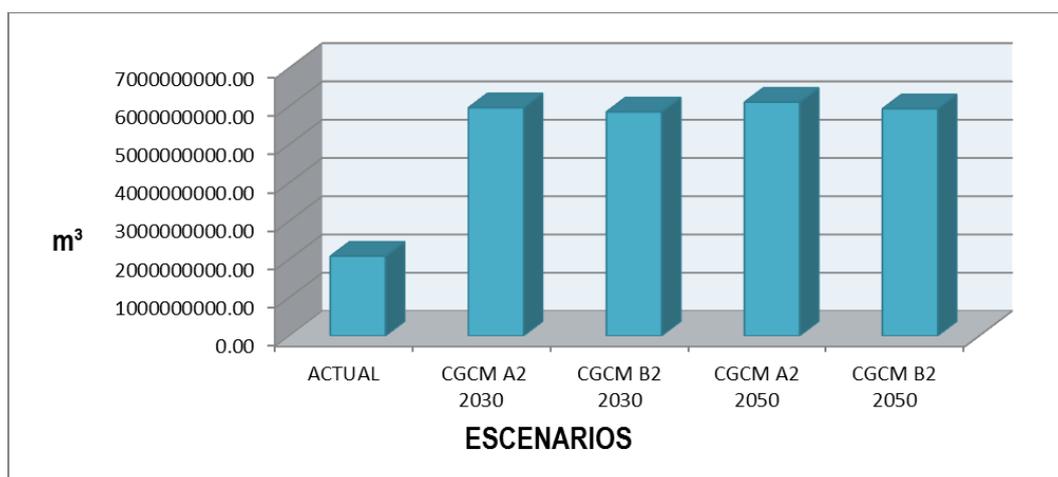


FIGURA 43: Comparación de los escenarios de flujo de retorno.

4.4 Evapotranspiración

4.4.1 Evapotranspiración escenario base (2008)

La figura 44 muestra la proyección del escenario base (2008) con el modelo CGCM. La evapotranspiración total obtenida en el estado para este escenario fue de 12, 885, 165, 682.37 m³.

En el estado las zonas con el rango mínimo de volumen de evapotranspiración se ubicaron principalmente en parte de los siguientes municipios: Tequixquiac, Zumpango, Huehuetoca, Nopaltepec, Otumba, Tepetlaoxtoc, Texcoco, Papalotla, Chiautla, Chinconcuac, Atenco, Tezoyuca, San Martín de las Pirámides, Teotihuacán, Acolman, Ecatepec de Morelos, Tlalnepantla de Baz, Tultitlán, Coacalco de Berriozabal, Tecámac, Chalco, Ixtapaluca, Temamatla, Juchitepec, Joquicingo, Tenancingo, Malinalco, Ixtapan de la Sal, Zacualpan, Valle de Bravo y Amanalco.

Con respecto a las zonas con el rango de valores máximo en parte del municipio de Villa Victoria.

RANGOS m³	SUPERFICIE km²	%
38 - 308	1049	4.7
308 - 578	14976	67.1
578 - 848	6271	28.1
848 - 1119	0	0
1119 - 1389	24	0.1

TABLA 19: Porcentaje y superficie de la evapotranspiración para el escenario base (2008)

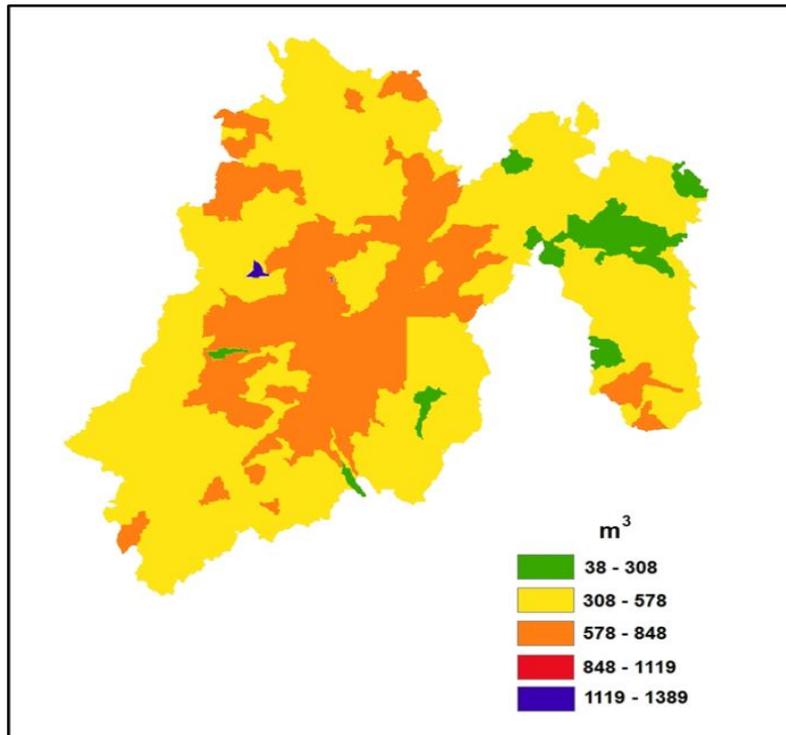


FIGURA 44: Distribución de la evapotranspiración, escenario base (2008).

La distribución de la evapotranspiración muestra que el 67.1 % (14,976 km²) de la superficie estatal presentó evapotranspiración con valores de 38 a 308 m³, el 28.1 % de la superficie (6,271 km²) tuvo valores de 578 a 848 m³, el 4.7 % equivalente a 1,049 km² presentó valores de 38 a 308 m³, mientras que el 0.1% (24 km²) restante presentó valores de 1119 a 1389 m³ (Tabla 19).

4.4.2 Evapotranspiración escenario CGCM A2 año 2030

Para el escenario A2, la distribución de la evapotranspiración proyectada para el año 2030 por el modelo CGCM se presenta en la figura 45, el total obtenido en este escenario fue de 17, 627, 045, 672.04 m³.

La evapotranspiración para el año 2030 en el Estado aumentó el 36.8% respecto al escenario base (2008).

Los municipios que presentaron el rango mínimo de valores de evapotranspiración para este escenario son Valle de Bravo y Amanalco. El rango con valores máximos se concentró en parte de los municipios de Almoloya de Juárez y Villa Victoria.

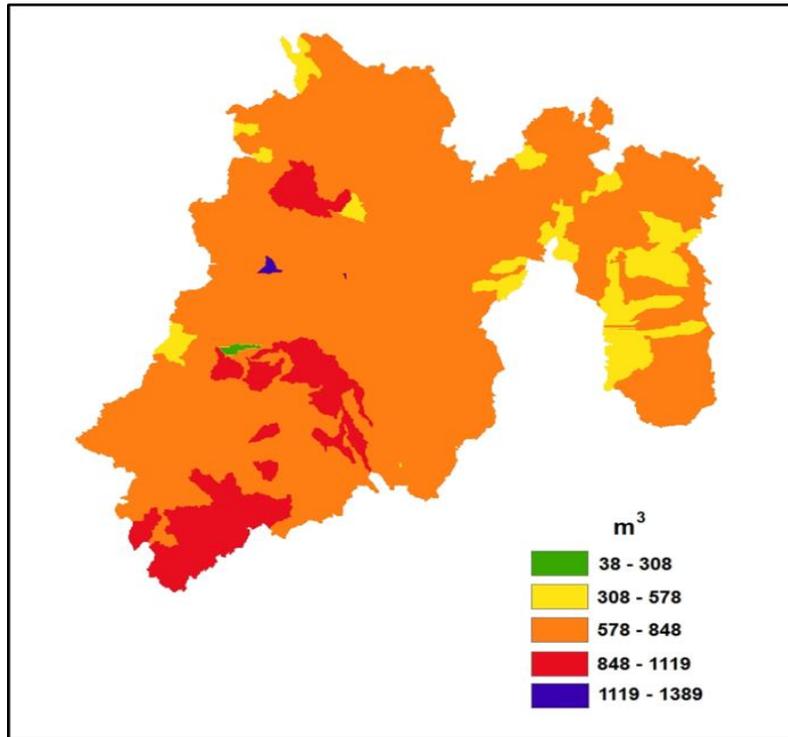


FIGURA 45: Distribución de la evapotranspiración, escenario CGCM A2 año 2030

En la tabla 20 se puede observar la distribución de la evapotranspiración, el 82.2 % de la superficie equivalente a 18,358 km² tiene valores de 578 a 848 m³, el 9.7 % (2,160 km²) valores de 848 a 1,119 m³, el 7.8 % (1,747 km²) tiene valores de 308 a 578 m³, el 0.14 % (32 km²) presentó valores de 38 a 308 m³, mientras que el 0.11% restante (24 km²) valores de 1,119 a 1,389 m³

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
38 - 308	32	0.14
308 - 578	1747	7.8
578 - 848	18358	82.2
848 - 1119	2160	9.7
1119 - 1389	24	0.11

TABLA 20: Porcentaje y superficie de la evapotranspiración para el escenario CGCM A2 año 2030

4.4.3 Evapotranspiración escenario CGCM A2 año 2050

En la figura 46 se muestra el escenario A2 de evapotranspiración para el año 2050, según el modelo CGCM. El total calculado para este escenario fue de 17, 540, 624, 321.85 m³.

La evapotranspiración para el año 2050 en el Estado aumentó el 36.1% respecto al escenario base (2008).

Los valores contenidos en el rango mínimo se distribuyen principalmente en parte de los municipios de Valle de Bravo y Amanalco.

El rango con valores máximos se concentró en parte de los siguientes municipios Almoloya de Juárez y Villa Victoria.

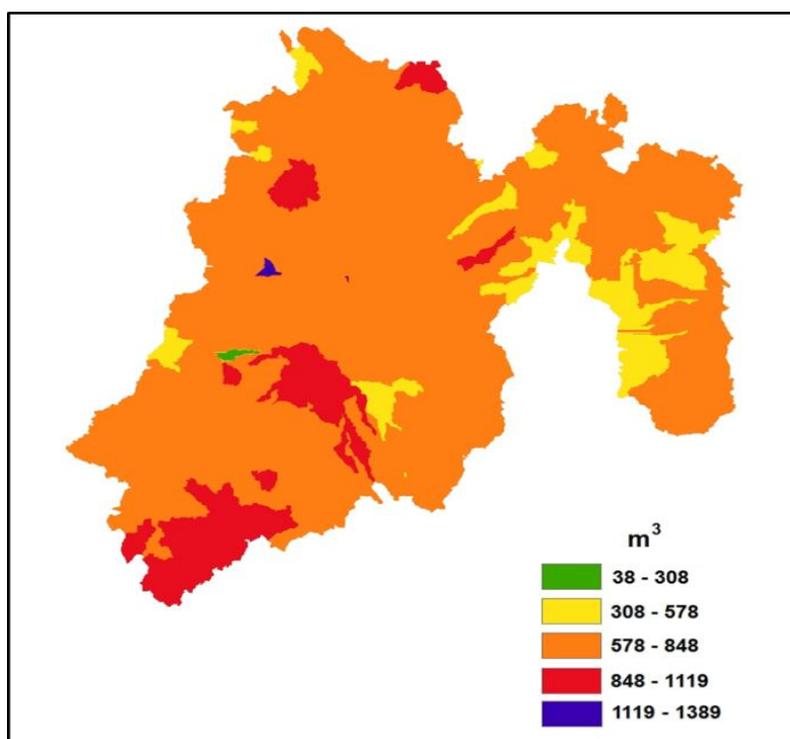


FIGURA 46: Distribución de la evapotranspiración, escenario CGCM A2 año 2050

Para este escenario la distribución de la evapotranspiración muestra que el 81.5% (18,186 km²) tiene valores de 578 a 848 m³, el 9.7% que equivale a 2,157 km² tiene valores de 848 a 1,119 m³, el 8.6% (1,920 km²) presentó valores de 308 a 578 m³, el 0.14% equivalente a 32 km² con valores de 38 a 308 m³ y el 0.11% restante (24 km²) tiene valores de 1,119 a 1,389 m³ (tabla 21).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
38 - 308	32	0.14
308 - 578	1920	8.6
578 - 848	18186	81.5
848 - 1119	2157	9.7
1119 - 1389	24	0.11

TABLA 21: Porcentaje y superficie de la evapotranspiración para el escenario CGCM A2 año 2050

4.4.4 Evapotranspiración escenario CGCM B2 año 2030

La figura 47 muestra la variabilidad espacial y temporal de la evapotranspiración, proyectada para el año 2030 con el modelo CGCM para el escenario B2, el total calculado para este escenario fue de 17, 393, 477, 397.14 m³.

La evapotranspiración para el año 2030 en el Estado aumentó el 35.0% respecto al escenario base (2008).

En el estado las zonas con el rango de valores mínimo de evapotranspiración se encontraron principalmente en parte de los municipios de Amanalco y Valle de Bravo.

El rango máximo de evapotranspiración al noroeste cubre parte de los municipios de Atlacomulco, Jocotitlán, Ixtlahuaca y San Felipe del Progreso, al centro y suroeste Almoloya de Juárez, Villa Victoria, Zinacatepec, Amanalco, Valle de Bravo, Temascaltepec, San Simón de Guerrero, Coatepec Harinas, Villa Guerrero, Toluca, Ixtapan de La Sal, Tonicato, Tejupilco, Sultepec, Amatepec y Tlatlaya.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
38 - 308	32	0.1
308 - 578	0	0.0
578 - 848	2154	9.7
848 - 1119	18288	81.9
1119 - 1389	1846	8.3

TABLA 22: Porcentaje y superficie de la evapotranspiración para el escenario CGCM B2 año 2030

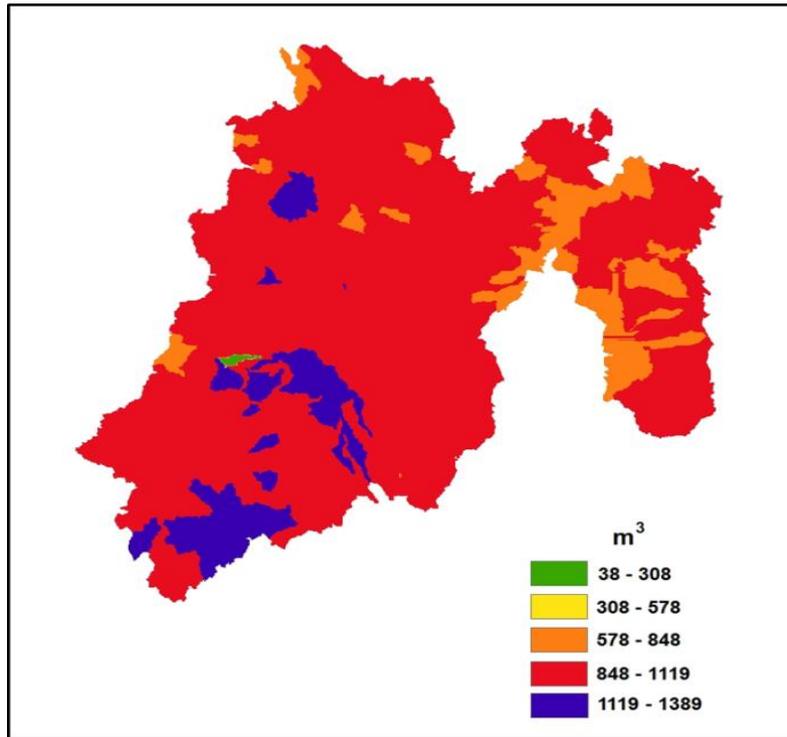


FIGURA 47: Distribución de la evapotranspiración, escenario CGCM B2 año 2030

Para este escenario la distribución de la evapotranspiración mostro que el 81.9% (18,288km²) tiene valores de 848 a 1,119 m³, el 9.7% que equivale a 2,154 km² tiene valores de 578 a 848 m³, el 8.3% (1,846 km²) presentó valores de 1119 a 1389 m³ y el 0.1% restante (32 km²) tiene valores de 38 a 308 m³.

4.4.5 Evapotranspiración escenario CGCM B2 año 2050

Para el escenario futuro B2 la distribución de la evapotranspiración, proyectado para el año 2050 por el modelo CGCM el total calculado fue de 17, 560, 838, 816.15 m³ (figura 48).

La evapotranspiración para el año 2050 en el Estado aumentó en 36.3% con respecto al escenario base (2008).

Las zonas que presentaron el rango mínimo de valores de evapotranspiración son parte de los municipios de Amanalco y Valle de Bravo.

Con respecto a las zonas con el rango de valores máximos de evapotranspiración éstas se presentan en parte de los municipios de Jilotepec, Soyaniquilpan de Juárez al norte; al este Atenco, Ecatepec de Morelos, Texcoco, Chimalhuacán, Jilotzingo, Atizapán de Zaragoza y Nicolás

Romero; al suroeste Valle de Bravo, Temascaltepec, Amanalco, Zinacantepec, Toluca, Villa Guerrero, Tenango del Valle, Sultepec, Almoloya de Alquisiras, Amatepec y Tlatlaya.

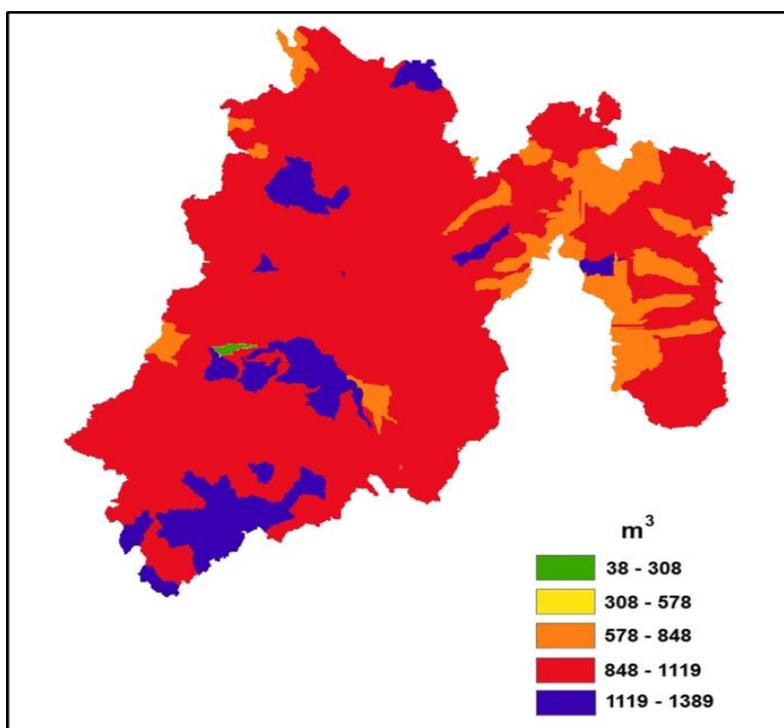


FIGURA 48: Distribución de la evapotranspiración, escenario CGCM B2 año 2050

En la tabla 23 se puede observar la distribución de la evapotranspiración, el 79.3% (17,706 km²) de la superficie estatal tiene valores entre 848 y 1,119 m³, el 10.7% (2,397 km²) de 578 a 848 m³, el 9.8% (2185 km²) de 1,119 a 1,389 m³, mientras que el 0.1 % (32 km²) restante presentó valores de 38 a 308 m³.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
38 - 308	32	0.1
308 - 578	0	0
578 - 848	2397	10.7
848 - 1119	17706	79.3
1119 - 1389	2185	9.8

TABLA 23: Porcentaje y superficie de la evapotranspiración para el escenario CGCM B2 año 2050

La evapotranspiración estimada para los años 2030 y 2050 fue mayor que en las condiciones actuales; lo cual resulta lógico si se considera el incremento de la precipitación y la temperatura de la atmósfera. El comportamiento de la evapotranspiración es más alto en los escenarios B1 y B2, y aumento significativamente en todo los escenarios respecto al escenario base (Figura 49).

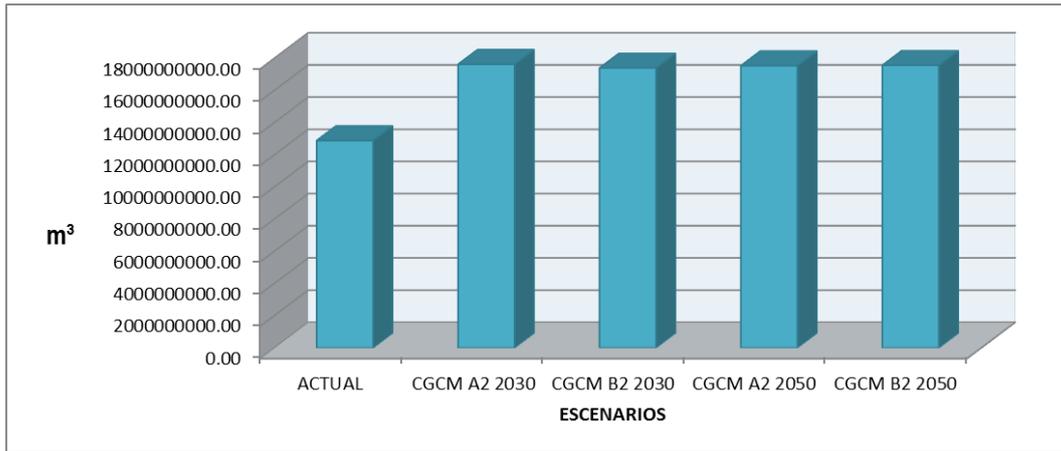


FIGURA 49: Comparación de los escenarios de evapotranspiración.

4.5 Infiltración

4.5.1 Infiltración escenario base (2008)

La figura 50 muestra la variabilidad espacial de la infiltración, para el escenario base (2008). El total calculado para este escenario fue de 2, 530, 614, 593.77 m³.

En el estado las zonas con el rango mínimo de volumen de infiltración se distribuyen en toda la superficie estatal.

Con respecto a las zonas con el rango de valores máximo de infiltración se ubicaron en parte del municipio de Amatepec.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 555	20055	89.9
555 - 1109	1766	7.9
1109 - 1664	473	2.1
1664 - 2218	26	0.1
2218 - 2773	0	0

TABLA 24: Porcentaje y superficie de la infiltración para el escenario base (2008)

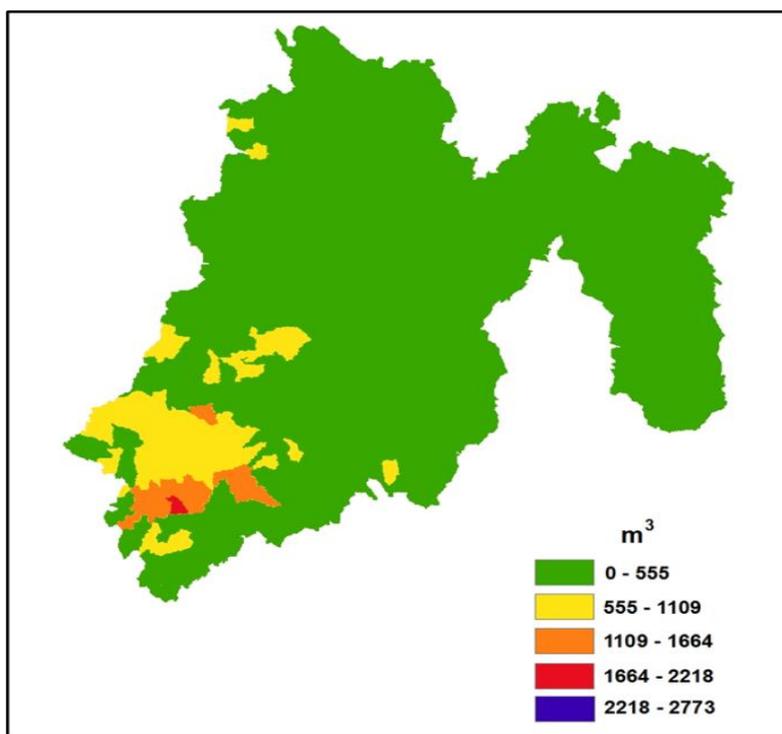


FIGURA 50: Distribución de la infiltración, escenario base (2008)

Como se observa en la figura 50 de la distribución espacial de la infiltración en 20,055 km² del territorio de Estado presentó un rango de 0 a 555 m³ correspondiente al 89.9% del territorio, el 7.9% de la superficie estatal equivalente a 1,766 km² tuvo un rango de 555 a 1109 m³, el 2.1% (473 km²) valores de 1,109 a 1,664 m³, el 0.1% restante de la superficie del Estado equivalente a 26 km² presentó valores de 1,664 a 2,218 m³ (Tabla 24).

4.5.2 Infiltración escenario CGCM A2 año 2030

La infiltración total obtenida para este escenario fue de 6, 805, 411, 641.27 m³ distribuida en la superficie del estado (Figura 51).

La infiltración para el año 2030 en el Estado aumentó en 168.9% respecto al escenario base (2008).

En el estado las zonas con el rango mínimo de volumen de infiltración se distribuyen en toda la superficie estatal.

El rango con valores máximos se concentró en parte de los siguientes municipios Amatepec, Sultepec y Tejupilco.

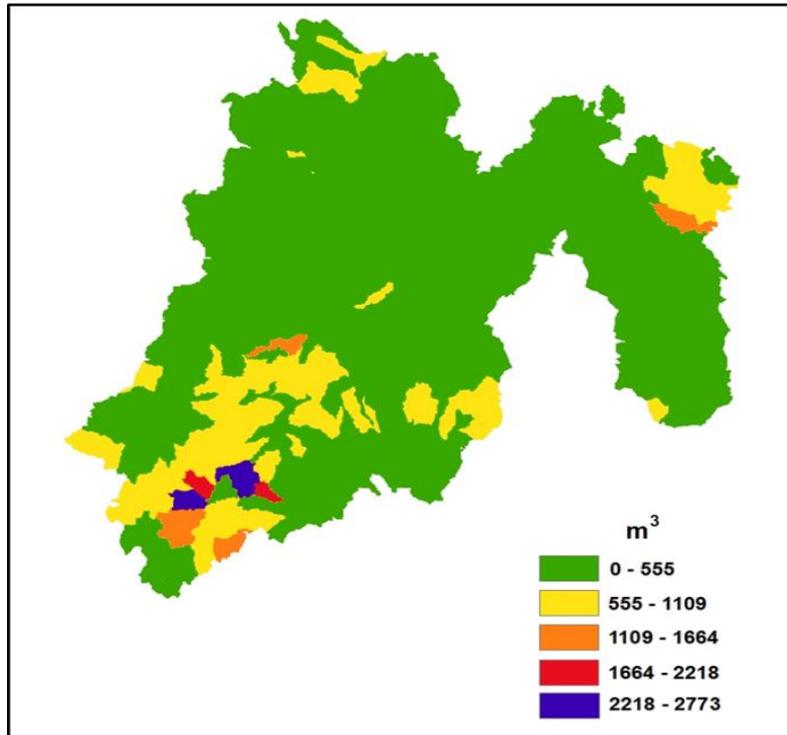


FIGURA 51: Distribución de la infiltración, escenario CGCM A2 año 2030.

La distribución superficial de la infiltración para el escenario A2 muestra que el mayor porcentaje del estado 81.7% (18,225 km²) tuvo valores de 0 a 555 m³, el 15.4% (3,447 km²) presentó valores de 555 a 1,109 m³, el 15.4% (3,447 km²) tuvo valores de 555 a 1,109 m³, 380 km² equivalentes al 1.7% presentó valores de 1,109 a 1,664 m³, el 1% (177 km²) tuvo valores de 2,218 a 2,773 m³, el resto del Estado presentó infiltración con valores de 1,664 a 2,218 m³ equivalente al 0.4% (92 km²) de la superficie (Tabla 25).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 555	18225	81.7
555 - 1109	3447	15.4
1109 - 1664	380	1.7
1664 - 2218	92	0.4
2218 - 2773	177	1

TABLA 25: Porcentaje y superficie de la infiltración para el escenario CGCM A2 año 2030

4.5.3 Infiltración escenario CGCM A2 año 2050

La figura 52 muestra la variabilidad espacial de la infiltración, proyectada para el año 2050 con el modelo CGCM para el escenario A2. El total de la infiltración calculada para este escenario fue de 6, 976, 969,855.82 m³.

La infiltración para el año 2050 en el Estado aumentó en 175.7% respecto al escenario base (2008).

En el estado las zonas con el rango mínimo de volumen de infiltración se distribuyen en toda la superficie estatal.

El rango con valores máximos se concentró en parte de los siguientes Sultepec, Tejupilco y Amatepec.

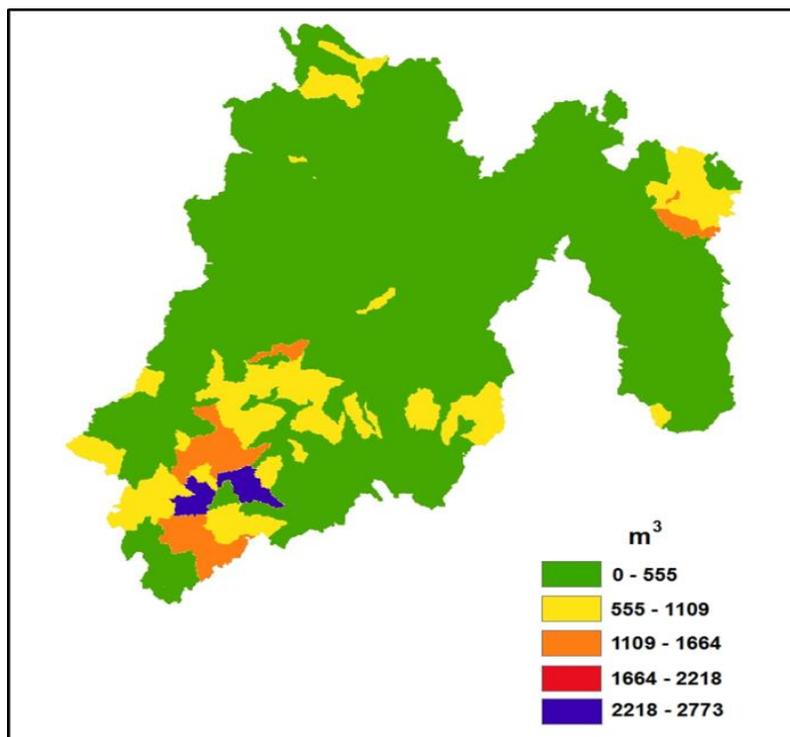


FIGURA 52: Distribución de la infiltración, escenario CGCM A2 año 2050

Como se observa para este escenario la distribución de la infiltración presentó fuertes cambios, el 82% del territorio del Estado (18,263 km²) presentó valores de 0 a 555 m³, el rango de valores de 555 a 1109 m³ corresponde al 13% (2,942 km²) se distribuyó en todo el territorio, a nivel estatal el 4% (846 km²) tuvo valores de 1,109 a 1,664 m³ y el 1% (269 km²) valores de 2,218 a 2,773 m³ (Tabla 26).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 555	18263	82
555 - 1109	2942	13
1109 - 1664	846	4
1664 - 2218	0	0
2218 - 2773	269	1

TABLA 26: Porcentaje y superficie de la infiltración para el escenario CGCM A2 año 2050

4.5.4 Infiltración escenario CGCM B2 año 2030

La figura 53 muestra la proyección del escenario B2 de la infiltración para el año 2030 con el modelo CGCM, el total de la infiltración para este escenario fue de 6, 735, 360, 376.98 m³.

La infiltración presentó un 166.2 % de aumento respecto al escenario base (2008).

En el estado las zonas con el rango mínimo de volumen de infiltración se distribuyen en toda la superficie estatal.

El rango máximo de evapotranspiración se localizó al noroeste del estado en los municipios de Amatepec, Tejupilco y Sultepec.

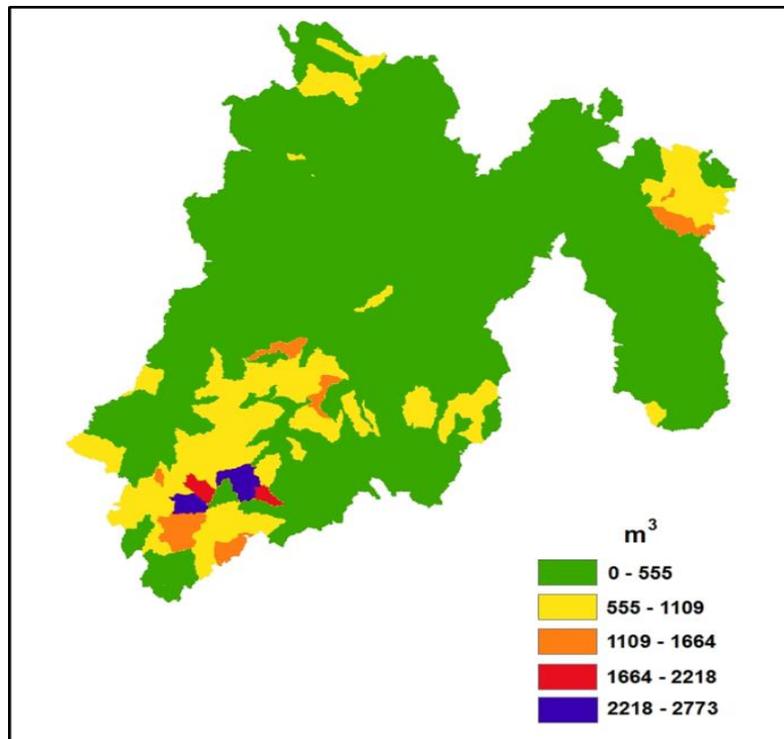


FIGURA 53: Distribución de la infiltración, escenario CGCM B2 año 2030

Para este escenario, la distribución de la infiltración proyectada para el año 2050 (Tabla 27), muestra que valores de 0 a 555 m³ correspondieron al 81.5% del territorio estatal (18193 km²), el rango de 555 a 1,109 m³ corresponde al 15.2% (3,404 km²), el 2.0% (454 km²) presentó valores de infiltración de 1,109 a 1,664 m³, el 0.4% equivalente a 92 km² tuvo valores de 1,664 a 2,218 m³, mientras que el 0.8% (177 km²) restante presentó valores de 2,218 a 2,773 m³.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 555	18193	81.5
555 - 1109	3404	15.2
1109 - 1664	454	2.0
1664 - 2218	92	0.4
2218 - 2773	177	0.8

TABLA 27: Porcentaje y superficie de la infiltración para el escenario CGCM B2 año 2030

4.5.5 Infiltración escenario CGCM B2 año 2050

Para el escenario B2 el total de la infiltración, proyectado para el año 2050 por el modelo CGCM (Figura 54) fue de 6, 751, 643, 980.10 m³ distribuido en todo el estado.

La infiltración para este escenario aumentó el 166.8% comparándola con el escenario base (2008). En el estado las zonas con el rango mínimo de volumen de infiltración se distribuyeron en toda la superficie estatal.

Con respecto a las zonas con el rango de valores máximos de infiltración estas se presentaron en parte de los municipios de Amatepec, Tejupilco y Sultepec.

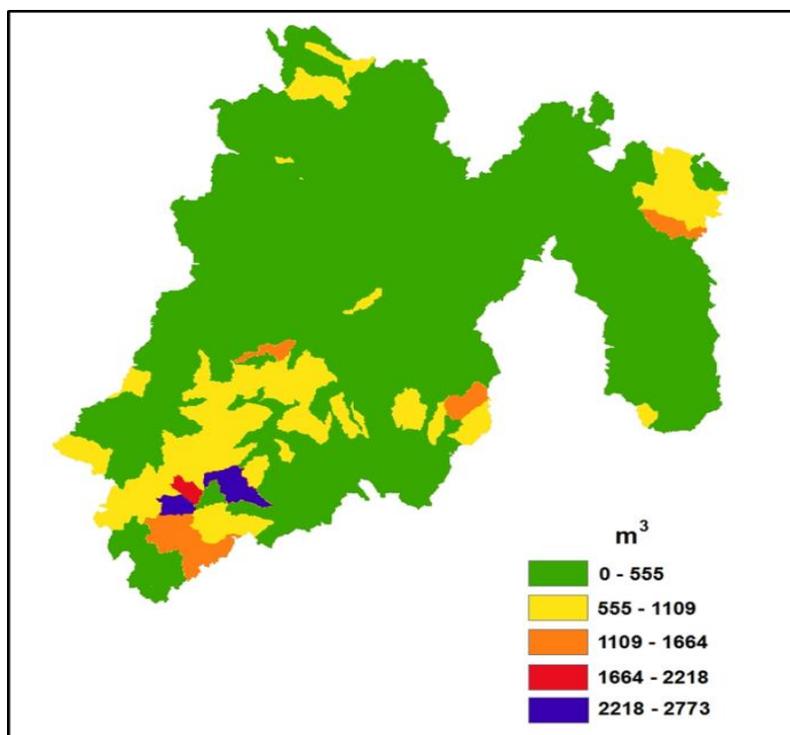


FIGURA 54: Distribución de la infiltración, escenario CGCM B2 año 2050

En la tabla 28 se muestra la variabilidad de la infiltración, el 81.5% de la superficie del estado (18,191 km²) presentó valores de 0 a 555 m³, el 14.6% de la superficie (3270 km²) presentó valores de 555 a 1,109 m³, el 2.6% (590 km²) tiene valores de 1,109 a 1,664 m³, el 1% (214 km²) con valores de 2,218 a 2,773 m³ y el 0.2% equivalente a 55 km² con valores de 1,664 a 2,218 m³.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
0 - 555	18191	81.5
555 - 1109	3270	14.6
1109 - 1664	590	2.6
1664 - 2218	55	0.2
2218 - 2773	214	1.0

TABLA 28: Porcentaje y superficie de la infiltración para el escenario CGCM B2 año 2050

El comportamiento de la infiltración en los escenarios proyectados presentó un incremento drástico respecto al escenario actual.

La infiltración fue mayor al flujo de retorno y el escurrimiento si se conservan las características físicas actuales del Estado y no aumenta la urbanización (figura 55).

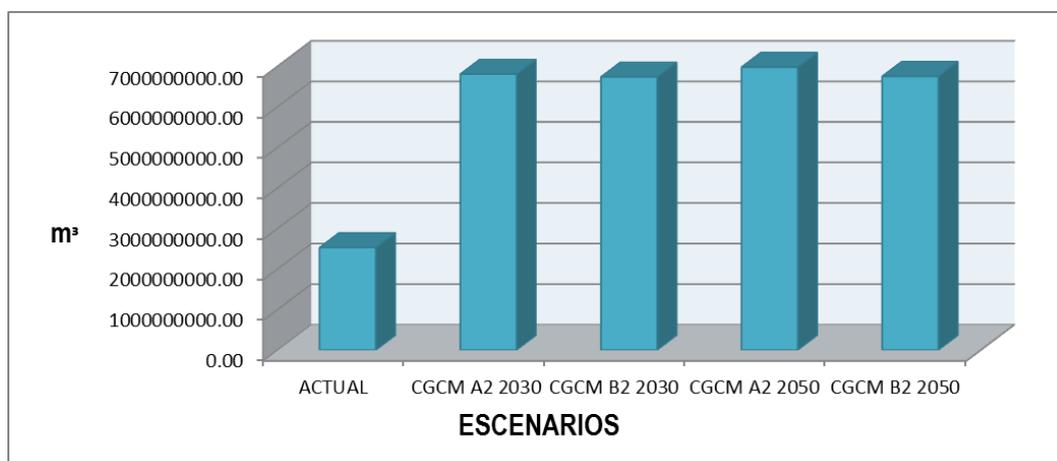


FIGURA 55: Comparación de los escenarios de infiltración.

4.6 Balance hídrico

4.6.1 Balance hídrico escenario base (2008)

La figura 56 muestra la distribución del balance hídrico para el escenario base (2008), el volumen total calculado fue de 10, 779, 302,610.85 m³.

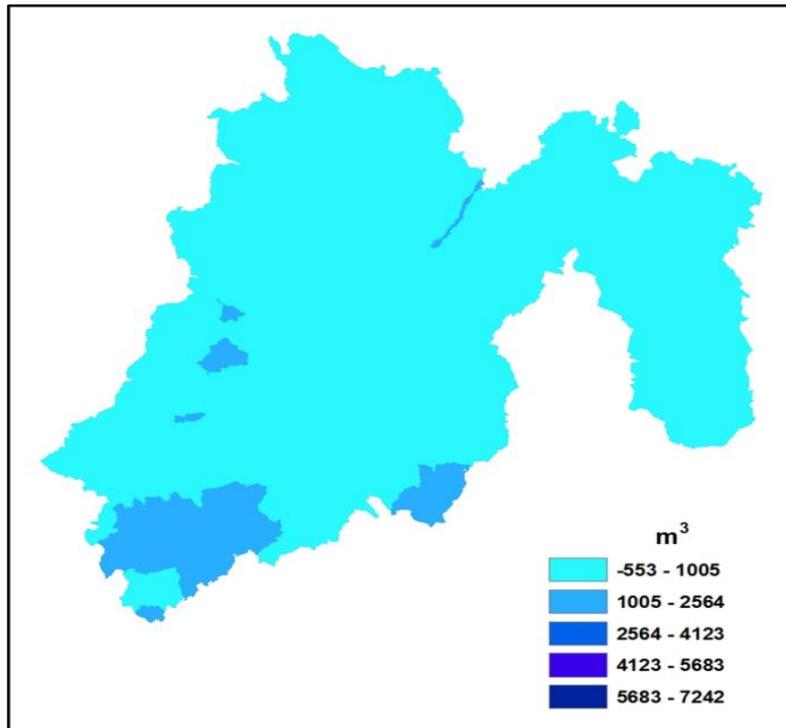


FIGURA 56: Distribución del Balance Hídrico, escenario base (2008)

El total calculado para las entradas de agua fue de 26, 195, 066, 396.03 m³, de este total el 83 % equivalente a 21, 733, 127, 745.46 m³ precipita, el 9.1 % (m³) escurre y el 7.9 % (m³) corresponde a flujo de retorno (Figura 57).

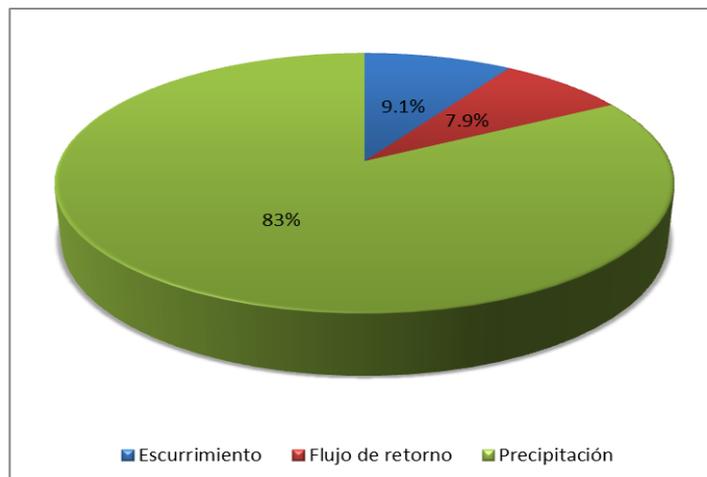


FIGURA 57: Porcentaje de entradas de agua, escenario base (2008).

En cuanto a las salidas de agua, están sumaron 15, 415, 780, 276.14 m³, de las cuales el 16.4 % se infiltra y el 83.6 % se evapotranspira (Figura 58).



FIGURA 58: Porcentaje de salidas de agua, escenario base (2008).

Los resultados del balance hídrico simulado (Tabla 29) indicaron un balance con valores de -553 a 1,005 m³ correspondiente a 20,468 km² (92%) de la superficie estatal, el 8% restante (1,852 km²) con valores de 1,005 a 2,564 m³.

Para este escenario la distribución de los valores negativos y mínimos están distribuidos en toda la superficie estatal, el valor máximo del balance hídrico está comprendido en los siguientes municipios Villa del Carbón, Nicolás Romero, Villa de Allende, Zacazonapan, Temascaltepec, Donato Guerra, Amanalco, Malinalco, Tenancingo, Zumpahuacán, Tonalico, Amatepec, Sultepec y Tlatlaya.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
-553 - 1005	20468	92
1005 - 2564	1852	8
2564 - 4123	0	0
4123 - 5683	0	0
5683 - 7242	0	0

TABLA 29: Porcentaje y superficie del Balance Hídrico para el escenario base (2008)

4.6.2 Balance Hídrico CGCM A2 año 2030

El balance hídrico calculado para este escenario fue de 19, 914, 552, 769.53 m³ (Figura 59).

El balance hídrico para este escenario aumentó en 84.7% comparándola con el escenario base (2008).

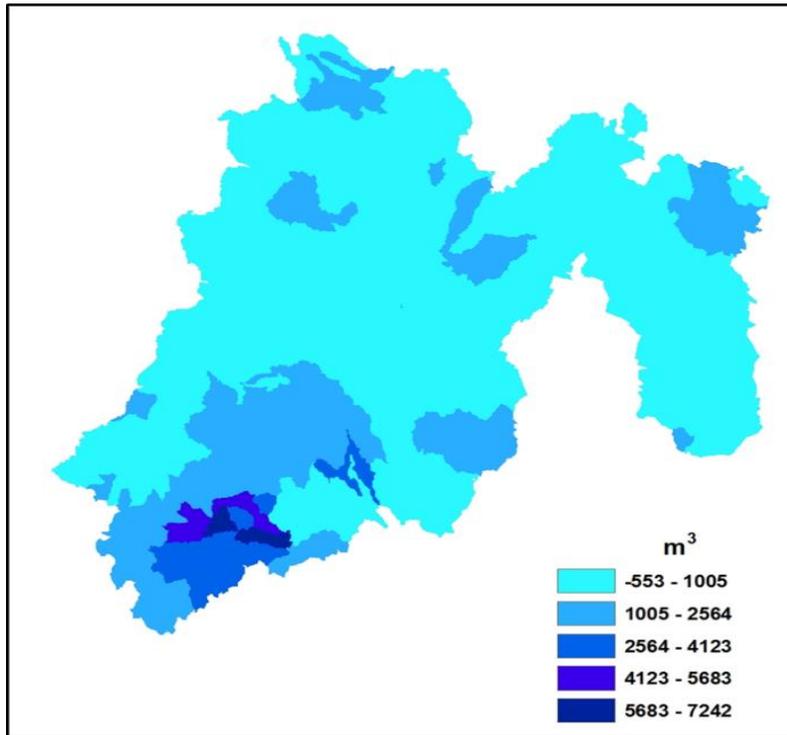


FIGURA 59: Distribución del Balance Hídrico, escenario CGCM A2 año 2030.

El rango negativo y mínimo ocupó la mayor superficie estatal. Los municipios en dónde se presentaron los valores máximos del balance hídrico son Amatepec y Sultepec.

Se obtuvieron para las entradas de agua 44, 347, 024, 847.296 m³; el 77.7% equivalente a 34, 471, 624, 351.26 m³ precipita, el 8.8 % (3, 913, 127, 944.29 m³) escurre y el 13.4 % (5, 962, 272, 551.74 m³) corresponde a flujo de retorno (figura 60).

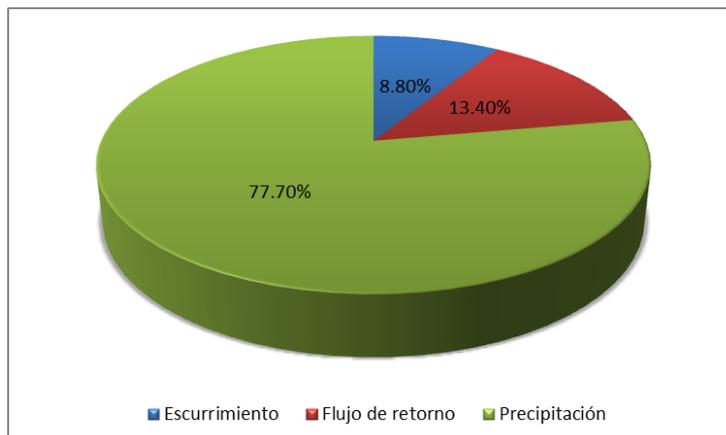


FIGURA 60: Porcentaje de entradas de agua, escenario CGCM A2 año 2030.

Para las salidas de agua están sumaron 24, 432, 457, 313.318 m³, de las cuales el 27.9% equivalente a 6, 805, 411, 641.27 m³ se infiltra al subsuelo y el 72.1 % (17, 627, 045, 672.04 m³) se evapotranspira (Figura 61).



FIGURA 61: Porcentaje de salidas de agua, escenario CGCM A2 año 2030.

La distribución del balance hídrico para el escenario A2 muestra el mayor porcentaje del estado 72.1% (16,083 km²) con valores de -553 a 1,005 m³, el 22.9% (5,115 km²) con valores de 1,005 a 2,564 m³, el 3.4% (767 km²) con valores de 2,564 a 4,123 m³, 223 km² equivalentes al 1.0% presentó valores de 4,123 a 5,683 m³ y el 0.6 % (132 km²) con valores de 5,683 a 7,242 m³ de la superficie (Tabla 30).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
-553 - 1005	16083	72.1
1005 - 2564	5115	22.9
2564 - 4123	767	3.4
4123 - 5683	223	1.0
5683 - 7242	132	0.6

TABLA 30: Porcentaje y superficie del Balance Hídrico para el escenario CGCM A2 año 2030

4.6.3 Balance Hídrico CGCM A2 año 2050

El balance hídrico calculado para este escenario fue de 20, 494, 414, 994.54 m³ (Figura 62), este aumentó en 90.1% comparándolo con el escenario base (2008).

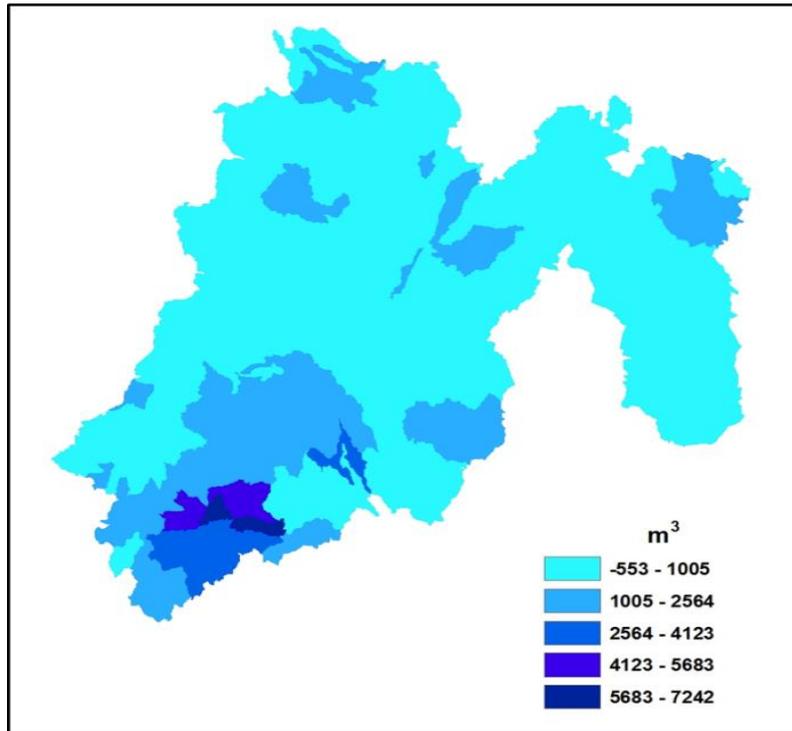


FIGURA 62: Distribución del Balance Hídrico, escenario CGCM A2 año 2050

El rango negativo y mínimo ocupa la mayor superficie estatal. Los municipios en dónde se presentaron los valores máximos del balance hídrico son Amatepec y Sultepec.

En los componentes que contribuyen a las entradas de agua se obtuvieron 45, 012, 033, 598.846 m³; de estos el 77.20 % precipita, el 9.20 % escurre y el 13.60 % correspondiente al flujo de retorno (Figura 63).

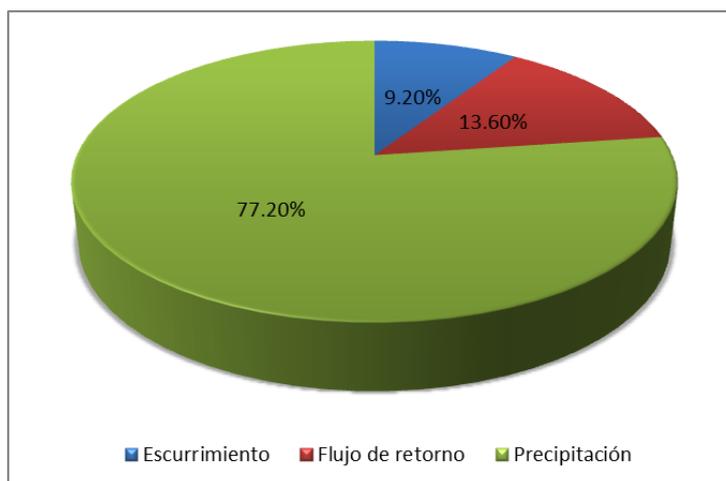


FIGURA 63: Porcentaje de entradas de agua, escenario CGCM A2 año 2050.

Las salidas de agua sumaron 24, 517, 594,177.679 m³, distribuidos de la siguiente manera el 28.5% (6, 976, 969, 855.82 m³) se infiltra al subsuelo, 71.5 % equivalente a 17, 540, 624, 321.85 m³ se evapotranspira (Figura 64).



FIGURA 64: Porcentaje de salidas de agua, escenario CGCM A2 año 2050.

Como se observa para este escenario la distribución del balance hídrico presentó fuertes cambios el 72.6% del territorio del Estado (16,204 km²) presentó valores de -553 a 1,005 m³, el rango de valores de 1,005 a 2,564 m³ corresponde al 23% (5,065 km²) distribuido en todo el territorio, a nivel estatal el 2.9% (651 km²) tiene valores de 2,564 a 4,123 m³, el 1.2% (269 km²) con valores de 4,123 a 5,683 m³ y el 0.6% (132 km²) con valores de 5,683 a 7,242 m³ (Tabla 31).

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
-553 - 1005	16204	72.6
1005 - 2564	5065	23
2564 - 4123	651	2.9
4123 - 5683	269	1.2
5683 - 7242	132	0.6

TABLA 31: Porcentaje y superficie del Balance Hídrico para el escenario CGCM A2 año 2050

4.6.4 Balance Hídrico CGCM B2 año 2030

La figura 65 muestra la distribución del balance hídrico para el escenario, el volumen total calculado fue de 19, 372, 898, 631.03 m³

El balance hídrico para este escenario aumento en 79.7% comparado con el escenario base (2008).

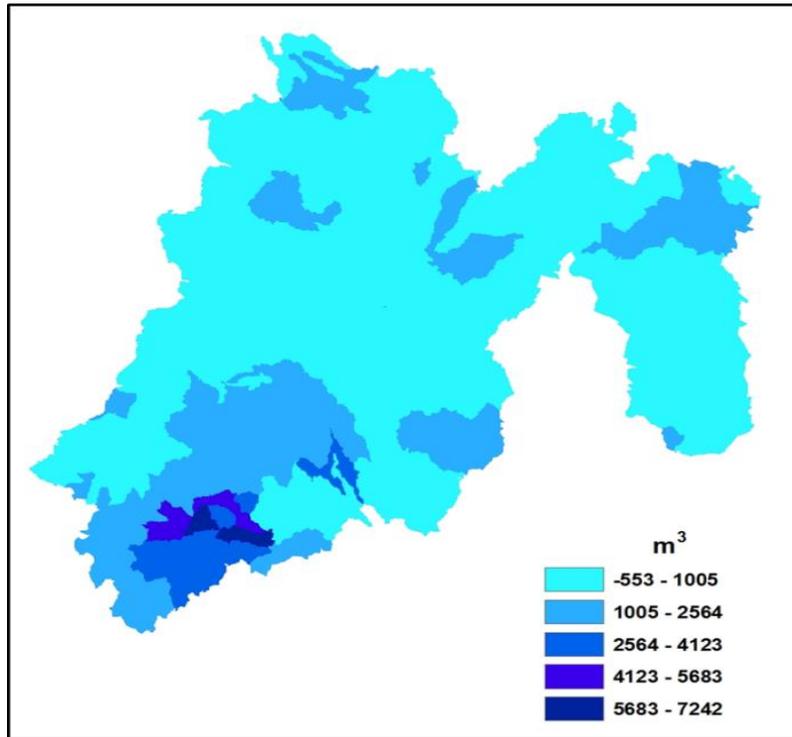


FIGURA 65: Distribución del Balance Hídrico, escenario CGCM B2 año 2030

El rango negativo y mínimo ocupa la mayor superficie estatal. Los municipios en dónde se presentaron los valores máximos del balance hídrico son Amatepec y Sultepec.

El total calculado para las entradas de agua fue de 43, 501, 777, 248.476 m³, de este total el 77.9% equivalente a 33, 897, 586, 799.65 m³ precipita, el 8.6 % (3, 749, 234, 488.97 m³) escurre y el 13.5 % (5, 854, 955, 959.86 m³) corresponde a flujo de retorno (Figura 66).

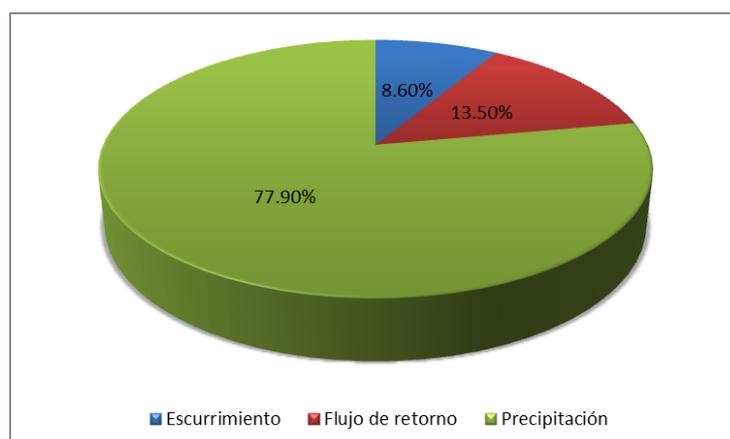


FIGURA 66: Porcentaje de entradas de agua, escenario CGCM B2 año 2030.

En cuanto a las salidas de agua, están suman 24, 128, 837, 774.114 m³, de las cuales el 27.9 % (6, 735, 360, 376.98 m³) se infiltra al subsuelo y el 72.1 % equivalente a 17, 393, 477, 397.14 m³ se evapotranspira (Figura 67).



FIGURA 67: Porcentaje de salidas de agua, escenario CGCM B2 año 2030.

Para este escenario, la distribución del balance hídrico proyectado para el año 2050 (Tabla 32), se observó que los valores de -553 a 1,005 m³ correspondientes al 70.9% del territorio estatal (115,835 km²), el rango de 1,005 a 2,564 m³ corresponde al 24% (5,363 km²), el 3.4% (767 km²) contenido en el rango de 2,562 a 4,123 m³, el 1.0% equivalente a 223 km² con valores de 4,123 a 5,683 m³, mientras que el 0.6% (132 km²) restante presentó valores de 5,683 a 7,242 m³.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
-553 - 1005	15835	70.9
1005 - 2564	5363	24
2564 - 4123	767	3.4
4123 - 5683	223	1.0
5683 - 7242	132	0.6

TABLA 32: Porcentaje y superficie del Balance Hídrico para el escenario CGCM B2 año 2030.

4.6.5 Balance Hídrico CGCM B2 año 2050

El balance hídrico calculado para este escenario fue de 19, 592, 928, 292.41 m³ (Figura 68).

El balance hídrico para este escenario aumentó el 81.8% comparándola con el escenario base (2008).

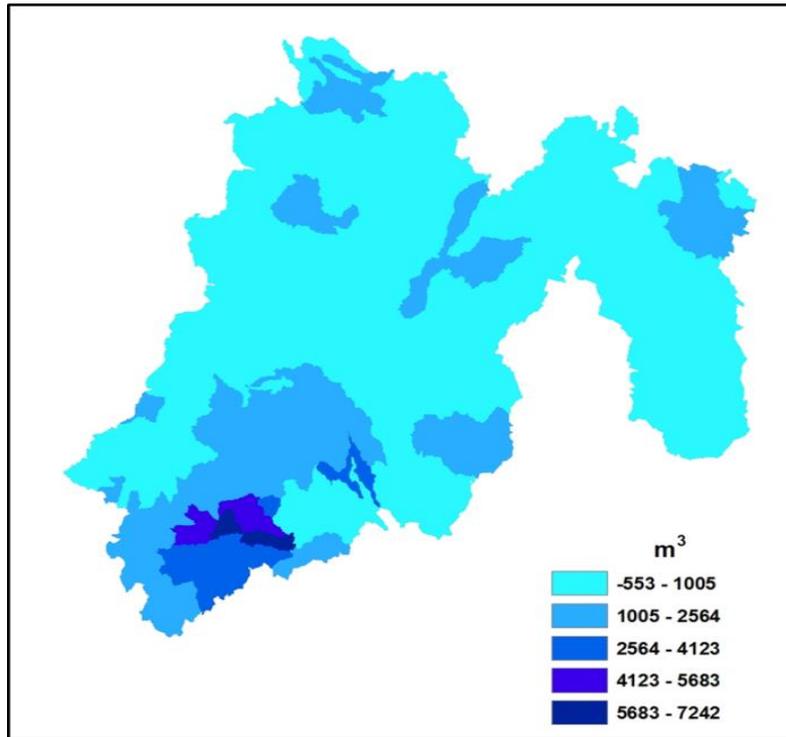


FIGURA 68: Distribución del Balance Hídrico, escenario CGCM B2 año 2050.

El rango negativo y mínimo ocupa la mayor superficie estatal. Los municipios en dónde se presentaron los valores máximos del balance hídrico son Amatepec y Sultepec.

Se obtuvieron para las entradas de agua 43, 905, 470, 043.786 m³; el 77.8 % equivalente a 34, 156, 37, 951.53 m³ precipita, el 8.7 % (3, 812, 615, 876.17 m³) escurre y el 13.5 % (5, 936, 480, 216.09 m³) corresponde a flujo de retorno (Figura 69).

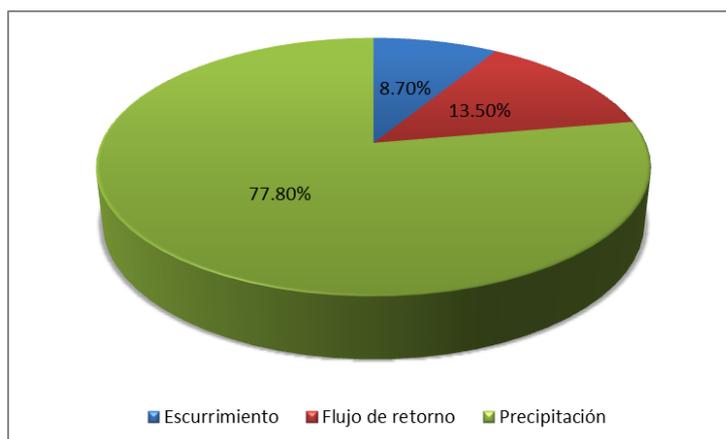


FIGURA 69: Porcentaje de entradas de agua, escenario CGCM B2 año 2050.

Para las salidas de agua están suman 24, 312, 482, 797.153 m³, de las cuales el 27.8 % (6, 751, 643, 980.1 m³) se infiltra al subsuelo y el 72.2 % (17, 560, 838, 816.15 m³) se evapotranspira (Figura 70).



FIGURA 70: Porcentaje de salidas de agua, escenario CGCM B2 año 2050.

En la tabla 33 se muestra la variabilidad del balance hídrico, el 71.8% de la superficie del estado (16,027 km²) presentó valores de -553 a 1,005 m³, el 23.2% de la superficie (5,172 km²) presentó valores de 1,005 a 2,564 m³, el 3.2% (721 km²) obtuvo valores de 2,564 a 4,123 m³, el 1.2% (269 km²) con valores de 4,123 a 5,683 m³ y el 0.6% equivalente a 132 km² con valores de 5,683 a 7,242 m³.

RANGOS m ³	SUPERFICIE km ²	%
-553 - 1005	16027	71.8
1005 - 2564	5172	23.2
2564 - 4123	721	3.2
4123 - 5683	269	1.2
5683 - 7242	132	0.6

TABLA 33: Porcentaje y superficie del Balance Hídrico para el escenario CGCM B2 año 2050.

Después de analizar el comportamiento del balance hídrico en los escenarios actual y futuros, se compararon cuantitativamente con el fin de apreciar en su conjunto la variación que se generó con el cambio climático global.

El aumento de la temperatura dio origen a un incremento de la evaporación en la atmósfera, y favoreció a las masas de aire cálido y húmedo para la conducción de humedad que propicio mayor precipitación.

El hecho de que la precipitación aumentara, dio lugar a que el volumen de evapotranspiración incrementara.

El comportamiento del balance hídrico en los diferentes escenarios fue muy similar, pero se observó un incremento drástico comparado con el escenario actual (Figura 71).

A pesar del incremento del balance hídrico en los cuatro escenarios futuros, se puede observar que en el rango de menor balance hídrico se encuentra distribuido en la mayor parte del territorio del Estado, encontrándose dentro de este las cuencas hidrológicas del Río Lerma y Pánuco; y los lugares en donde el balance hídrico es más alto son pocas y forman parte de la cuenca hidrológica del Río Balsas.

Los escenarios A1 y A2, fueron los que presentaron las condiciones más severas en los componentes del balance hídrico, a excepción de la evapotranspiración en donde los escenarios B1 y B2 fueron más severos.

El comportamiento para el balance hídrico aumento drásticamente respecto al actual, y en los escenarios para las familias A1 Y A2 fue más severo; dado que estos escenarios están enfocados hacia el desarrollo regional, consideran los valores intermedios en cuanto al crecimiento de emisiones GEI, y de crecimiento de población de entre 100 y 160 millones, con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso (Conde, *et al.*, 2006).

El análisis espacial indica, que en los escenarios B1 y B2, en donde se presentaron condiciones menos severas en los factores que componen el balance hídrico, así con en el total de este, suponen un crecimiento sostenible, en equidad entre la economía y el medio ambiente a nivel regional, la población aumenta progresivamente a un ritmo menor, con niveles de desarrollo económicos intermedios, con un cambio tecnológico más rápido y más diverso, orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional (IPCC, 2007).

Es importante mencionar que toda generación de escenarios de cambio climático regionales requiere considerar un cierto grado de incertidumbre; en los últimos años la generación de proyecciones de escenarios de cambio climático ha aumentado y los resultados han mostrado altas variaciones en cuanto a proyecciones futuras. Para las proyecciones de cambio climático se requiere disponer de un gran número de modelos de circulación general para comparar sus proyecciones. Sin embargo, dichos modelos generalmente adolecen de una baja resolución

espacial que pocas veces resulta poco útil para inferir los cambios en el clima que se pueden presentar de un estado del país a otro (Magaña y Caetano, 2007).

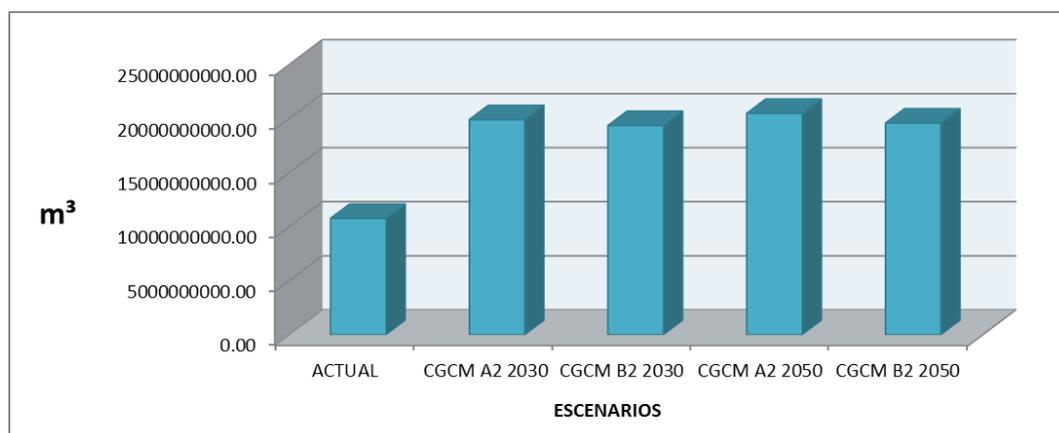


FIGURA 71: Comparación de los escenarios de balance Hídrico.

5.0 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1 Discusión

Las proyecciones publicadas por el IPCC (2007), mencionan que algunas zonas ubicadas en altas latitudes se verán beneficiadas por los efectos del cambio climático; los resultados del Balance hídrico para los escenarios de los años 2030 y 2050, los cuales coinciden con esa publicación.

En los futuros escenarios simulados se observó el aumento del balance hídrico con respecto al escenario base (2008), no obstante que las zonas con mayor disponibilidad de agua son mínimas, estos resultados coinciden con el Estudio de País: México ante el cambio climático (en: SEMARNAT, 1997; INE y UNAM, 1999; INE, 2004y 2006); los resultados sugieren que cambios plausibles en la precipitación causados por la duplicación del CO₂ atmosférico pueden tener un impacto muy significativo en el régimen y la magnitud de la escorrentía, la humedad del suelo y la evaporación, así como en el grado de aridez de algunas regiones hidrológicas del país, sin embargo, en otras el cambio climático puede ser favorable.

A escala global se prevé que los efectos del cambio climático en los recursos hídricos serán extensos, pero de diferente signo de una región a otra, conforme a la latitud, altitud y condiciones orográficas. En algunas regiones del planeta ya se registran los primeros síntomas de afectación en los recursos hídricos. En general, en las latitudes altas y medias se espera un incremento de la precipitación y el escurrimiento, lo que podría incrementar la oferta de agua en esas regiones, así como, a nivel global, incrementos en el vapor de agua en la atmósfera y cambios de régimen

en las precipitaciones, que han producido lluvias locales de mayor magnitud e intensidad (IPCC, 2008)

Es necesario reconocer la necesidad de realizar estudios para profundizar en el tema de la vulnerabilidad ante el cambio climático en el Estado de México, es posible deducir a través de la información obtenida que los cambios en los patrones del balance hídrico proyectados ocasionarán afectaciones para las comunidades humanas y los ecosistemas naturales, en el caso de las primeras, podrían registrarse incrementos de enfermedades, disminución de disponibilidad de agua para comunidades rurales y urbanas, afectaciones a actividades productivas.

Sin duda, el tema del manejo de los recursos hídricos debe ocupar un lugar importante en los planes de adaptación; el sistema hidrológico responde no sólo a los cambios en el clima, sino también a la sobre explotación de los acuíferos, las actividades humanas que demandan este recurso y por tanto cualquier modificación afectará la distribución y disponibilidad del agua.

Es necesario que el Estado invierta más en investigación y desarrollo en materia de cambio climático; que se establezcan mecanismos reales de compromiso en los involucrados con este fenómeno, y que se utilicen datos y modelos mexicanos en los procesos de planteamiento de escenarios.

El modelo SWAT trata de tener una estructura de menús claros. Sin embargo, el programa presenta muchos desafíos para el usuario. El mayor desafío es la preparación de los datos en un formato que sea aceptado por el programa. Es una herramienta eficaz en el cálculo del balance hídrico, simulando, incluso, zonas en donde había poca o nula información climática. Los procesos seguidos conforme al manual de SWAT y aplicando las experiencias publicadas en estudios previos como los realizados por Benavides, et al. (2008), Torres, et al. (2005), Proaño, et al. (2006) y Oñate, et al. (2003), permitieron modelar el comportamiento hidrológico modificando solo las variables climáticas de temperatura y precipitación, consiguiendo así conocer los procesos hídricos ante el cambio climático proyectado para los años 2030 y 2050 en los escenarios A2 y B2 del modelo CGCM.

Es importante mencionar que toda generación de escenarios climáticos regionales requiere considerar un cierto grado de incertidumbre. Para las proyecciones de cambio climático se requiere de un gran número de datos contenidos en las estaciones meteorológicas y el Estado de México carece de muchas de estos.

5.2 Conclusiones

El modelo CGCM bajo el escenario A2 proyectado para el año 2050 presentó el mayor aumento en el balance hídrico y todos sus componentes del ciclo hidrológico (precipitación, escurrimiento, flujo de retorno, evapotranspiración e infiltración), mientras que el modelo CGCM bajo el escenario B2 proyectado para el año 2050 presento menor porcentaje de aumento.

El modelo CGCM bajo el escenario A2 proyectado para el año 2030 presentó el mayor aumento en el balance hídrico y todos sus componentes del ciclo hidrológico (precipitación, escurrimiento, flujo de retorno, evapotranspiración e infiltración), mientras que el modelo CGCM bajo el escenario B2 proyectado para el año 2030 presento menor porcentaje de aumento.

El aumento en el porcentaje previsto para los escenarios A2 y B2 entre los años 2030 y 2050 no rebasa el 10% del total calculado en todos los componentes del ciclo hidrológico, lo cual indica que se mantendrán relativamente constantes si se conservarán las características físicas y no aumenta la urbanización en el Estado; sin embargo En diversas regiones del Estado de México, se registran ya condiciones de escasez que se espera se vean incrementadas, aún sin cambio climático, por efecto del crecimiento demográfico esperado, la creciente concentración urbana, la contaminación de cuerpos de agua y la sobreexplotación de los recursos hídricos, en particular los subterráneos, aunado a una pobre cultura en el cuidado y buen uso del recurso hídrico (IPCC, 2008).

La cuenca hidrológica más favorecida en cuanto al balance hídrico será la del Río Pánuco y las que presentarán valores similares a los del escenario base (2008) son las cuencas del Río Lerma y Balsas, no obstante, el Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático del Estado de México (2013-2018) indica que derivado del análisis de la extracción de agua por cuencas, muestra que los valles de Toluca y México, presentan sobreexplotación de los recursos subterráneos debido a diversos factores, entre ellos la alta concentración de población, la falta de infraestructura de almacenamiento para aprovechar recursos superficiales disponibles, los grandes volúmenes empleados en la agricultura de riego con métodos no tecnificados, la contaminación de las aguas superficiales, la falta de reúso de aguas residuales tratadas y la salida de aguas residuales sin tratamiento a cuencas vecinas.

El cambio climático modificará los procesos del balance hídrico en el Estado de México, a diferencia de las proyecciones calculada por el Centro de Ciencias de la Atmosfera (CCA) y el International Professional Communication Conference (IPCC) pronostican aumentos en las temperaturas y descensos en las precipitación; los resultados obtenidos con el modelo CGCM para los diferentes escenarios difieren en relación a la intensidad de los cambios que se presentarán, estos pronostican un incremento en la precipitación lo cual produce mayor cantidad de agua en todos los componentes del ciclo hidrológico y en el balance hídrico final.

El aumento en la precipitación en todos los escenarios comparados con el actual ocasionará según lo previsto el re-ingreso más rápido del agua a la atmosfera por la creciente evapotranspiración. Aunque la transpiración vegetal tiende a disminuir por talas y cambios de uso de suelo; la evaporación desde el suelo si puede aumentar por los mismos aspectos.

Los efectos del cambio climático causarán aumentos en el balance hídrico de los años 2030 y 2050 en el Estado de México, sin embargo, la distribución de este será desigual, pues el aumento de la disponibilidad de agua se concentrará solo en algunas zonas, ocasionando que las ciudades y poblaciones se vuelvan más vulnerables a los fenómenos hidrometeorológicos, así como al abastecimiento y distribución del agua.

La distribución del balance hídrico en las zonas con mayor disponibilidad de agua es muy similar entre los escenarios generados, pero hay una gran diferencia comparándolos con el escenario base (2008), es por esto la importancia de utilizar diferentes modelos y escenarios con el fin de evaluar los posibles cambios del futuro.

El modelo SWAT se presenta como una herramienta útil de diagnóstico de los recursos hídricos actuales y de posibles escenarios futuros, este permitió la evaluación de los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos del Estado de México, simulando los componentes necesarios para calcular el balance hídrico, lo que permite analizar medidas de protección, regulación y explotación del recurso.

Se puede concluir que el método es eficiente para poder realizar una primera estimación del balance hídrico, y conocer la cantidad de agua disponible en una o varias cuencas, lo cual resulta relevante para el manejo y planificación de los recursos del agua de una región determinada.

BIBLIOGRAFIA

- Aragón Hernández, José Luis. 2003. *Uso de Sistemas de Información Geográfica e hidrología, aplicados a un sistema de alerta hidrometeorológica*. Tesis de Licenciatura (Ingeniero Civil). Facultad de Ingeniería. UNAM. México, 25-45.
- Arrueta Antequera, Miriam Matilde. 2009. *Balance hídrico y análisis de las relaciones precipitación –escorrentía en la microcuenca de la Quebrada El Gallo, San Antonio de Oriente*. Tesis de Licenciatura (Ingeniero en Desarrollo Socioeconómico y Ambiente). Honduras. 26-35.
- Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J.P. 2008. *El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)*. Ginebra. 224 p.
- Belmonte Serrano, Francisco.2001. *Balance Hídrico, distribución de flujos y modelización de la interceptación de dos arbustos semiáridos mediante lluvia simulada; Papeles de Geografía*. Universidad de Murcia, España. 30-32.
- Benavides, J. de D., González, M., Valdez, J. 2008. *Oferta hídrica de la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco, orientada a los servicios ambientales*. Instituto de Ecología, A.C., México, Madera y Bosques, 5-28
- Campos Aranda, Daniel Francisco. 1992. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí. 6-21,6-42,1-13.
- Centro de Ciencias de la atmosfera, disponible en:
<http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico>. Consultado el 11 de noviembre de 2010.
- Centro virtual de información del Agua disponible en:
http://www.agua.org.mx/index.php?option=com_content&view=section&id=6&Itemid=28. Consultado el 11 de noviembre del 2010.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). *Estadísticas del Agua en México 2010*. Comisión Nacional del Agua México. 14-19.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). *Estadísticas del Agua en México 2018*. Comisión Nacional del Agua. México. 35p.
- Comisión Nacional del Agua. *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*, Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/PNH2014-2018.pdf>. Consultado el 24 de julio de 2016.
- Conde, C., R. M. Ferrer, C. Gay y R. Araujo, 2004. *Impactos del cambio climático en la agricultura de México*. En: Martínez, J. y A. Fernández Bremauntz (comps.), *Cambio Climático: una visión desde México*. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.20p.
- Conde, C.; Ferrer y S. Orozco. 2006. *Climate Change and climate variability impacts on rainfed agricultural activities and possible adaptation measures. A Mexican case study*. *Atmósfera*. 181-194.
- Conde, A. y Gay, C. 2008. *Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. 105p.
- Consejo de Cuenca del Valle de México (CCVM). Disponible en: <http://cuencavalledemexico.com/informacion/estatal/estado-de-mexico/disponibilidad-de-recursos-hidricos-2/>. Consultado el 11 de noviembre del 2010.
- Cotler, Helena, 2004. *El manejo Integral de Cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política Nacional*. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. 12, 21.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC). Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf> . Consultado el 26 de marzo de 2010.
- Dominguez, Serrano Judith. *La gobernanza del agua en México y el reto de la adaptación en zonas urbanas: El caso de la Ciudad de México*, disponible en: <http://www.atl.org.mx/seminario/images/stories/water/Gobernanz.pdf>. Consultado el 11 de noviembre del 2010.

- Estado de México. *Iniciativa ante el cambio climático en el Estado de México*. Disponible en:
http://portal2.edomex.gob.mx/sma/cuida_medioambiente/cambio_climatico/groups/public/documents/edomex_archivo/sma_pdf_iniciativa_cam_clima.pdf. Consultado el 11 de noviembre del 2010.
- Fischer, Manfred, 2006. *Analysis and Geocomputation*. Springer, Alemania.1-19.
- Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. *Balance Hídrico de la Cuenca del Río Pixquiac*. Disponible en:
http://www.fmcn.org/documentos/01_Anexo1_INFORME_BALANCE_HIDRICO.pdf. Consultado el 11 de noviembre del 2010.
- Hardy, J. 2003. *Climate Change: causes, effects and solutions*. Willey. USA. 77-83.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). *Gaceta no. 7*. Disponible en:
<http://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g07-11-2007/gaceta-imta-07.pdf>. Consultado el 15 noviembre 2009.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). *Balance Hídrico del Valle de México*. Anuario IMTA 2003. Disponible en:
<http://chac.imta.mx/instituto/historial-proyectos/th/2003/HDR1-Balance.pdf>. Consultado el 15 de noviembre del 2009.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.2007. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. Morelos. 7, 74, 75, 76, 85.
- Instituto Nacional de Ecología (INE). *Publicaciones*. Disponible en:
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/index.html>. Consultado el 11 de noviembre de 2010.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). *Anuario Estadístico del Estado de México 2007*. México. Disponible en:
http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/edomex/sombreado_ri.cfm?c=444&e=32. Consultado el 15 noviembre 2009.
- Jiménez, A. y Maderey L. 2005. "Modificaciones del ciclo del agua en la cuenca del Río Pánuco ante el cambio climático global". *Revista Geográfica* 135. UNAM. México. 35,43.

- Knapp B., Allen G. y Unwin L. 1979. *Elements of Geographical Hydrology*. Londres. 5,8.
- Llamas, Fernandez José Antonio. 1989. *Hidrología General, Principios y Aplicaciones*. UAEM. Toluca. 65-70, 301-313.
- Maderey, L. E.1994. *El Recurso Agua en la República Mexicana. Un breve análisis Geográfico*. Revista Geográfica, México.119, 133-163.
- Maderey, L.E. 2005. "Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico". Serie *Textos Universitarios, Núm. 1*, Instituto de Geografía, UNAM, México. 11p.
- Maderey, L.E.1972. *Balance hidrológico de la Cuenca del río Tizar. Durante el periodo 1967-1968*.UNAM. México. 74p.
- Maguire, David J., Batty Michael and Goodchild Michael F., 2005.*GIS, Spatial Analysis and Modeling*. ESRI PRESS, 19-36.
- Magaña R.V. 2004. *Los impactos del niño en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera*.Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México. 3p.
- Magaña, V. y Caetano, E. 2007. Informe final del proyecto: pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Universidad Autónoma de México. México. 19 p.
- Martínez, Austria P.F., 2007. *Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos de México. Volumen II. I*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México.37-102.
- Mata, H. 2008. *El modelo de simulación hidrológica SWAT aplicado en la cuenca del Río Amajac, Hidalgo, México*. Tesis de maestría (Maestría en Ciencias), Colegio de Postgraduados, Texcoco, México. 7-52.
- Mendoza, V.M., E. E. Villanueva y J. Adem, 1997. *Vulnerability of basins and watersheds in Mexico to global climate change*. Climate Research, Centro de Ciencias de la Atmósfera. México. 9, 139-145.

- Mendoza, A. 2005. *Determinación de la disponibilidad de agua en Tlaxcala para uso agrícola ante el cambio climático*. Tesis Maestría en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. 148p.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R. y Williams, J.R. (2004). *Soil and water assessment tool. Input/Output file documentation. Version 2005, Grassland Soil and Water Research Laboratory - Blackland Research Center Temple, Texas*. 530 p.
- Pan American Health Organization (PAHO), 2006. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bsacd50/escenarios/cp3.pdf>. Consultado el 3 de enero del 2010.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). 1997. *The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability*. 11, 2-5.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). 2001 *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Technical Summary Cambridge: WMO- UNEP. Cambridge University Press.
- Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Fourth Assessment Report: *Climate Change 2007. El Cambio climático y sus impactos a corto y largo plazo en diferentes escenarios*, disponible en: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/es/mains3.html. Consultado el 11 de noviembre del 2010.
- Programa Estatal de Acción ante el cambio climático del Estado de México 2013-2018. Disponible en: http://ieecc.edomex.gob.mx/sites/ieecc.edomex.gob.mx/files/files/PEACC/PEACC_EDOMEX.pdf. Consultado el 16 de Agosto de 2017.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. Williams y K.W. King. 2002. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version*. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, EUA. Disponible en: <http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2000theory.pdf>. Consultado el 3 de enero del 2010.

- Nicks, A.D. 1974. *Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall*. Washington, DC. 154-171.
- Ortiz, A. 2010. *Implementación del Modelo hidrológico SWAT: Modelación y simulación multitemporal de la variación de escorrentía en la cuenca del Lago Cuitzeo*. Tesis de Maestría en manejo Integrado del Paisaje. Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. 37-50.
- Preservación del patrimonio hídrico mexiquense. *Valores para una cultura del agua*, disponible en:
http://qacontent.edomex.gob.mx/idc/groups/public/documents/edomex_archivo/reconocer_pdf_en_torno104.pdf. Consultado el 3 de enero del 2010.
- Proaño, M., Gavilanes C. y Cisneros C. 2006. *Aplicación del Modelo SWAT en la subcuenca del Río Ambato*. Agrupación Grupo Randi. Ecuador. 32p.
- Sánchez, F.J. 2004. Medidas puntuales de permeabilidad. Disponible en:
<http://web.usal.es/javisan/hidro>. Consultado el 11 de agosto de 2010.
- Sánchez, Quispe Sonia T., Álvarez Andreu Joaquín y Solera Solera Abel. 2001. *Gestión de Recursos Hídricos con decisiones basadas en estimaciones de riesgo*. Universidad Politécnica de Valencia. España. 11-13.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales-Servicio Hidrológico Nacional, Balance Hídrico integrado y dinámico en el Salvador. El Salvador. Disponible en:
<http://www.snet.gob.sv/Documentos/balanceHidrico.pdf>. Consultado el 25 de marzo del 2010.
- Stephan, -Otto. 2003. *El agua en la Cuenca de México. Sus problemas históricos y perspectivas de solución*. Asociación Internacional de Investigación de Xochimilco. México. 207, 208.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2009. *Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones*. México. 93p.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Servicio Hidrológico Nacional. 2005. *Balance Hídrico integrado y dinámico en el Salvador*. San Salvador. Disponible en:
<http://www.snet.gob.sv/Documentos/balanceHidrico.pdf>. Consultado el 25 de marzo del 2010.

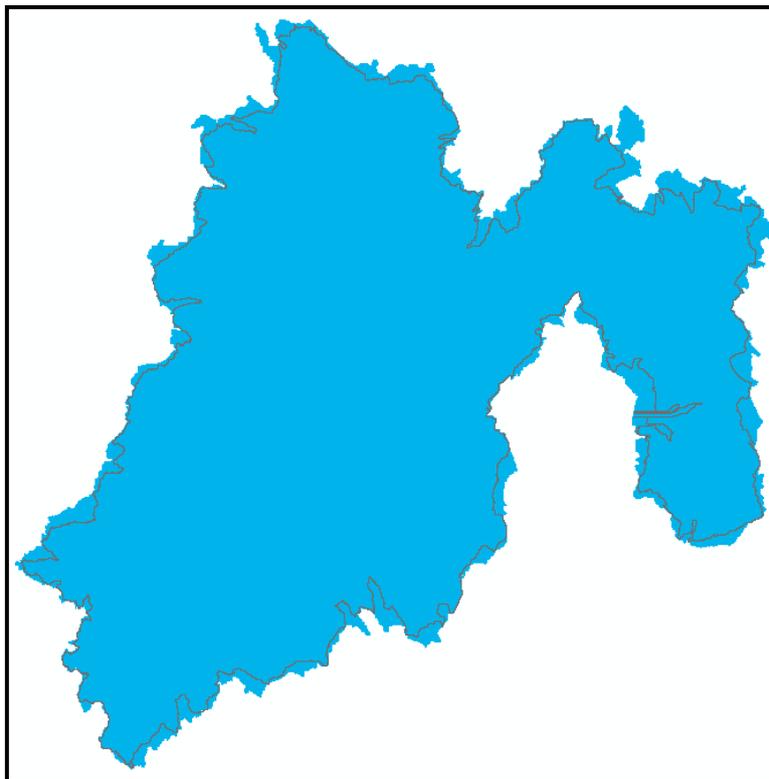
- Springall, R. 1970. *Hidrología*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 35,81, 84,133, 179, 3-10.
- Torres-Benites, E., Cotés-Becerra J., Exebio-García A., Mejía-Saenz E. y Palacios-Vélez E. 2005. *Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México*. Agrociencia. México. 39, 481-490.
- Torres-Benites, E., Fernandez-Reynoso D., Oropeza-Mota J., Mejía-Saenz E. 2004. *Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México*. Universidad Autónoma de Chapingo. Estado de México. 1-9.
- UICN-ORMA. 2003. *Adaptación de la gestión de los recursos hídricos al cambio climático*. Centro de Cooperación del Mediterráneo - Oficina Regional para Mesoamérica (UICN-ORMA). Costa Rica. 54p.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). *El Agua, una responsabilidad compartida 2007*. Disponible en: http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr2/case_studies/pdf/mexico_es.pdf. Consultado el 10 de junio de 2010.
- Ventura Ramos Eusebio. *Cuencas con déficit hídrico: estatus actual y futuro, medidas de mitigación y el uso más apropiado*. Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, disponible en: http://www.atl.org.mx/coloquio/images/stories/curricula/eusebio_ventura_ramosponesp.pdf. Consultado el 10 de junio de 2010.
- Vijay, P. Singh. (1995). *Environmental Hydrology*. EUA. 77-88.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D.D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses*. United States Department of Agriculture. Science and Education Administration. EUA. 58 pp.

ANEXOS

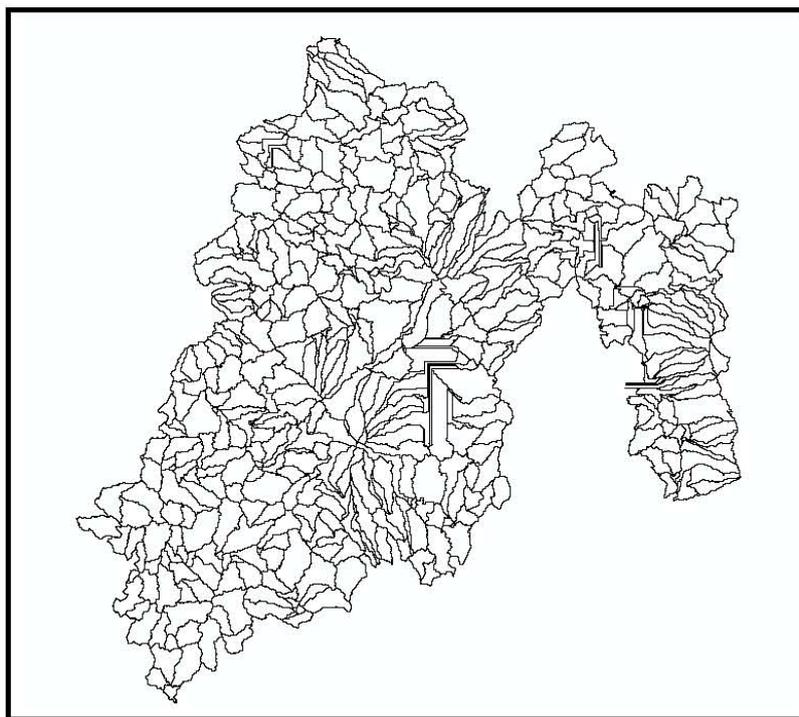
ANEXO A.- Coberturas genéricas utilizadas por SWAT.

Name	Plant Code	Origin of Plant Growth Values	Plant Type
Agricultural Land-Generic	AGRL	Grain Sorghum	Warm season annual
Agricultural Land-Row Crops	AGRR	Corn	Warm season annual
Agricultural Land-Close-grown	AGRC	Winter Wheat	Cool season annual
Orchard	ORCD	Apples	trees
Hay	HAY	Bermudagrass	perennial
Forest-mixed	FRST	Oak	trees
Forest-deciduous	FRSD	Oak	trees
Forest-evergreen	FRSE	Pine	trees
Wetlands	WETL	Alamo Switchgrass	perennial
Wetlands-forested	WETF	Oak	trees
Wetlands-nonforested	WETN	Alamo Switchgrass	perennial
Pasture	PAST	Bermudagrass	perennial
Summer pasture	SPAS	Bermudagrass	perennial
Winter pasture	WPAS	Fescue	perennial
Range-grasses	RNGE	Little Bluestem (LAI _{max} =2.5)	perennial
Range-brush	RNGB	Little Bluestem (LAI _{max} =2.0)	perennial
Range-southwestern US	SWRN	Little Bluestem (LAI _{max} =1.5)	perennial
Water	WATR		Not applicable

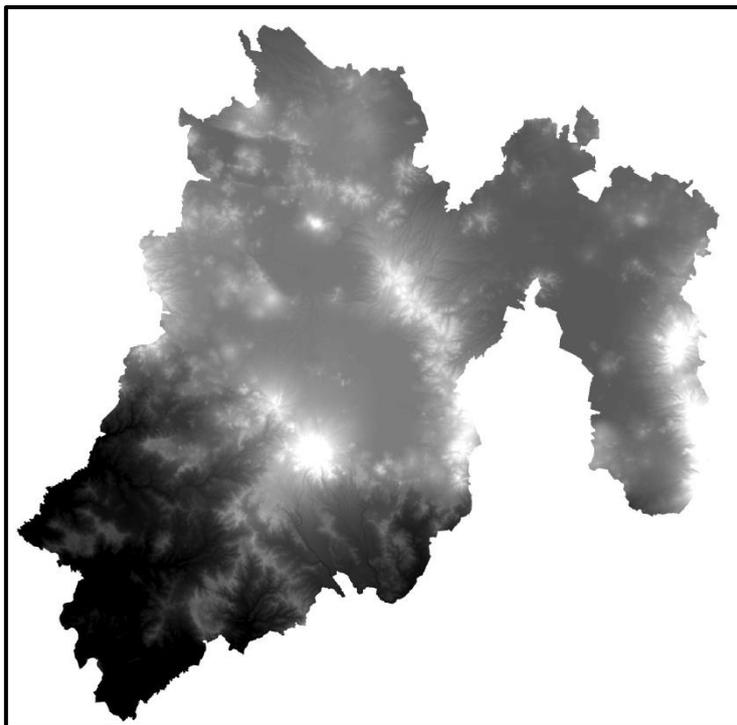
ANEXO B.- Máscara del área de estudio.



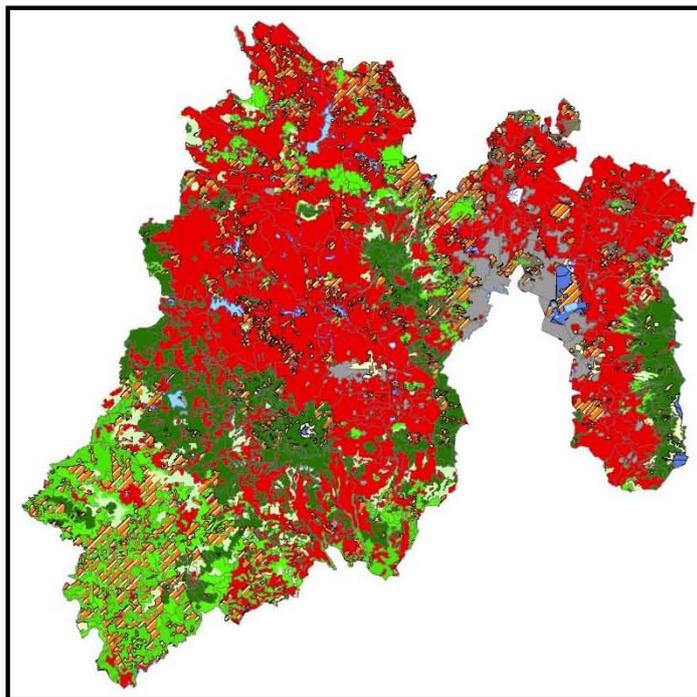
ANEXO C.- Subcuencas delimitadas por el modelo Swat.



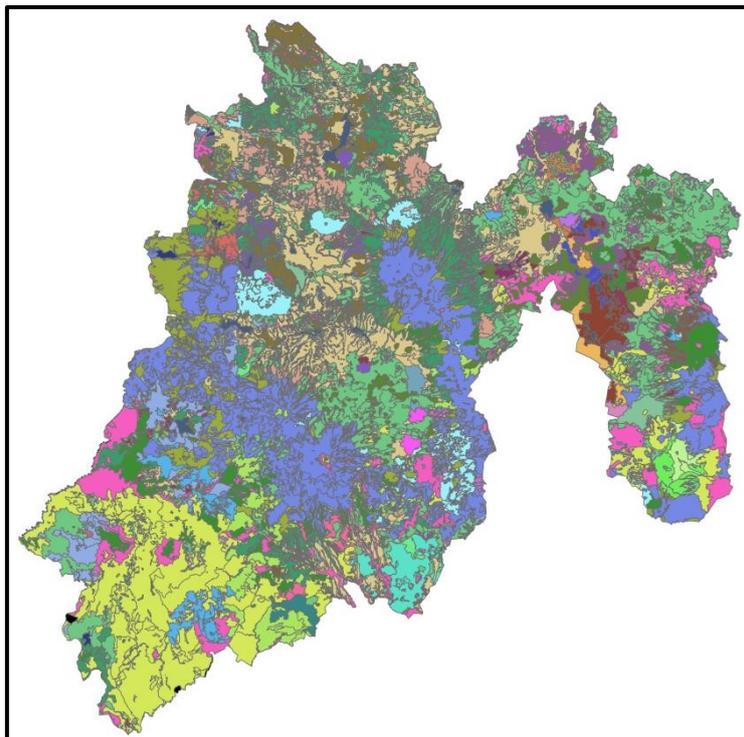
ANEXO D.- Modelo digital de elevación (MDE).



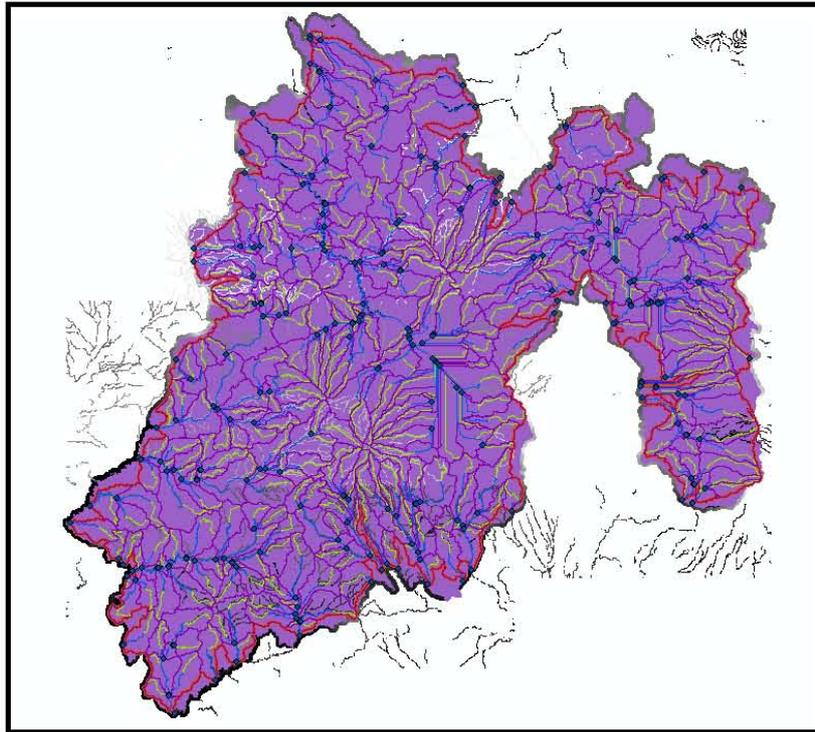
ANEXO E.- Cobertura del Terreno



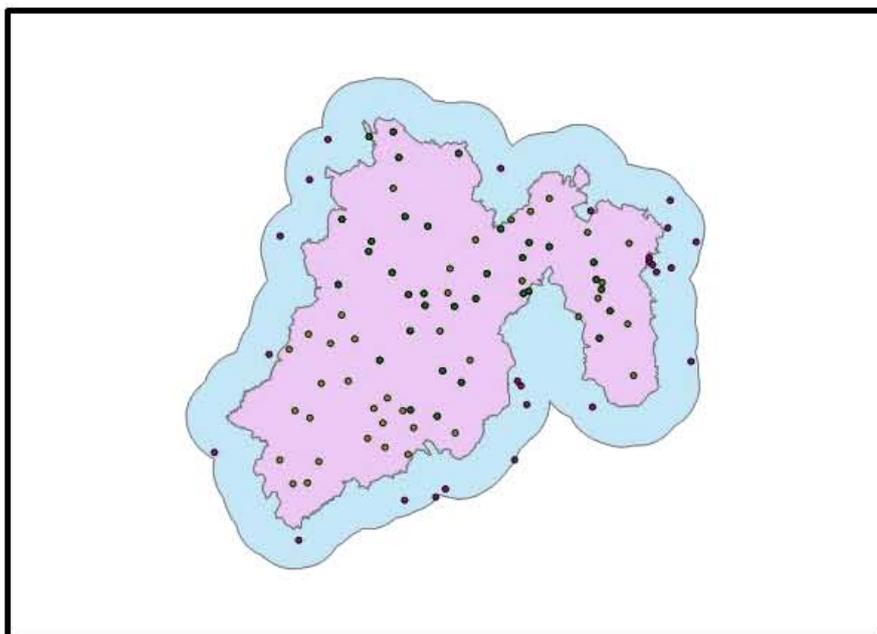
ANEXO F.- Suelos



ANEXO G.- Unidades de respuesta hidrológica (HRU) generadas por SWAT



ANEXO H.- estaciones del Estado de México y Estados colindantes (selección de 71 estaciones).



ANEXO I.- Comparación de los escenarios de precipitación.

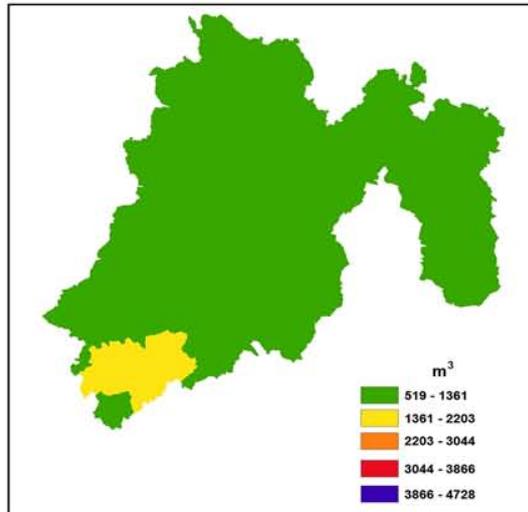


FIGURA 26: Distribución de la precipitación, escenario base (2008).

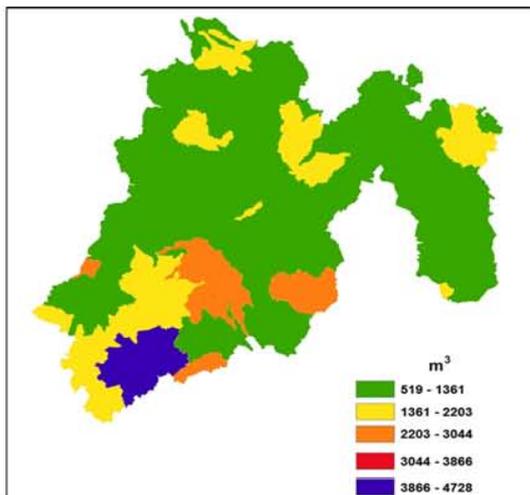


FIGURA 27: Distribución de la precipitación, escenario CGCM A2 año 2030.

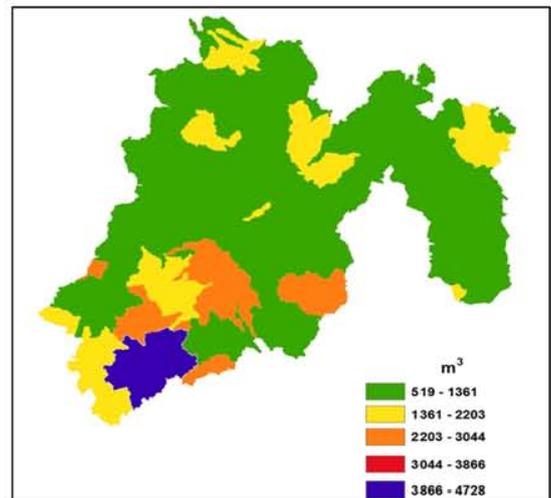


FIGURA 28: Distribución de la precipitación, escenario CGCM A2 año 2050.

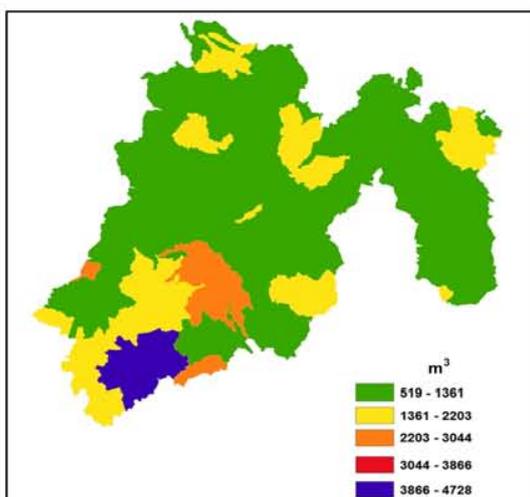


FIGURA 29: Distribución de la precipitación, escenario CGCM B2 año 2030.

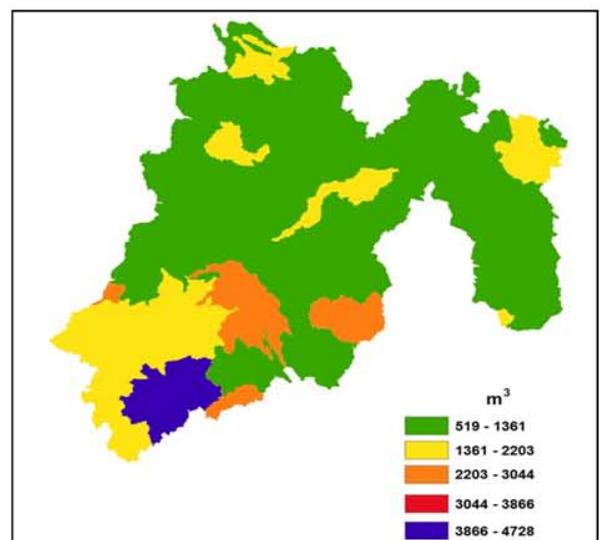


FIGURA 30: Distribución de la precipitación, escenario CGCM B2 año 2050.

ANEXO J.- Comparación de los escenarios de escorrentía.

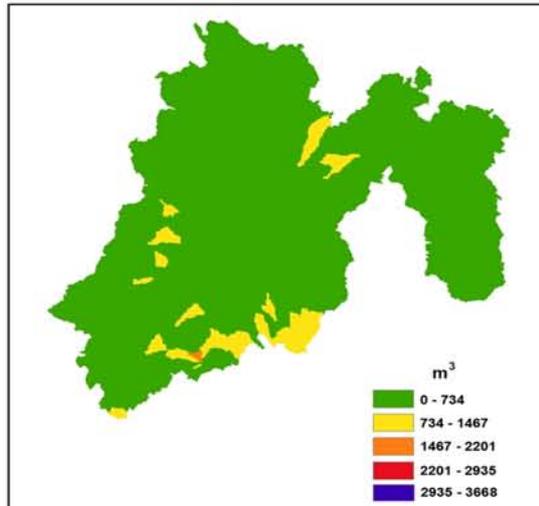


FIGURA 32: Distribución del escurrimiento, escenario base (2008).

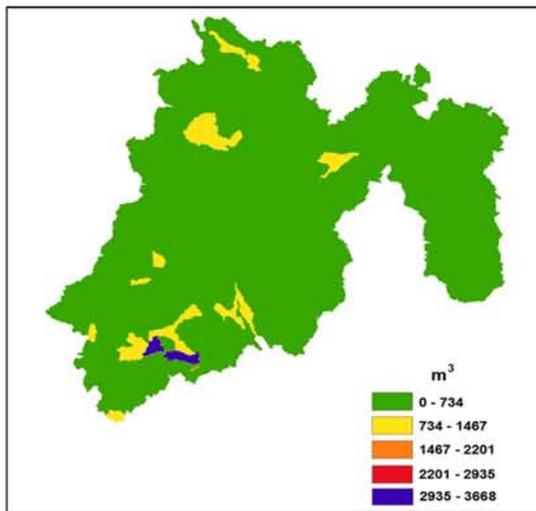


FIGURA 33: Distribución del escurrimiento, escenario CGCM A2 año 2030

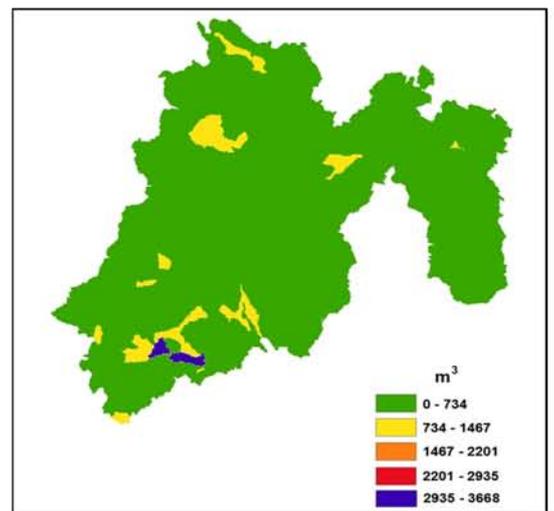


FIGURA 34: Distribución del escurrimiento, escenario CGCM A2 año 2050

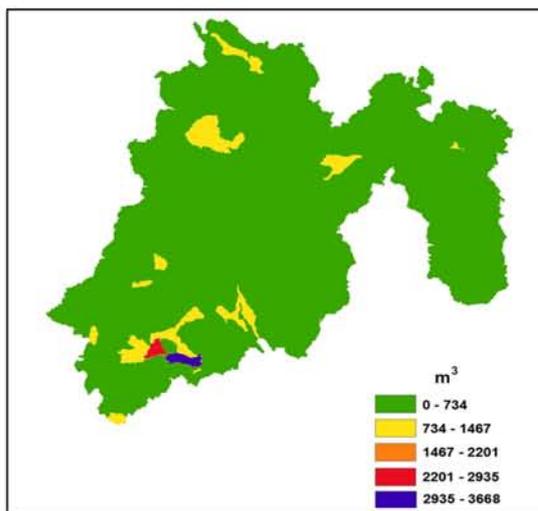


FIGURA 35: Distribución del escurrimiento, escenario CGCM B2 año 2030

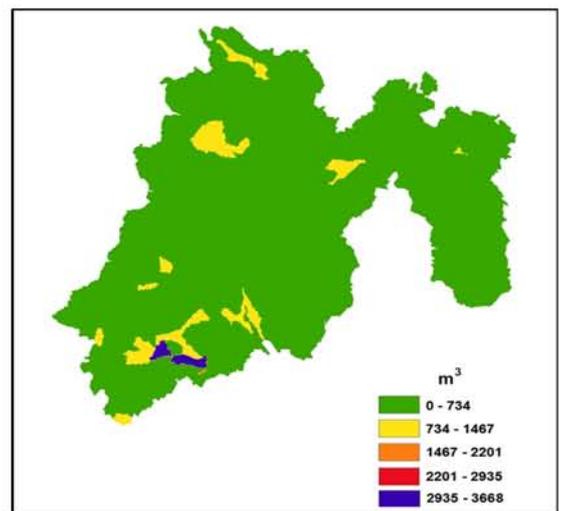


FIGURA 36: Distribución del escurrimiento, escenario CGCM B2 año 2050

ANEXO K.- Comparación de los escenarios de flujo de retorno.

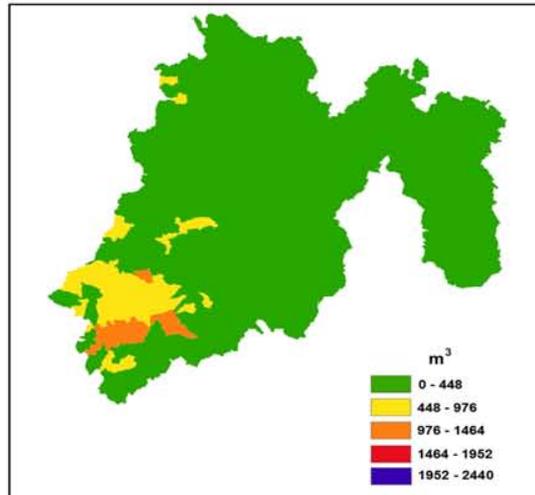


FIGURA 38: Distribución del flujo de retorno, escenario base (2008)

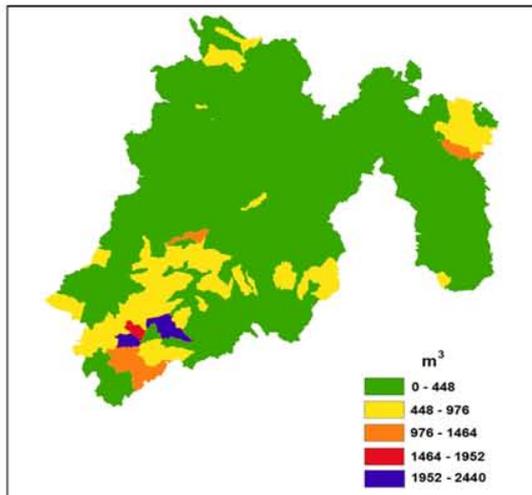


FIGURA 39: Distribución del flujo de retorno, escenario CGCM A2 año 2030

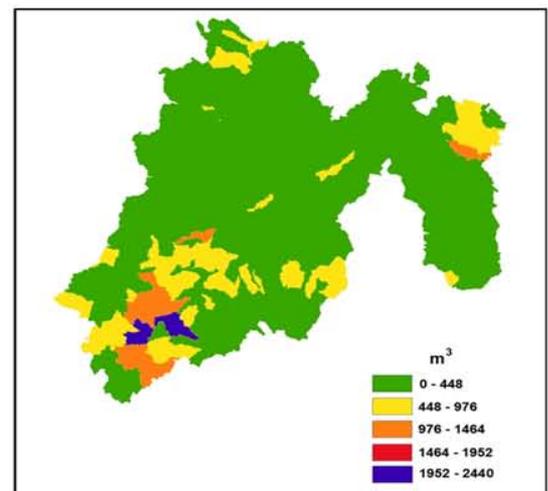


FIGURA 40: Distribución del flujo de retorno, escenario CGCM A2 año 2050.

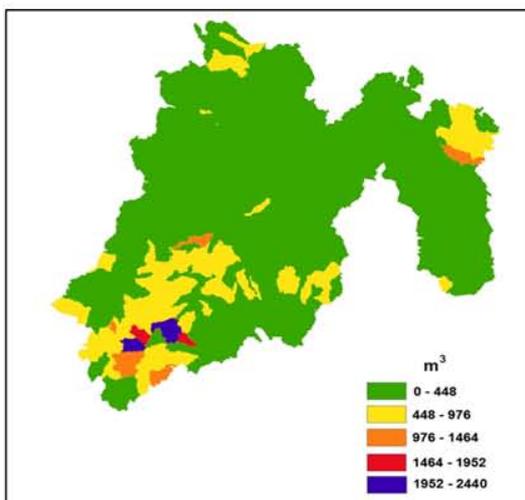


FIGURA 41: Distribución del flujo de retorno, escenario CGCM B2 año 2030

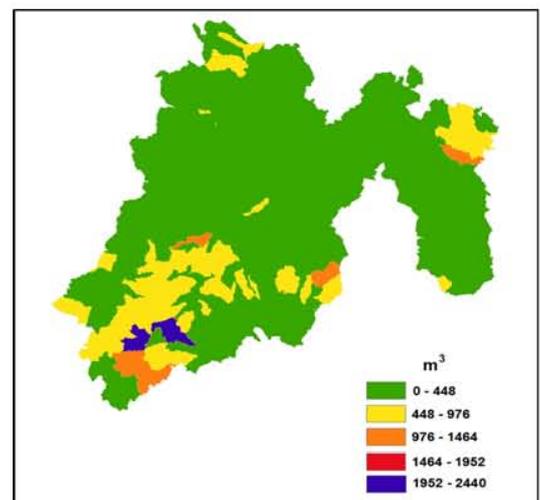


FIGURA 42: Distribución del flujo de retorno, escenario CGCM B2 año 2050

ANEXO L.- Comparación de los escenarios de evapotranspiración.

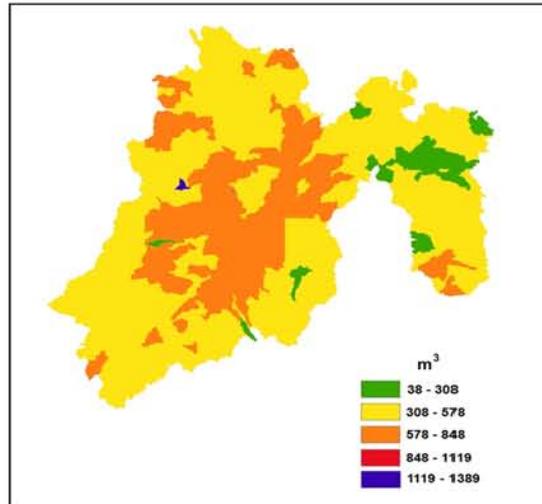


FIGURA 44: Distribución de la evapotranspiración, escenario base (2008).

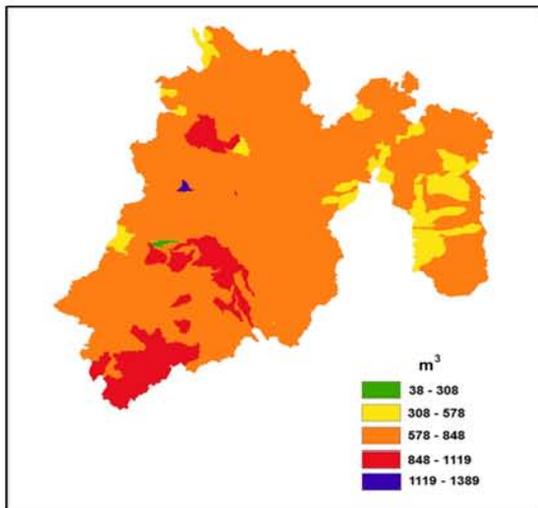


FIGURA 45: Distribución de la evapotranspiración, escenario CGCM A2 año 2030

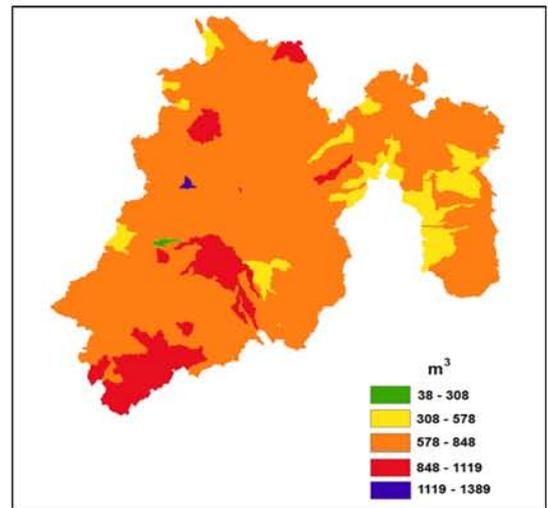


FIGURA 46: Distribución de la evapotranspiración, escenario CGCM A2 año 2050

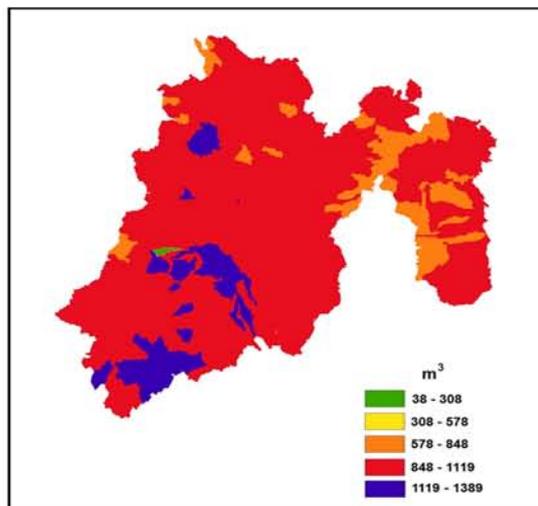


FIGURA 47: Distribución de la evapotranspiración, escenario CGCM B2 año 2030

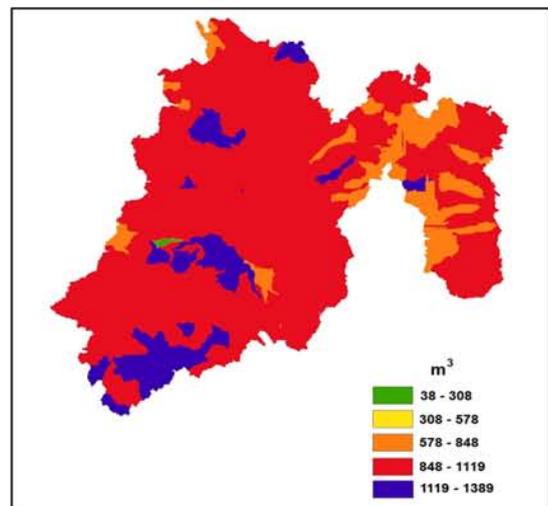


FIGURA 48: Distribución de la evapotranspiración, escenario CGCM B2 año 2050

ANEXO M.- Comparación de los escenarios de infiltración.

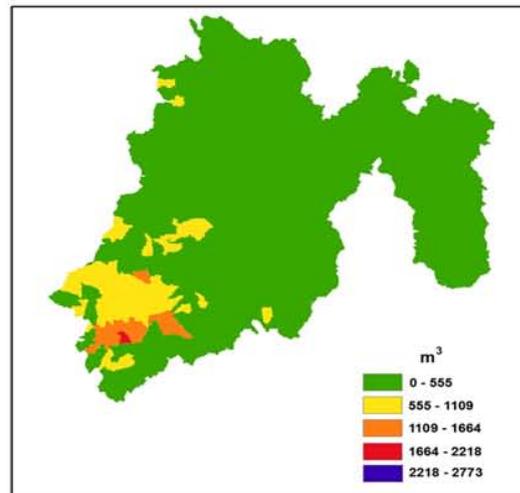


FIGURA 50: Distribución de la infiltración, escenario base (2008)

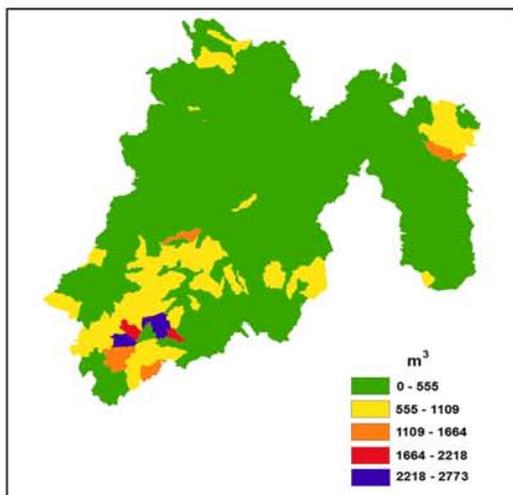


FIGURA 51: Distribución de la infiltración, escenario CGCM A2 año 2030.

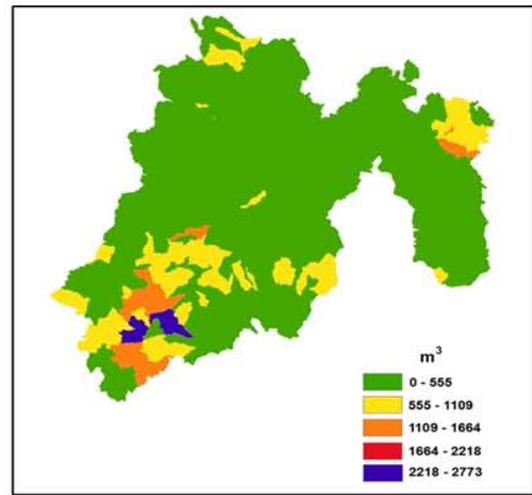


FIGURA 52: Distribución de la infiltración, escenario CGCM A2 año 2050

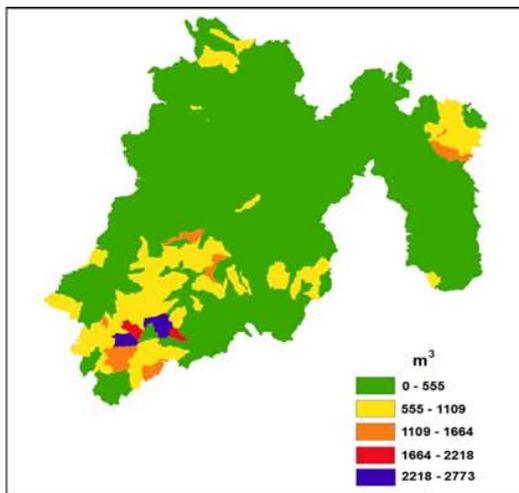


FIGURA 53: Distribución de la infiltración, escenario CGCM B2 año 2030.

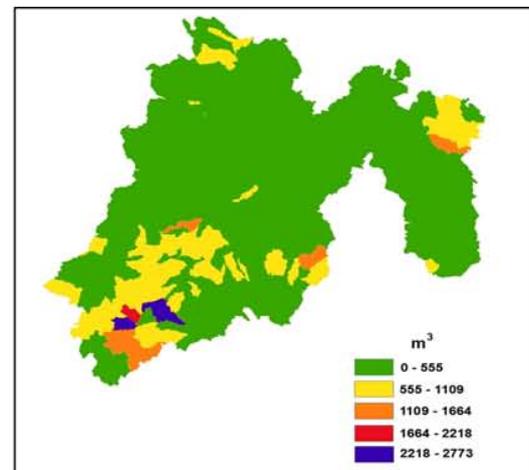


FIGURA 54: Distribución de la infiltración, escenario CGCM B2 año 2050

ANEXO N.- Comparación de los escenarios de balance hídrico.

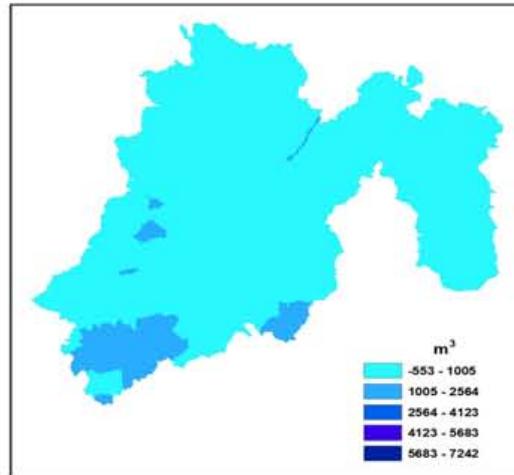


FIGURA 56: Distribución del Balance Hídrico, escenario base (2008)

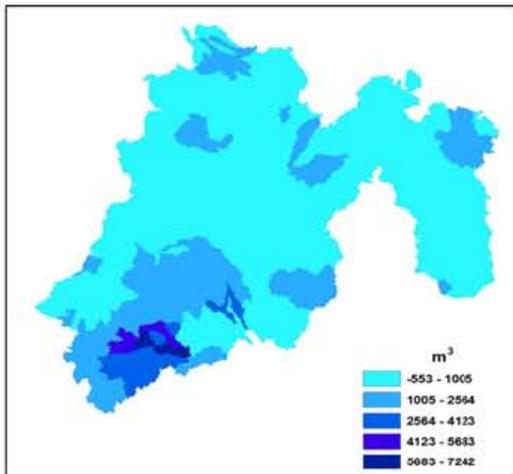


FIGURA 59: Distribución del Balance Hídrico, escenario CGCM A2 año 2030.

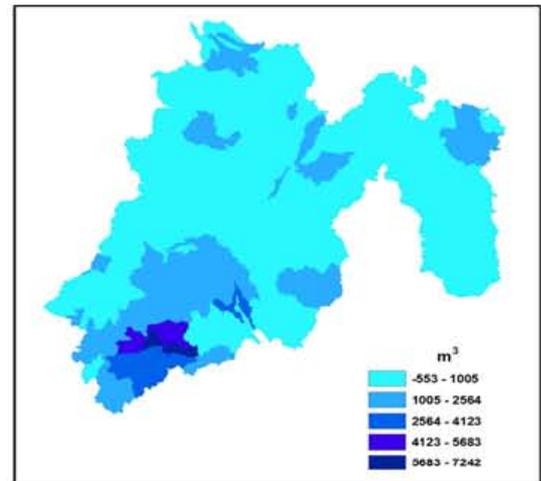


FIGURA 62: Distribución del Balance Hídrico, escenario CGCM A2 año 2050

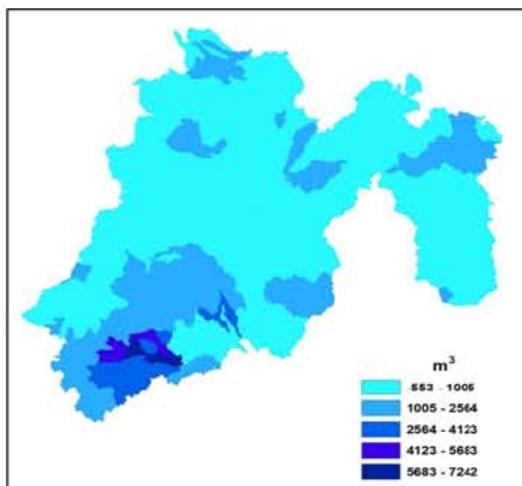


FIGURA 65: Distribución del Balance Hídrico, escenario CGCM B2 año 2030

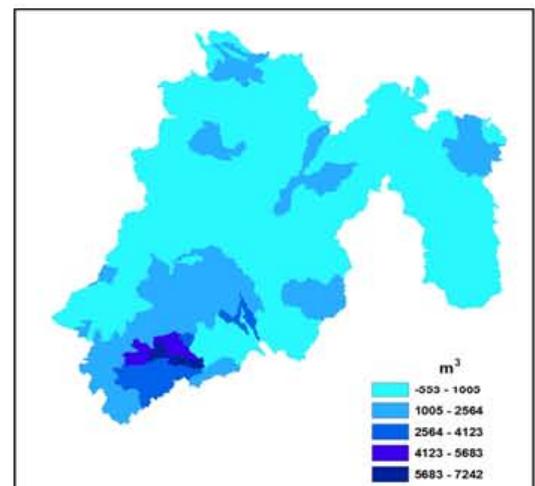


FIGURA 68: Distribución del Balance Hídrico, escenario CGCM B2 año 2050.