



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**BALANCE HÍDRICO DEL ESTADO DE COAHUILA BAJO  
ESCENARIOS FUTUROS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA:

**MARIO ALBERTO ORDOÑEZ RAZO**

DIRECTOR: GUSTAVO MANUEL CRUZ BELLO

CIUDAD UNIVERSITARIA, ABRIL DE 2011





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 Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Gobierno del estado de Coahuila, por las facilidades económicas otorgadas en la elaboración de este estudio.

Al Centro Nacional en Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), por permitirme utilizar sus instalaciones y su equipo de cómputo para poder elaborar la mayor parte del presente estudio.

A mi director de tesis, Dr. Gustavo Manuel Cruz Bello, por aportarme su tiempo y sus conocimientos durante la elaboración de este trabajo.

A mis sinodales, la Dra. Guadalupe Rebeca Granados Ramírez, el Ing. Jorge Gonzalo Sánchez Cabrera, el Lic. Jaime Morales y el Mtro. Efraín Velasco Bautista, por sus comentarios y sugerencias que fueron de gran utilidad para enriquecer este estudio.

## **DEDICATORIA**

A mi madre María de los Ángeles que siempre me ha brindado su apoyo en los momentos más importantes de mi vida.

A mis hermanos Stephanie y Luis, con los que he compartido momentos inolvidables, y que son una parte muy importante en cada uno de mis logros.

A mis tíos, Rosa y Víctor, que siempre me han brindado su confianza y apoyo, y que con su ejemplo me han impulsado a seguir adelante tanto en el ámbito académico como en el personal.

A mis mejores amigos, Aredi, Mariela y Carlos, por estar a mi lado en diferentes etapas de la carrera, con cada uno compartí momentos importantes que me motivaron a seguir adelante.

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes generales .....	2
1.2 Planteamiento del problema .....	3
1.3 Justificación del estudio .....	3
1.4 Objetivo general .....	4
1.5 Objetivos específicos .....	4
1.6 Hipótesis.....	4
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
2.1 Recursos hídricos y cambio climático .....	5
2.2 Balance hídrico.....	5
2.3 Modelos de simulación hidrológica .....	6
2.4 Modelo de Simulación Hidrológica SWAT .....	6
2.4.1 Bases teóricas del Modelo SWAT.....	7
2.4.1.1 Ciclo hidrológico .....	7
2.4.1.2 Precipitación.....	8
2.4.1.3 Escurrimiento superficial .....	8
2.4.1.4 Evapotranspiración.....	9
2.4.1.5 Percolación.....	10
2.4.1.6 Flujo de retorno .....	11
2.4.2 Información de entrada para SWAT.....	12
2.4.2.1 Base de datos de suelos .....	12
2.4.2.2 Base de datos de uso de suelo y vegetación .....	15
2.4.2.3 Base de datos estadísticos de clima.....	15
2.5 Cambio Climático .....	18
2.5.1 Cambio climático en México .....	19
2.6 Modelos de Circulación General de la Atmósfera.....	20
2.6.1 Modelo GFDL.....	20
2.6.2 Modelo HADGEM.....	21
2.7 Escenarios climáticos.....	21
2.7.1 Escenarios IEEE .....	22
2.8 Escenarios climáticos en México .....	24
2.9 Estudios relacionados .....	24
2.9.1 Cambio climático y recursos hídricos.....	25
2.9.2 Modelo de simulación hidrológica SWAT aplicado .....	26
<b>3. MARCO GEOGRÁFICO DEL ESTADO DE COAHUILA .....</b>	<b>28</b>
3.1 Ubicación geográfica.....	28
3.2 Población.....	29
3.3 Fisiografía.....	29
3.4 Clima .....	30
3.5 Hidrología.....	31

3.6 Edafología .....	32
3.7 Uso de suelo y vegetación .....	33
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>35</b>
4.1 Elaboración de bases de datos .....	35
4.1.1 Base de datos de suelos .....	35
4.1.2 Base de datos de clima .....	35
4.1.2.1 Bases de datos diarios de temperatura y precipitación .....	36
4.1.2.2 Bases de datos estadísticos de clima .....	36
4.2 Aplicación del modelo de simulación hidrológica SWAT .....	37
4.2.1 Generación de la cartografía digital .....	38
4.2.1.1 Modelo de Elevación Digital (DEM) .....	38
4.2.1.2 Máscara del área de estudio .....	38
4.2.1.3 Red hidrológica .....	38
4.2.1.4 Cobertura de suelos .....	38
4.2.1.5 Cobertura de uso de suelo y vegetación .....	39
4.2.2 Procesamiento de información en el modelo SWAT .....	40
4.2.2.1 Delineación de la cuenca y subcuencas .....	40
4.2.2.2 Definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica .....	41
4.2.2.3 Generador climático y archivos de entrada .....	41
4.2.2.4 Calibración del modelo .....	41
4.2.2.5 Simulación hidrológica .....	42
4.2.2.6 Salida de información .....	42
4.3 Cálculo del balance hídrico .....	43
4.4 Representación cartográfica del balance hídrico .....	44
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>45</b>
5.1 Escenario base (2006) .....	45
5.1.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca .....	45
5.1.2 Balance hídrico mensual .....	46
5.2 Escenario GFDL A2 año 2030 .....	47
5.2.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca .....	47
5.2.2 Balance hídrico mensual .....	49
5.3 Escenario GFDL B2 año 2030 .....	50
5.3.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca .....	50
5.3.2 Balance hídrico mensual .....	52
5.4 Escenario HADGEM A2 año 2030 .....	53
5.4.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca .....	53
5.4.2 Balance hídrico mensual .....	55
5.5 Escenario HADGEM B2 año 2030 .....	56
5.5.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca .....	56
5.5.2 Balance hídrico mensual .....	58
5.6 Escenario GFDL A2 año 2050 .....	59
5.6.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca .....	59
5.6.2 Balance hídrico mensual .....	61
5.7 Escenario GFDL B2 año 2050 .....	62
5.7.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca .....	62

5.7.2 Balance hídrico mensual .....	64
5.8 Escenario HADGEM A2 año 2050 .....	65
5.8.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca .....	65
5.8.2 Balance hídrico mensual .....	67
5.9 Escenario HADGEM B2 año 2050 .....	68
5.9.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca .....	68
5.9.2 Balance hídrico mensual .....	70
5.10 Variación de la temperatura media anual: escenario base (2006) y escenarios de los años 2030 y 2050 .....	71
5.11 Variaciones del balance hídrico anual en los escenarios simulados .....	72
5.11.1 Variación del balance hídrico: escenario base (2006) y escenarios del año 2030... 72	
5.11.2 Distribución estatal de las variaciones del balance hídrico de los escenarios del año 2030 con respecto al escenario base (2006) .....	73
5.11.3 Variación del balance hídrico: escenario base (2006) y escenarios del año 2050... 77	
5.11.4 Distribución estatal de las variaciones del balance hídrico de los escenarios del año 2050 con respecto al escenario base (2006) .....	77
5.12 Variaciones del balance hídrico mensual en los escenarios simulados .....	81
5.12.1 Balance hídrico del escenario base (2006) y escenarios del año 2030 .....	81
5.12.2 Balance hídrico del escenario base (2006) y escenarios del año 2050 .....	82
<b>6. DISCUSIÓN .....</b>	<b>84</b>
<b>7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>86</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>87</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>94</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de la cobertura de uso de suelo y vegetación.....	40
<b>Tabla 2.</b> Componentes del balance hídrico .....	43
<b>Tabla 3.</b> Rangos en hm <sup>3</sup> .....	44
<b>Tabla 4.</b> Variaciones en hm <sup>3</sup> .....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación geográfica y división municipal .....	28
<b>Figura 2.</b> Fisiografía.....	29
<b>Figura 3.</b> Clima .....	30
<b>Figura 4.</b> Regiones hidrológicas .....	32
<b>Figura 5.</b> Edafología .....	33
<b>Figura 6.</b> Uso de suelo y vegetación .....	34
<b>Figura 7.</b> Balance hídrico anual; escenario base (2006).....	45
<b>Figura 8.</b> Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario base (2006) .....	46
<b>Figura 9.</b> Balance hídrico mensual; escenario base (2006).....	47
<b>Figura 10.</b> Balance hídrico anual; escenario GFDL A2 año 2030.....	48
<b>Figura 11.</b> Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario GFDL A2 año 2030.....	49
<b>Figura 12.</b> Balance hídrico mensual; escenario GFDL A2 año 2030 .....	50
<b>Figura 13.</b> Balance hídrico anual; escenario GFDL B2 año 2030.....	51
<b>Figura 14.</b> Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario GFDL B2 año 2030.....	52
<b>Figura 15.</b> Balance hídrico mensual; escenario GFDL B2 año 2030 .....	53
<b>Figura 16.</b> Balance hídrico anual; escenario HADGEM A2 año 2030 .....	54
<b>Figura 17.</b> Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario HADGEM A2 año 2030 .....	55
<b>Figura 18.</b> Balance hídrico mensual; escenario HADGEM A2 año 2030.....	56
<b>Figura 19.</b> Balance hídrico anual; escenario HADGEM B2 año 2030 .....	57
<b>Figura 20.</b> Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario HADGEM B2 año 2030 .....	58
<b>Figura 21.</b> Balance hídrico mensual; escenario HADGEM B2 año 2030.....	59
<b>Figura 22.</b> Balance hídrico anual; escenario GFDL A2 año 2050.....	60
<b>Figura 23.</b> Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario GFDL A2 año 2050.....	61
<b>Figura 24.</b> Balance hídrico mensual; escenario GFDL A2 año 2050 .....	62
<b>Figura 25.</b> Balance hídrico anual; escenario GFDL B2 año 2050.....	63
<b>Figura 26.</b> Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario GFDL B2 año 2050.....	64
<b>Figura 27.</b> Balance hídrico mensual; escenario GFDL B2 año 2050 .....	65
<b>Figura 28.</b> Balance hídrico anual; escenario HADGEM A2 año 2050 .....	66
<b>Figura 29.</b> Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario HADGEM A2 año 2050 .....	67

<b>Figura 30.</b> Balance hídrico mensual; escenario HADGEM A2 año 2050.....	68
<b>Figura 31.</b> Balance hídrico anual; escenario HADGEM B2 año 2050 .....	69
<b>Figura 32.</b> Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario HADGEM B2 año 2050 .....	70
<b>Figura 33.</b> Balance hídrico mensual; escenario HADGEM B2 año 2050.....	71
<b>Figura 34.</b> Temperatura media anual escenario base (2006) y escenarios del año 2030.....	71
<b>Figura 35.</b> Temperatura media anual; escenario base (2006) y escenarios del año 2050.....	72
<b>Figura 36.</b> Balance hídrico; escenario base (2006) y escenarios del año 2030 .....	73
<b>Figura 37.</b> Variación del balance hídrico de los escenarios del año 2030 con respecto al escenario base (2006).....	75
<b>Figura 38.</b> Distribución estatal del balance hídrico; escenario base (2006) y escenarios del año 2030.....	76
<b>Figura 39.</b> Balance hídrico: escenario base (2006) y escenarios del año 2050 .....	77
<b>Figura 40.</b> Variaciones del balance hídrico de los escenarios del año 2050 con respecto al escenario base (2006).....	79
<b>Figura 41.</b> Distribución estatal del balance hídrico; escenario base (2006) y escenarios del año 2050.....	80
<b>Figura 42.</b> Variación del balance hídrico mensual; escenario base (2006) y escenarios del año 2030.....	82
<b>Figura 43.</b> Variación del balance hídrico mensual: escenario base (2006) y escenarios del año 2050.....	83

## **1. INTRODUCCIÓN**

El cambio climático y la reducida disponibilidad de agua potable son problemas que México tendrá que enfrentar en los próximos años, es por ello que forman parte de los Planes de Desarrollo impulsados por el Gobierno Federal. Los estudios relacionados con estos problemas son importantes para reducir los impactos económicos y sociales que estos podrían tener en el futuro (SHCP-SEMARNAT, 2009).

El presente estudio pretende evaluar la disponibilidad de agua natural o balance hídrico del estado de Coahuila en diferentes escenarios climáticos y temporales, desde el escenario base (2006) hasta los proyectados para los años 2030 y 2050. El estudio tiene como herramientas e información principales la cartografía digital publicada por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), la base de datos de las estaciones climáticas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el modelo de simulación hidrológica SWAT y la información de los escenarios climáticos desarrollados por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (CCA).

Este estudio forma parte del proyecto “Perspectivas sobre la climatología y disponibilidad de los recursos hídricos en el estado de Coahuila para los próximos años” desarrollado por el Centro Nacional en Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), y patrocinado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Gobierno del estado de Coahuila.

## **1.1 Antecedentes generales**

Según el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2007) existen registros de observaciones y proyecciones climáticas que proporcionan evidencia acerca de la vulnerabilidad de los recursos hídricos ante los impactos del cambio climático, con múltiples consecuencias para la sociedad y los ecosistemas. Algunos ejemplos de los impactos regionales proyectados por el IPCC para Latinoamérica son los siguientes:

A mediados de siglo, el aumento de la temperatura y la disminución de la humedad del suelo originaría la sustitución gradual de la cobertura vegetal en algunas zonas, por ejemplo, los bosques tropicales de la Amazonía serían sustituidos por sabanas y la vegetación de las regiones semiáridas sería sustituida por vegetación de tierras áridas.

Los cambios en el régimen de las precipitaciones y la desaparición de los glaciares afectarían notablemente a la disponibilidad de agua para consumo humano, agrícola e hidroeléctrico. Se reduciría la productividad de las actividades agrícolas y pecuarias con consecuencias adversas en la seguridad alimentaria.

En este contexto, el cambio climático y la disponibilidad de agua son temas de suma importancia para México, debido a las implicaciones que podría tener en el desarrollo de todos los sectores socioeconómicos del país. Es por ello que el Gobierno Federal los ha incluido en la gestión de los Planes y Programas de Desarrollo; siendo el Programa Especial de Cambio Climático (PECC, 2009) la iniciativa más importante, mediante la cual se diseñan estrategias de adaptación y mitigación ante los efectos que tendrá el cambio climático en nuestro país.

## **1.2 Planteamiento del problema**

El cambio climático constituye el principal desafío ambiental global de este siglo, en función de sus impactos previsibles sobre los recursos naturales, los procesos productivos, la infraestructura, la salud pública y, en general, sobre los diversos componentes que configuran el proceso de desarrollo de un país, región o localidad (PECC, 2009).

Coahuila al ser el tercer estado del país con menor precipitación (CONAGUA, 2009) podría ser vulnerable a los efectos del cambio climático, por ello la necesidad de conocer la situación actual de los recursos hídricos en el estado y con la aplicación de modelos y escenarios climáticos poder evaluar los impactos que tendrá el clima en los próximos años. Para ello en este estudio se plantea generar balances hídricos a nivel estatal con datos climáticos actuales y predichos para los años 2030 y 2050.

## **1.3 Justificación del estudio**

Los problemas de escasez de agua en México se han agravado en las últimas décadas (Sainz y Becerra, 2003), en la mayoría de las regiones áridas y semiáridas el agua constituye un recurso escaso cuya disponibilidad resulta esencial para el desarrollo económico y social (Blanco et al., 1998). Coahuila no es la excepción al ser uno de los estados con menor precipitación en el país (CONAGUA, 2009). Es importante conocer los impactos que tendrá el cambio climático sobre los recursos hídricos del estado, para ello es necesario generar escenarios de modificaciones futuras y aplicarlos a modelos de simulación hidrológica que permitan su evaluación en diferentes fechas. Con esto se espera generar información básica que permita diseñar estrategias para reducir los impactos del cambio climático global en los recursos hídricos del estado de Coahuila.

#### **1.4 Objetivo general**

Modelar el impacto del cambio climático en el balance hídrico del Estado de Coahuila.

#### **1.5 Objetivos específicos**

Modelar el comportamiento climático estatal generando escenarios de temperatura y precipitación para los años 2030 y 2050.

Realizar un balance hídrico del Estado de Coahuila para conocer su situación actual.

Evaluar el impacto que tendrá el cambio climático sobre los recursos hídricos del estado en los años 2030 y 2050.

#### **1.6 Hipótesis**

El cambio climático afectará la disponibilidad natural del agua en el Estado de Coahuila.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Recursos hídricos y cambio climático

Los registros de observaciones y las proyecciones climáticas aportan evidencia de que los recursos hídricos son vulnerables y pueden resultar gravemente afectados por el cambio climático (Bates, et al. 2008). De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2007), se prevé que muchas áreas semiáridas y áridas estarán particularmente expuestas a los efectos del cambio climático, y experimentarían una disminución de sus recursos hídricos.

Diversas estimaciones coinciden en que a finales de este siglo la temperatura aumentara de 3 a 4 °C, ocasionando alteraciones en la precipitación, principalmente en las regiones del norte del país. En estas regiones se esperan sequías más recurrentes y disminuciones en las lluvias y los escurrimientos, en algunas zonas esta reducción será cercana al 20%. La gestión del agua para algunas regiones con escasez natural, ya complicada por el crecimiento demográfico y económico, propondrá retos aún mayores como consecuencia del cambio climático (IMTA, 2007).

### 2.2 Balance hídrico

Es definido por Small, *et al.* (1989) como la forma en que la precipitación recibida en un lugar es transformada en evapotranspiración, escorrentía y cambios en las cantidades de agua almacenada en el suelo y las rocas (aguas subterráneas). La ecuación para calcular el balance hídrico es la siguiente:

$$P = E + R \pm S$$

Donde  $P$  es la precipitación,  $E$  es la evapotranspiración,  $R$  es la escorrentía y  $S$  representa los cambios de volumen almacenado en el suelo durante un periodo de tiempo.

El balance hídrico provee información muy útil en la planeación y el manejo de los recursos hídricos, facilitando la estimación de la disponibilidad de agua en las cuencas hidrológicas (Lafragua, *et al.* 2003).

Para Thomas y Goudie (2000), el balance hídrico resume los cambios en los componentes del ciclo hidrológico durante un período de tiempo determinado. Y el conocimiento de su estructura es fundamental para conseguir un uso más racional de los recursos hídricos, así como para mejorar el control y redistribución de los mismos (Sokolov y Chapman, 1981).

### **2.3 Modelos de simulación hidrológica**

Benavides, *et al.* (2008) define a los modelos de simulación hidrológica como representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales que permiten estudiar el funcionamiento de los mismos y las respuestas a diferentes factores incorporados al modelo y a las modificaciones de sus componentes. En general, los modelos hidrológicos funcionan a nivel de cuencas y subcuencas teniendo cinco componentes básicos: 1) los procesos y características hidrológicas de las cuencas; 2) los datos de entrada; 3) las ecuaciones gobernantes; 4) los límites y condiciones iniciales, y 5) las salidas.

En la actualidad los modelos de simulación hidrológica son una herramienta ampliamente utilizada para la planificación del uso de la tierra y el ordenamiento territorial de cuencas hidrográficas, permitiendo analizar su respuesta a diferentes alternativas de manejo (Oñate, *et al.* 2007).

### **2.4 Modelo de Simulación Hidrológica SWAT**

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold, *et al.* 1998) desarrollado por el Departamento de Agricultura de los EUA y la Universidad de Texas. Es un modelo a escala de cuenca que permite predecir el impacto de las prácticas de gestión

de la tierra sobre el agua, los sedimentos, y los movimientos de productos químicos agrícolas en cuencas hidrográficas complejas con variables en los tipos de suelos, de uso de la tierra, y de las condiciones de gestión para largos periodos de tiempo (Winchel, *et al.* 2007).

El modelo SWAT se basa en la ecuación de balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en una cuenca. Es un modelo hidrológico continuo con una resolución temporal de un día y tiene la capacidad de simular simultáneamente varias subcuencas (hasta 2,500) por un período de 100 años o más (Bravo, *et al.* 2000). En el proceso de simulación, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos (Bonini, *et al.* 2009). El modelo trabaja con las denominadas Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), que son áreas definidas con una combinación única de tipo de suelo, uso de suelo y vegetación y otras condiciones hidrológicas que el modelo asume que tendrán una respuesta única referente al flujo de agua y transporte de sedimentos (CODESAN, 2006). SWAT permite simular el cambio climático mediante la manipulación de la entrada de información climática, correspondiente a las variables de precipitación, temperatura, evapotranspiración potencial, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento.

## **2.4.1 Bases teóricas del Modelo SWAT**

### **2.4.1.1 Ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico, es definido por Sánchez (2004) como el movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea, es el componente principal que simula el modelo y es calculado mediante la ecuación de balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

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  $i$  (mm);  $Q_{surf}$  es el escurrimiento superficial en el día  $i$  (mm);  $E_a$  es la evapotranspiración en el día  $i$  (mm);  $W_{seep}$  es la percolación en el día  $i$  (mm);  $Q_{gw}$  es el escurrimiento superficial que regresa al cauce (flujo de retorno) en el día  $i$  (mm).

#### **2.4.1.2 Precipitación**

La precipitación es el agua que cae en una zona determinada, como una cuenca o subcuenca y puede ocurrir como lluvia, neblina, nieve, rocío, etc. La cantidad de precipitación puede ser registrada de forma diaria, mensual o anual (OMM, 1994). Su medición genera la información más importante para el cálculo del balance hídrico (Inclán, *et al.* 2008).

#### **2.4.1.3 Escurrimiento superficial**

El escurrimiento superficial es la parte de la precipitación que fluye sobre la superficie hacia cuerpos de agua y se obtiene cuando la cantidad de agua que llega al suelo sobrepasa las demandas inmediatas de infiltración, evaporación y almacenamiento superficial. El escurrimiento superficial se calcula por el método de la Curva Numérica desarrollado por el Servicio de Agricultura de los EUA (USDA por sus siglas en inglés), se fundamenta en que la escorrentía está determinada por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en este se realice. La ecuación es definida como:

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

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 interceptación e infiltración antes de la escorrentía (mm), y  $S$  es el parámetro de

retención (mm), el parámetro de retención varía espacialmente por cambios en los tipos de suelo, de uso de suelo, de gestión y de pendiente y temporalmente por los cambios en el contenido de agua del suelo. El parámetro de retención se define 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  $0.2 S$  y la ecuación se convierte en:

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

La escorrentía solo ocurrirá cuando  $R_{day} > I_a$

#### 2.4.1.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración es la cantidad de agua que retorna a la atmósfera, tanto por transpiración de la vegetación como por evaporación del suelo y cuerpos de agua. Su magnitud depende del agua disponible, es decir la que el suelo ha logrado retener para el consumo de la vegetación, así como la que ha sido interceptada por ésta (Inclán, *et al.* 2008). El modelo utiliza tres métodos para el cálculo de la evapotranspiración potencial: el método Penman-Monteith, 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. En 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  $\lambda E$  es el calor latente de densidad de flujo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $E$  es la tasa de evaporación de profundidad ( $\text{mm d}^{-1}$ ),  $\Delta$  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 ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $\rho_{air}$  es la densidad del aire ( $\text{Kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  es el calor específico a presión constante ( $\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $e_z^0$  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),  $\gamma$  es la constante psicrométrica ( $\text{KPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $r_c$  es la resistencia del dosel de la planta ( $\text{s m}^{-1}$ ), and  $r_a$  es la resistencia a la difusión de la capa de aire (resistencia aerodinámica) ( $\text{s m}^{-1}$ ).

#### 2.4.1.5 Percolación

El agua se mueve hacia el manto freático por filtración, una vez en él, el movimiento lento que adquiere al llegar a la zona de saturación se llama percolación (Maderey, 2005). La cual SWAT considera entre 0 y 2 m. La percolación se calcula para cada capa de suelo y se utilizan varias ecuaciones de acuerdo a la textura y a 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 como sigue:

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

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), 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 siguiente capa 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),  $\Delta t$  es la longitud del paso de tiempo (hrs), y  $TT_{perc}$  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), y  $SAT_{ly+1}$  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 como sigue:

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

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 a capacidad de campo (mm), and  $K_{sat}$  es la conductividad hidráulica de la capa saturada (mm·h<sup>-1</sup>).

#### 2.4.1.6 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.

## **2.4.2 Información de entrada para SWAT**

### **2.4.2.1 Base de datos de suelos**

La base datos de suelos utilizada por SWAT contiene información sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos del área en estudio. 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 productos químicos en el suelo. Si bien se requieren 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:

Número de capas que contiene el perfil del suelo. Se pueden ingresar de 1 a 10 capas.

Grupo hidrológico del suelo (A, B, C o D) conforme a la clasificación del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de U.S. (NRCS) basada en las características de infiltración de los suelos.

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.

La profundidad desde la superficie del suelo hasta la parte inferior de cada capa (mm).

La densidad aparente húmeda ( $\text{mg}/\text{m}^3$  o  $\text{g}/\text{cm}^3$ ). La densidad aparente del suelo expresa la relación entre la masa de partículas sólidas y el volumen total del suelo:

$$\rho_b = M_s/V_t$$

En donde  $\rho_b$  es la densidad aparente,  $M_s$  la masa de partículas sólidas y  $V_t$  el volumen total del suelo. Los valores de densidad aparente deberían estar entre 1.1 y 1.9  $\text{mg/m}^3$ .

Capacidad de agua disponible en la capa del suelo (mm del suelo  $\text{H}_2\text{O}/\text{mm}$ ). 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, y  $WP$  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).

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.

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.

Contenido de arcilla (% del peso del suelo). El porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro equivalente y menor a 0.002 mm.

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.

Contenido de arena (% del peso del suelo). El porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro entre 2.0 y 0.05 mm.

Contenido fragmento de roca (% del peso total). El porcentaje de la muestra que tiene un diámetro de partículas superior a 2 mm.

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.

Factor de erosionabilidad del suelo ( $USLE_K$ ). 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 tasa de pérdida de suelo por erosión de la unidad de entrada para un suelo determinado, 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 2 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, y  $c_{perm}$  es la clase de permeabilidad.

El parámetro de tamaño de las partículas ( $M$ ), es calculado como sigue:

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

Donde  $m_{silt}$  es el porcentaje de contenido de arena,  $m_{vfs}$  es el porcentaje de contenido de limo, y  $m_c$  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.

#### **2.4.2.2 Base de datos de uso de suelo y vegetación**

La base de datos de uso de suelo y vegetación contiene la información necesaria 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, p. 438) (Anexo 1).

#### **2.4.2.3 Base de datos estadísticos de clima**

La entrada de datos estadísticos de clima permite a 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/m<sup>2</sup>/día), temperatura del punto de rocío (°C) y velocidad del viento (m/s). Para el cálculo se utiliza una ecuación general, en este caso aplicada a la precipitación:

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

Donde  $\mu mx_{mon}$  es la temperatura media máxima diaria del mes (°C),  $T_{mx,mon}$  es la temperatura máxima diaria en el registro  $d$  en el mes  $mon$  (°C), y  $N$  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, en este caso aplicándola a la temperatura máxima, es la siguiente:

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

Donde  $\sigma mx_{mon}$  es la desviación estándar de la temperatura máxima diaria en el mes  $mon$  (°C),  $T_{mx,mon}$  es la temperatura máxima diaria en el registro  $d$  en el mes  $mon$  (°C),  $\mu mx_{mon}$  es el promedio de temperatura máxima diaria en el mes (°C), y  $N$  es el número total de registros diarios de temperatura máxima para el mes  $mon$ .

Coefficiente de asimetría o sesgo mensual, solo es requerido para la precipitación diaria del mes y se calcula con la siguiente fórmula:

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

Donde  $g_{mon}$  es el coeficiente de sesgo de la precipitación en el mes, el  $N$  es el número total de registros de precipitación diaria para el mes  $mon$ ,  $R_{day,mon}$  es la cantidad de precipitación para el registro  $d$  en el mes  $mon$  (mm),  $\bar{R}_{mon}$  es la precipitación media en el mes (mm), y  $\sigma_{mon}$  es la desviación estándar de la precipitación diaria en el mes  $mon$  (mm). Los valores de precipitación diaria de 0 mm se incluyen en el cálculo del sesgo.

Probabilidades de precipitación. 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, y  $days_{dry,i}$  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, y  $days_{wet,i}$  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, y  $yrs$  es el número de años de registros.

## 2.5 Cambio Climático

El cambio climático es definido por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo. La CMCC distingue entre cambio climático atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y variabilidad climática atribuida a causas naturales.

El Cuarto Informe de Evaluación (CIE) publicado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) confirma que el cambio climático es ya una realidad, fundamentalmente por efecto de las actividades humanas; ilustra los impactos del calentamiento mundial actual y el que se prevé existirá en el futuro, y el potencial de adaptación de la sociedad para reducir su vulnerabilidad; y, por último, ofrece un análisis de los costos, políticas y tecnologías con el fin de limitar la magnitud de los impactos del cambio climático (IPCC, 2007).

Los cambios en el clima están conduciendo a regímenes hídricos más inestables y variables alrededor del mundo. Las proyecciones indican que estos cambios irán acompañados tanto de incrementos como de disminuciones en las precipitaciones, y estas, variaran dependiendo las características de cada región (UICN-ORMA, 2003).

### **2.5.1 Cambio climático en México**

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 plazos, 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. Así, en el año de 2005, con el objetivo de coordinar la formulación de políticas de acción ante los efectos del cambio climático a nivel nacional, crea la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC) integrada por los titulares de las Secretarías de Medio Ambiente y Recursos Naturales (quien la preside); Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación; Comunicaciones y Transportes; Economía; Desarrollo Social; Energía; y Relaciones Exteriores. La Secretaría de Hacienda y Crédito Público participa en sus reuniones de manera permanente (SEMARNAT, 2010).

La CICC ha publicado tres documentos que han definido las políticas y estrategias relacionadas con el cambio climático en México: Hacia una Estrategia Nacional de Acción Climática (HENAC, 2006), en donde se definen los criterios que seguirá la política estatal para evaluar los impactos del cambio climático en México; la Estrategia Nacional de Acción Climática (ENACC, 2007); y finalmente el Programa Especial de Cambio Climático (PECC, 2009) que toma como fundamentos el ENACC y El Cuarto Informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) publicado en 2007 (PECC-ANEXOS, 2009).

El PECC es el programa que compromete a las dependencias del Gobierno Federal a instrumentar políticas transversales con objetivos y metas vinculadas a la mitigación y adaptación al cambio climático para el periodo 2009-2012. El PECC pretende impulsar el desarrollo sustentable, la seguridad energética, los procesos productivos limpios, eficientes y competitivos, y la preservación de los recursos naturales. En el programa se consideran cuatro componentes fundamentales: visión de largo plazo, mitigación, adaptación y elementos de política transversal. “A través del PECC, el Gobierno de México se dispone a demostrar que es posible mitigar el cambio climático y adaptarse,

sin comprometer el proceso de desarrollo, e incluso con beneficio económico” (PECC 2009).

## **2.6 Modelos de Circulación General de la Atmósfera**

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG) se basan en leyes fundamentales de la física y simulan una gran variedad de los procesos que ocurren entre los diversos subsistemas climáticos en diferentes escalas de espacio y tiempo (Conde y Gay, 2008). Los MGC son algoritmos matemáticos que intentan simular el sistema climático de la tierra, las expresiones matemáticas que los configuran se pueden analizar dentro de tres partes principales de que constan estos modelos: (1) la dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía y momentum; (2) la física del sistema climático tal como transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, y la evaporación; y (3) otros factores tales como la interacción océano-atmósfera, topografía y vegetación (SEDAC, 2010).

Los MCG 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 (tal como la concentración de los gases de efecto invernadero). Los MCG funcionan a una escala global y tienen una baja resolución por lo que no son muy indicados para estudios e investigación de zonas específicas. Para determinar el clima de una zona es necesario el uso de un modelo regional que permita tener mayores resoluciones. Así, para determinar el clima se hace un proceso de regionalización que consiste en utilizar dos modelos uno global, el cual da las condiciones de frontera, y otro regional (PAHO, 2010).

### **2.6.1 Modelo GFDL**

El modelo GFDL, desarrollado por el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory de Estados Unidos, es un modelo espectral con resolución aproximada de 2.25° por latitud

y 3.75° por longitud y es compatible con los escenarios A2 y B2 del IPCC. Tiene 14 niveles en la vertical y consta con una orografía realista y variación estacional de la radiación, de la temperatura superficial de agua de mar así como el hielo marino. El efecto de las nubes, dióxido de carbono y ozono están incluidos en el cálculo de la radiación solar. El ozono es especificado como una función de la latitud, altura y estación astronómica basada en observaciones (CONAMA, 2006).

### **2.6.2 Modelo HADGEM**

El modelo HADGEM, también conocido como modelo HADLEY o HadCM3 fue desarrollado por el Hadley Center para la predicción climática e investigación, de Inglaterra y es funcional con los escenarios A2 y B2 del IPCC. Es un modelo acoplado océano-atmósfera con una climatología de control estable. La componente atmosférica del modelo tiene 19 niveles con una resolución horizontal de 2.5° de latitud con 3.75 ° de longitud, los cuales producen una grilla global de 96 x 73; esto es 278 Km en 45° de latitud, comparable con una resolución T42. La componente atmosférica del modelo opcionalmente permite la simulación interactiva de emisión, transporte, oxidación y deposición de los componentes sulfúricos. La componente oceánica del HADGEM tiene 20 niveles con una resolución horizontal de 1.25° X 1.25°, la cual hace posible la representación de importantes detalles de la estructura normal oceánica. El modelo es inicializado directamente del estado observado del océano en reposo con un adecuado estado atmosférico y del hielo oceánico (CONAMA, 2006).

### **2.7 Escenarios climáticos**

El IPCC (2001) define a los escenarios climáticos como la “Representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirve a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos”.

La generación de escenarios de cambio climático parte de “escenarios base”, que son las condiciones climáticas observadas, generalmente, durante un periodo de treinta años, y de las relaciones entre las condiciones futuras sobre emisiones de gases de efecto invernadero y las condiciones socioeconómicas futuras. Estos escenarios son aplicados con diferentes Modelos de Circulación General para generar proyecciones de variables climáticas futuras (Palma, et al. 2007).

El IPCC publica de forma periódica escenarios climáticos que sirven como base para generar proyecciones de cambio climático en diferentes escalas de tiempo y para distintas condiciones sociales y económicas en el mundo, los escenarios propuestos por el IPCC son los llamados Escenarios de emisión o IEEE.

### **2.7.1 Escenarios IEEE**

Los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero o Escenarios IEEE son representaciones de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas como los gases de efecto invernadero, se basan en un conjunto coherente de supuestos sobre las fuerzas que las determinan (por ejemplo, el desarrollo demográfico y socioeconómico, la evolución tecnológica) y las principales relaciones entre ellos. Los escenarios de concentraciones, obtenidos en base a unos escenarios de emisión, se introducen en un modelo climático para obtener proyecciones del clima (IPCC, 2007).

Los gases de invernadero más importantes como el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) existen de manera natural en la atmósfera, sin embargo pequeñas variaciones en su cantidad pueden incrementar de manera sensible la temperatura de la atmósfera. De estos el  $\text{CO}_2$  es el más abundante y la principal causa del calentamiento global, y, a pesar de existir de forma natural en la atmósfera, también es producto, al igual que lo gases clorofluorocarburos (CFC), de las actividades humanas mediante la quema de combustibles fósiles (IMTA, 2007).

Los escenarios IEEE propuestos por el IPCC son escenarios con líneas argumentales demográficas, sociales, económicas y técnicas similares, se integran por cuatro familias de escenarios, denominadas A1, A2, B1 y B2.

La familia de escenarios A1 describe un mundo futuro en donde la población mundial disminuye después de alcanzar su valor máximo a mediados de siglo, prevé un rápido crecimiento económico mundial en donde disminuyen las diferencias regionales, y se presenta, también, la rápida introducción de tecnologías más nuevas y eficientes. Considera tres orientaciones tecnológicas: la utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), la utilización de energía de origen no fósil (A1T) y la utilización equilibrada de todo tipo de fuentes, (A1B).

La familia de escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia, la conservación de las entidades locales y el aumento continuo de la población. El desarrollo económico y tecnológico se orienta, básicamente, de forma regional.

La familia de escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados de siglo y desciende posteriormente, con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias, con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

La familia de escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. El desarrollo económico y tecnológico es lento, pero es orientado a la protección del medio ambiente y la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

## **2.8 Escenarios climáticos en México**

En México, el trabajo desarrollado en materia de escenarios de cambio climático, se ha construido esencialmente a partir de modelos regionales del clima alimentados con condiciones de gran escala que proveen los Modelos de Circulación General de la Atmósfera utilizados para el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) (Magaña 2007).

La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través de Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), es la institución que se ha encargado de generar escenarios de cambio climático para México. El Grupo de Cambio Climático y Radiación Solar del CCA “es un grupo de investigación que tiene como objetivo conocer el sistema climático y generar estudios sobre cambio climático que sirvan para reducir la vulnerabilidad del país ante el cambio y que ayuden a los diferentes sectores a decidir las mejores estrategias de adaptación y de mitigación” (CCA, 2009).

Los escenarios de cambio climático elaborados por el CCA corresponden a los años 2030 y 2050 y se generaron a partir de los datos climáticos del periodo 1950-2000 siguiendo los lineamientos propuestos por el IPCC. En su elaboración se utilizaron los modelos de circulación general ECHAM5/MPI, el UKHADGEM1 y el GFDL CM 2.0 y I; y los escenarios de emisión A1, A2, B1 y B2 publicados por el IPCC. La resolución espacial de estos escenarios es de 10 x 10 km.

## **2.9 Estudios relacionados**

En la actualidad los estudios en los que se evalúan los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos se basan, principalmente, en los escenarios generados a partir de Modelos de Circulación General de la Atmósfera y los escenarios de emisión del IPCC. Estos estudios llegan a diferentes conclusiones y estas son condicionadas a las metodologías aplicadas y a la existencia o no de información climática (Palma, et al. 2007).

### **2.9.1 Cambio climático y recursos hídricos**

Ospina y Gay (2007) evalúan la vulnerabilidad de los recursos hídricos ante los efectos de cambio climático global en las cuencas del Bajo Magdalena y del Sinú-Caribe en Colombia. En su estudio aplican los escenarios A2 y B2 del modelo HadCM3, el modelo de reducción de escala (Downscaling), el Sistema de Evaluación y Planeación del Agua (WEAP, por sus siglas en inglés) y la información de cinco estaciones climáticas con datos de precipitación y de temperaturas máximas y mínimas. Los resultados obtenidos proyectaron que en la Cuenca del Bajo Magdalena habrá aumento en la temperatura máxima y mínima, así como una disminución en la precipitación, mientras que en la Cuenca del Sinú-Caribe el principal efecto del cambio climático es un incremento en la precipitación, aumentando los recursos hídricos de la zona. Finalmente Ospina y Gay concluyen que existe evidencia de que el efecto del cambio climático se puede manifestar de forma diferente incluso a nivel regional, por lo que mencionan la necesidad de elaborar herramientas que permitan realizar estudios a nivel regional y local con el fin de reducir el grado de incertidumbre, permitiendo el diseño de medidas, estrategias y mecanismos de mitigación y adaptación al cambio climático.

Por su parte el estudio de Rymer, et al (2008) evalúa los impactos del cambio climático en los recursos hídricos de la República Dominicana y genera escenarios climáticos para el año 2100 basados en las publicaciones del IPCC en 2007. El estudio considera que la evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos puede generar proyecciones y escenarios a futuro con variaciones totalmente diferentes en cuanto a las metodologías y modelos utilizados en una misma zona de estudio. En este caso las proyecciones apuntan a la reducción de un 85% en la disponibilidad de agua potable en la República Dominicana para finales de este siglo, esta reducción se proyectó tomando en cuenta las variables climáticas y el crecimiento constante de la población.

Gay y Estrada (2007) señalan en “Cambio Climático en México”, que los resultados de los impactos potenciales del cambio climático en México en lo que se refiere al sector agua, tienden a empeorar la situación de los recursos hídricos en el norte del país,

volviéndose, en algunos casos, inmanejable. Mencionan la importancia que tiene incluir a los escenarios de cambio climático en la evaluación y planeación a largo plazo de los recursos hídricos.

Mendoza (2005) en el estudio “Determinación de la disponibilidad de agua en Tlaxcala para uso agrícola ante el cambio climático”, evalúa los componentes del ciclo hidrológico en los escenarios de clima pasado (1961-1981), actual (1980-2000) y futuro (2060) de cuatro municipios de Tlaxcala, aplicando los Modelos de Circulación de la Atmósfera GFDLR30 y CCCM y las tendencias de temperatura y precipitación pronosticadas por el Modelo Termodinámico del Clima (MTC). El estudio arroja resultados que corroboran que los problemas de disponibilidad, de demanda y calidad de agua de este estado se incrementan con los efectos que tiene el cambio climático en los regímenes de temperatura y precipitación, afectando considerablemente su principal actividad agrícola, el cultivo de maíz de temporal.

Palma (2005) evalúa el impacto del cambio climático en el ciclo hidrológico del estado de Veracruz, aplicando escenarios de cambio climático y los Modelos de Circulación de la Atmósfera GFDL-R30 y CCC. El estudio genera escenarios de cambio climático haciendo proyecciones de temperatura y precipitación para el año 2010, obteniendo incrementos entre 2 y 4 °C en temperatura y una reducción de la precipitación en primavera, así como un aumento de la misma en otoño.

### **2.9.2 Modelo de simulación hidrológica SWAT aplicado**

Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del Río Ambato, Ecuador (Proaño, et al. 2006). El modelo fue aplicado con la finalidad de simular caudales y producción de sedimentos bajo las condiciones actuales y en escenarios construidos a partir de posibles cambios en el uso de suelo y cobertura vegetal. El modelo SWAT demostró su versatilidad al simular las condiciones de la cuenca bajo diferentes escenarios de cambio en el uso de suelo.

Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca del Río Catamayo, Ecuador (Oñate, et al. 2003). El modelo SWAT se utilizó para determinar la respuesta de la cuenca alta del Río Catamayo, a la aplicación de una cobertura según el uso potencial del suelo, que permita disminuir la producción de sedimentos, afectando lo menos posible la disponibilidad del agua. En el estudio se llegó a la conclusión de que a pesar de la carencia de información, el modelo SWAT reproduce de una manera aproximada los datos reales de la cuenca, lo que hace suponer, que de mejorar las condiciones y cantidad de información de las estaciones de monitoreo, los resultados serían del todo satisfactorios.

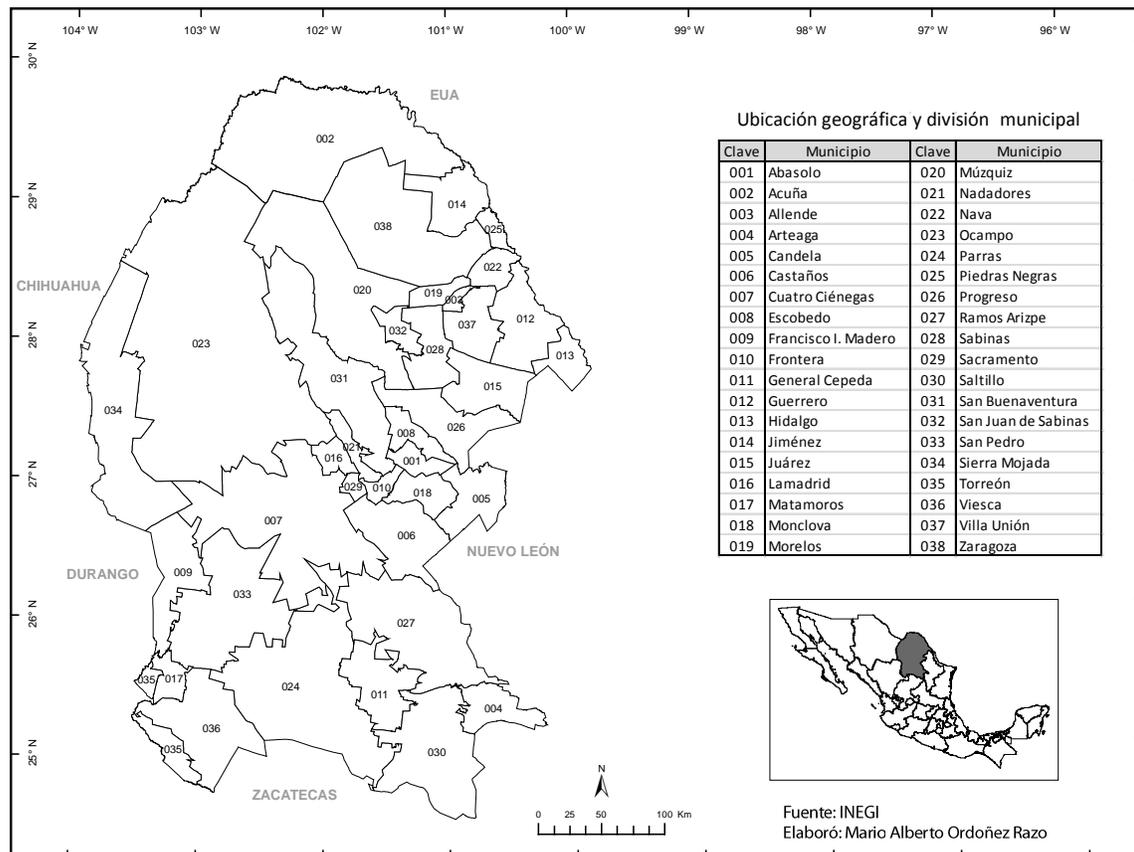
Oferta hídrica de la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco, orientada hacia servicios ambientales (Benavides, et al. 2008). En este estudio se aplicó en modelo SWAT para estimar balance hídrico de la cuenca forestal Tapalpa, con la finalidad de aportar elementos para determinar la factibilidad de crear un mercado de servicios ambientales hidrológicos. Los resultados obtenidos con SWAT fueron similares a los datos obtenidos en campo, permitiendo calibrar y validar el modelo. El estudio concluyó que el modelo SWAT puede utilizarse de manera confiable para conocer el ciclo hidrológico.

Adaptación del modelo de simulación hidrológica a la cuenca del Río Laja, Guanajuato, México (Torres, et al. 2005). En este estudio SWAT se utilizó para generar una base con la finalidad de evaluar alternativas de manejo de los suelos en la cuenca del río Laja. Se calibró y validó el modelo con la finalidad de medir la capacidad predictiva en las simulaciones, obteniendo resultados satisfactorios. Por lo anterior en el estudio consideran que el modelo SWAT puede ser utilizado como una herramienta para estudiar el comportamiento de la cuenca del río Laja ante posibles cambios en el manejo de sus recursos.

### 3. MARCO GEOGRÁFICO DEL ESTADO DE COAHUILA

#### 3.1 Ubicación geográfica

El estado de Coahuila de Zaragoza se localiza dentro de las siguientes coordenadas extremas, 29° 53', y 24° 32' Latitud Norte; 99° 51', y 103° 58' Longitud Oeste (Figura 1). Colinda al norte y noreste con Estados Unidos de América (EUA); al este y sureste con Nuevo León; al sur con Zacatecas; al oeste y suroeste con Durango; y al oeste con Chihuahua. El estado se conforma por 38 municipios y ocupa una superficie continental de 151,623 km<sup>2</sup>, aproximadamente el 7.7% de la superficie del país (INEGI, 2009a).



**Figura 1.** Ubicación geográfica y división municipal

### 3.2 Población

En 2007 el estado contaba con una población de 2, 587,917 habitantes, de la cual 90% (2, 332,914) era población urbana y 10% (255,003) población rural; la densidad de población era de 17 hab/km<sup>2</sup>. Las ciudades principales del estado son Saltillo (capital del estado), Torreón, Monclova y Piedras Negras (INEGI, 2009b).

### 3.3 Fisiografía

El estado se encuentra dentro de tres provincias fisiográficas; Sierras y Llanuras del Norte, Sierra Madre Oriental y Grandes Llanuras de Norteamérica (Figura 2), dentro de estas se encuentran las siguientes subprovincias: las Llanuras y Sierras Volcánicas, la del Bolsón de Mapimí y la de la Laguna de Mayrán en las Sierras y Llanuras del Norte; las Sierras Transversales, de la Gran Sierra Plegada, de los Pliegues Saltillo-Parras, de la Sierra de la Paila, de las Sierras y Llanuras Coahuilenses y la de la Serranía del Burro, en la Sierra Madre Oriental; y las Llanuras de Coahuila y Nuevo León en la Gran Llanura de Norteamérica (INEGI, 2009c)

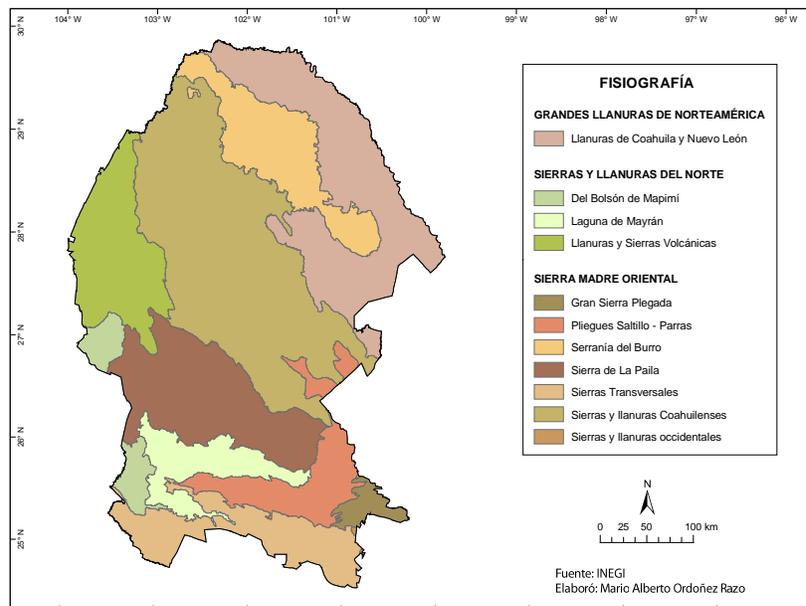


Figura 2. Fisiografía

### 3.4 Clima

El estado se puede dividir en tres grandes áreas por su clima (Figura 3): el norte semiseco y seco; el occidente muy seco; y el centro y sur en donde se presentan climas desde los muy secos y secos semicálidos en sus bolsones y valles, hasta los semisecos templados y los templados subhúmedos en las cumbres serranas, con predominancia de climas secos (INEGI, 2010a).

De acuerdo con García (1987) citado por Villarreal (2005) la precipitación es escasa durante la mayor parte del año, su promedio anual varía de 146 hasta 632 mm, pero en las porciones altas de las montañas el valor llega a ser superior a 650 mm. La temporada con mayor precipitación es de julio a octubre. La temperatura es sumamente variable, desde  $-8^{\circ}\text{C}$  en la época invernal en las partes altas, hasta  $38^{\circ}\text{C}$  en el verano en las porciones de menor altitud.

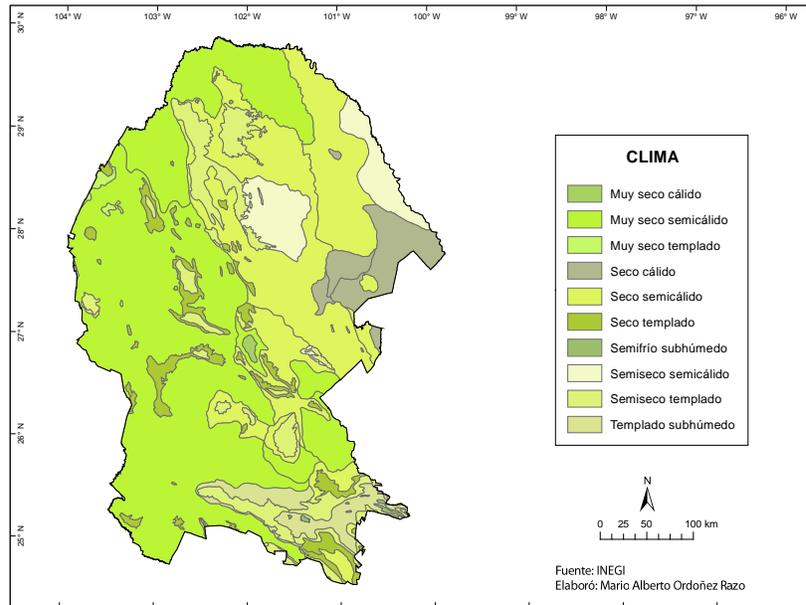


Figura 3. Clima

### 3.5 Hidrología

En el estado se encuentran las regiones hidrológicas Río Bravo-Conchos, Mapimí, Nazas-Aguanaval y El Salado (Figura 4). De acuerdo con INEGI (1983) citado por Garza de León, et, al. (2007) estas regiones tiene las siguientes características:

Región Hidrológica Bravo-Conchos. Es la más extensa y abarca 95,236.33 km<sup>2</sup>, es una región árida en la que predominan las tierras planas. La precipitación media es de 378 mm; lo que produce un volumen de 85,965 millones de m<sup>3</sup> de los cuales el 6.5% (2,370 millones m<sup>3</sup>) corresponden a la escorrentía de esta región. Las corrientes del norte desaguan en el Río Bravo y el área del Río Conchos.

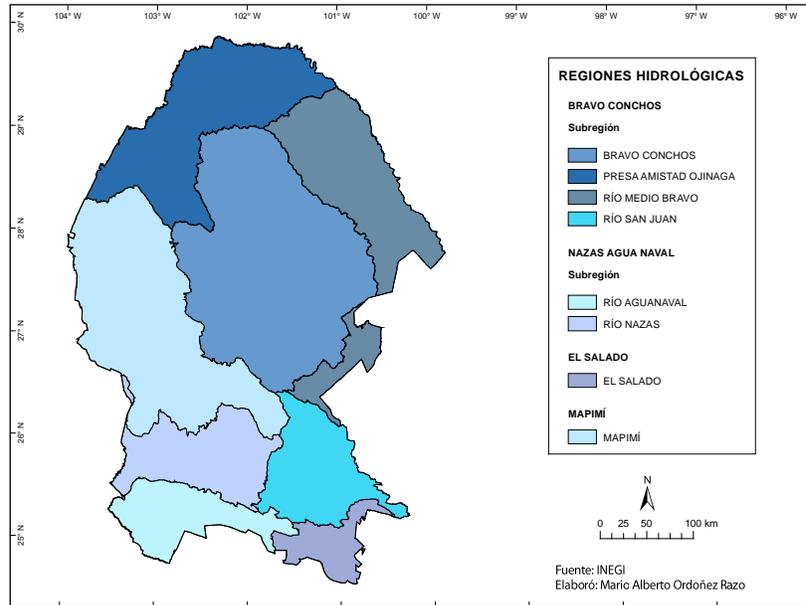
Región Hidrológica Mapimí. Se localiza al suroeste del estado, no presenta corrientes ni almacenamientos perennes, se caracteriza por su aridez y la carencia de elevaciones importantes. Las cuencas son endorreicas y los cauces temporales. Los escurrimientos son menores de 10 mm anuales y forman lagunas intermitentes en los bolsones.

Región Hidrológica Nazas-Aguanaval. La porción coahuilense se localiza en el suroeste del estado, en la región conocida como Comarca Lagunera, corresponde a las cuencas cerradas de los ríos Nazas y Aguanaval. En esta región se localizan dos presas de importancia y se ubica el área de mayor consumo de aguas subterráneas.

Región Hidrológica El Salado. Se localiza en el sureste del estado, es la más pequeña de las regiones pero una de las más importantes del país, se forma por cuencas cerradas de diferentes dimensiones.

La escasa e irregular precipitación en el estado propicia que existan pocos cuerpos de agua permanentes, la mayoría intermitentes. El estado cuenta con ocho ríos: en el norte el Río Bravo; en el noreste los ríos San Diego, San Rodrigo, San Antonio y Sabinas; en el centro el Río Salado de Nadadores; en el suroeste en los límites con Durango los ríos Nazas y Aguanaval. En lo que respecta a las presas, existe un

número significativo, sin embargo la mayoría permanecen secas gran parte del año, ya que por la escasez de lluvias la recarga es mínima.



**Figura 4.** Regiones hidrológicas

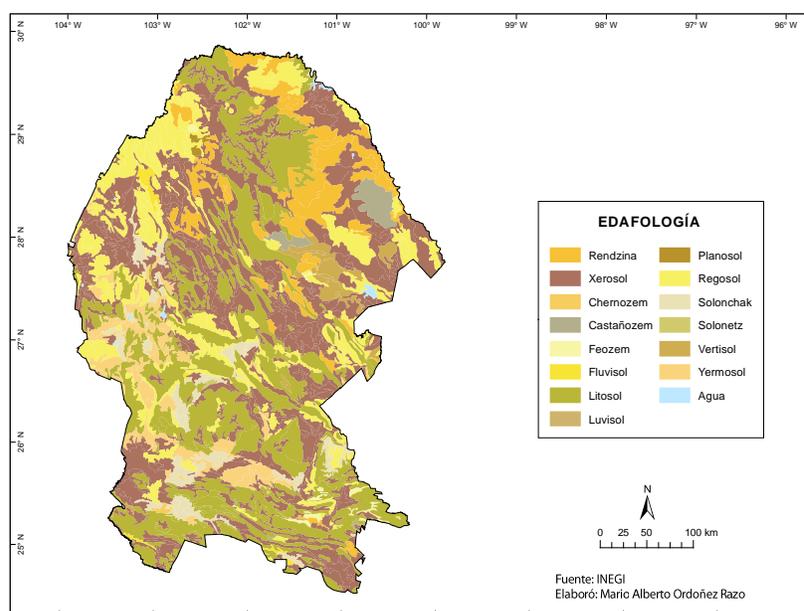
### 3.6 Edafología

Los tipos de suelo que se presentan en el estado son muy diversos y están determinados por las condiciones topográficas, geomorfológicas y climáticas. Los suelos predominantes son los xerosoles y los yermosoles, ya que son suelos típicos de climas secos o semisecos (Figura 5). De acuerdo con INEGI (2010b) la distribución de los suelos en las provincias fisiográficas del estado, se explica cómo sigue:

Provincia Fisiográfica de las Sierras y Llanuras del Norte. En la Subprovincia de las Llanuras y Sierras Volcánicas se encuentran en abundancia suelos de tipo xerosoles y yermosoles; en las llanuras de la Subprovincia del Bolsón de Mapimí dominan los xermosoles haplicos y xerosoles haplicos y cálcicos; en los fondos del bolsón y en la Subprovincia de la Laguna de Mayrán se encuentran principalmente los solonchak y los yermosoles.

Provincia de la Sierra Madre Oriental. En la Subprovincia de las Sierras Transversales dominan los litosoles, regosoles, xerosoles y fluvisoles; en la Subprovincia de la Gran Sierra Plegada los litosoles, rendzinas y regosoles; en la Subprovincia de los Pliegues Saltillo-Parras están presentes los litosoles, regosoles, luvisoles, xerosoles, fluvisoles, rendzinas, feozems, castañozems y solonchak; en la Subprovincia de la Sierra de Paila dominan los litosoles y regosoles; y en la Subprovincia de las Sierras y Llanuras Coahuilenses, al igual que en la Subprovincia de la Serranía del Burro dominan los litosoles y rendzinas.

Provincia de la Gran Llanura de Norteamérica. En la Subprovincia de las Llanuras de Coahuila y Nuevo León dominan los suelos de tipo xerosoles, se encuentran también vertisoles, castañozems, rendzinas, regosoles y litosoles.



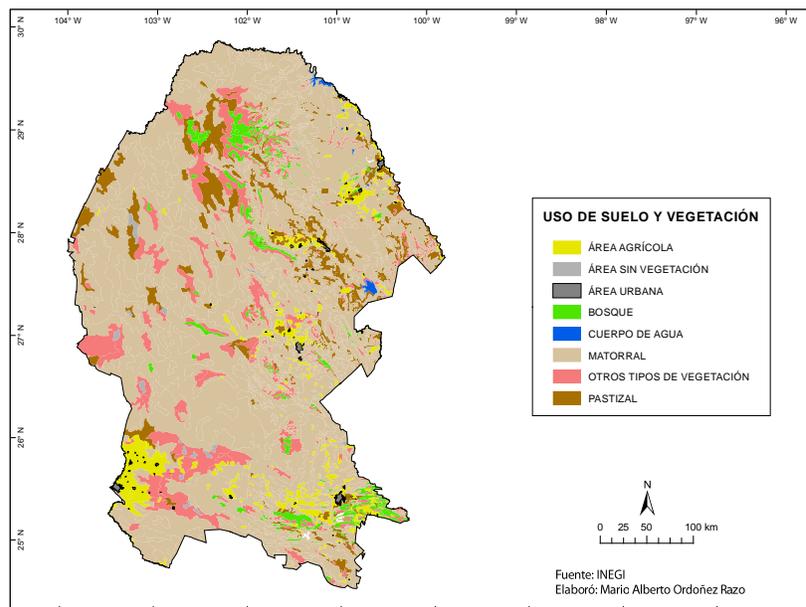
**Figura 5. Edafología**

### 3.7 Uso de suelo y vegetación

De acuerdo con INEGI (2010c), solo el 3.01% de la superficie estatal se ocupa para la agricultura, el resto está cubierta por vegetación de matorral (77.84%), de pastizal (7.17%), de chaparral (5.52%), de bosque (1.47%) y de otros tipos de vegetación

(4.99%) (Figura 6). La cubierta vegetal, según Villarreal y Valdés (1992-1993) citado por Villarreal y Encina (2005), se distribuye como se describe a continuación:

El matorral comprende las siguientes comunidades: el matorral submontano localizado en las laderas y cañones de las sierras; el matorral tamaulipeco que se distribuye al noreste del estado, en la provincia de la Planicie Costera del Golfo; y el matorral desértico chihuahuense, el cual es representado por el matorral rosetófilo en las laderas rocosas de lomeríos y sierras, y los matorrales de halófitas y gipsófitas que ocupan fondos de cuencas aisladas. El bosque de montaña se encuentra en algunas porciones de las zonas montañosas y lo conforman las siguiente comunidades: el bosque de encino, que se ubica en los cañones con altas condiciones de humedad; el bosque de pino piñonero, en las zonas con clima templado semiseco; el bosque de pino, en las sierras con clima templado semihúmedo; y los bosques de oyamel y de pino-encino en altitudes cercanas a los 3,000 m. Los zacatales se desarrollan a través del estado creciendo en los valles con suelos profundos o en laderas bajas. La vegetación riparia, subacuática y acuática se restringe a los escasos cuerpos de agua permanentes, así como ríos y pozas, presentes en el centro y norte del área.



**Figura 6.** Uso de suelo y vegetación

## **4. METODOLOGÍA**

### **4.1 Elaboración de bases de datos**

Para utilizar el modelo SWAT en el estado de Coahuila fue necesario generar dos bases de datos, una de suelos y otra de clima.

#### **4.1.1 Base de datos de suelos**

La base de datos de suelos contiene información sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos del estado. Para generar esta base se utilizó la capa de información de perfiles de suelos de INEGI escala 1:250,000, seleccionando los perfiles ubicados dentro del estado y aquellos que estuvieron hasta una distancia de 15 km del límite estatal. De esta capa se extrajo la siguiente información: identificador de perfil, número de horizontes, clave del suelo según la clasificación FAO 1970, profundidad del perfil (mm), color del suelo húmedo, símbolo del horizonte, límite superior (mm), límite inferior (mm), y los porcentajes de arena, limo, arcilla y materia orgánica. Esta información se utilizó en el cálculo de los valores requeridos por el modelo, de acuerdo a las fórmulas mencionadas en el marco teórico de este estudio para la base de datos de suelos de SWAT.

#### **4.1.2 Base de datos de clima**

La base de datos de clima se generó a partir de la información contenida en la base de datos ERIC III, con registros de las estaciones climáticas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), actualizados hasta el año 2007, y la información de proyecciones de clima generada por el INIFAP para los años 2030 y 2050 como parte de las actividades del proyecto general al cual perteneció esta tesis y que fue mencionado en la introducción. Las bases de datos generadas a partir de esta información correspondieron a datos diarios de temperatura y precipitación y a datos estadísticos de clima; con estas bases de datos se ingresaron las condiciones climáticas del escenario base (2006) y de los escenarios de los años 2030 y 2050.

#### **4.1.2.1 Bases de datos diarios de temperatura y precipitación**

Los datos diarios de temperatura y precipitación, necesarios para simular las condiciones climáticas del escenario base (2006), se generaron seleccionando las estaciones climáticas que contaran con datos continuos de precipitación y temperatura a partir de 1975 y hasta 2006. Se consideraron 137 estaciones climáticas, de las cuales 106 se ubicaron dentro del estado de Coahuila y 31 se encontraron hasta una distancia máxima de 15 km fuera de los límites estatales, incluyendo estaciones de los estados de Nuevo León, Zacatecas, Durango y Sonora, y del estado de Texas (EUA). Las estaciones fuera del estado permitieron calcular con mayor exactitud las condiciones climáticas de las zonas cercanas a los límites estatales.

#### **4.1.2.2 Bases de datos estadísticos de clima**

Los datos estadísticos de las condiciones climáticas del escenario base (2006) se generaron a partir de la información de precipitación y de temperaturas máximas y mínimas durante el periodo 1960–2006. Se seleccionaron 44 estaciones climáticas que contaban con al menos 20 años de datos continuos.

Los datos estadísticos requeridos por el modelo SWAT son: promedios, desviación estándar y sesgo de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima; las probabilidades de ocurrencia de días húmedos o secos y el promedio de días con lluvias; los promedios de radiación, de velocidad del viento y de temperatura del punto de rocío. Todos estos, con excepción de los valores de radiación, velocidad del viento y temperatura de punto de rocío, fueron calculados conforme a las formulas sugeridas en el manual de SWAT mencionadas en el marco teórico de este estudio.

Al no tener información en la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional sobre los valores de radiación, velocidad del viento y temperatura de punto de rocío, se utilizaron dos herramientas de apoyo, los programas RADG1 y LocClim, que permitieron generar la información faltante.

La radiación fue calculada con el programa RADG1 desarrollado por el Colegio de Posgraduados. Los datos de entrada requeridos son la latitud en grados y minutos, y los promedios mensuales de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

Los datos de velocidad del viento y de temperatura de punto de rocío fueron calculados en el programa LocClim desarrollado por la FAO (2006), el programa hace los cálculos basándose en la interpolación de los datos contenidos en estaciones meteorológicas de la FAO alrededor de todo el mundo, en el caso de México cuenta con 17 estaciones distribuidas en todo el país. Para su funcionamiento el programa requirió de las coordenadas geográficas de las zonas de donde se quiere extraer información, para este estudio se ingresaron las coordenadas de cada estación meteorológica.

Para generar las bases de datos estadísticos de los años 2030 y 2050 se utilizó la información climática proporcionada por el INIFAP, esta información correspondió a las proyecciones de clima generadas a partir de los Modelos Generales de Circulación de la Atmósfera HADGEM y GFDL y a los escenarios de emisión A2 y B2 publicados por el IPCC. A dichas proyecciones se les extrajo la información de las anomalías climáticas, estas corresponden a las variaciones del clima con respecto al clima actual. Los modelos solo generan las anomalías para temperatura y precipitación por lo que la información de la velocidad del viento y temperatura de rocío no se modificó, dejando los mismos valores en todos los escenarios.

#### **4.2 Aplicación del modelo de simulación hidrológica SWAT**

Para el cálculo del balance hídrico del escenario base (2006) y de los escenarios de los años 2030 y 2050, SWAT requirió de la entrada de las bases de datos de clima y suelos mencionadas anteriormente, y de las siguientes capas de información: Modelo de Elevación Digital (MED), máscara del área de estudio, Red Hidrológica, Tipos de Suelos y Uso de Suelo y Vegetación.

#### **4.2.1 Generación de la cartografía digital**

La cartografía digital requerida por SWAT fue homogeneizada con los siguientes parámetros: escala 1:250,000, proyección Cónica Conforme de Lambert y Datum D North American 1983. La cartografía utilizada se describe a continuación:

##### **4.2.1.1 Modelo de Elevación Digital (DEM)**

Las elevaciones del estado de Coahuila se obtuvieron a partir del DEM del INEGI, escala 1:250,000, y cuenta con las siguientes características: tamaño de celda horizontal de 100 x 100m y resolución vertical de un metro. El formato del DEM es de tipo raster (GRID).

##### **4.2.1.2 Máscara del área de estudio**

La máscara del área de estudio se generó considerando, en su totalidad, la superficie del estado de Coahuila. La máscara en formato raster, permitió que los cálculos del modelo SWAT se concentraran específicamente en la zona de estudio.

##### **4.2.1.3 Red hidrológica**

Se utilizó la Red Hidrológica de INEGI para el estado de Coahuila a escala 1:250,000. Corresponde a un conjunto de datos vectoriales. Si bien la entrada de los vectores de la red hidrológica es opcional, esta permite al modelo tener mayor precisión en el proceso de delimitación de cuencas y zonas de flujo.

##### **4.2.1.4 Cobertura de suelos**

Se generó una cobertura de tipos de suelos en formato raster a partir del vector de polígonos de suelos de INEGI 1:250,000. Cada polígono tiene que contar con la

información de las propiedades físicas y químicas del suelo, esta información no se encontró dentro del vector de suelos, por lo que antes de generar el raster se ligó la información contenida en el vector de perfiles de suelos de INEGI, en el supuesto que a cada polígono le corresponde un perfil.

Al intentar vincular el vector de polígonos con la información contenida en el vector de perfiles, se encontró que la cantidad de polígonos era superior a la cantidad de perfiles. Para que cada polígono tuviera información de las propiedades físicas y químicas se siguieron dos procesos:

El primero consistió en crear dos vectores de puntos; uno con los perfiles con información y otro con los centroides o centros de gravedad de los polígonos de tipos de suelos. Para este proceso se utilizó ArcMap de ArcGis.

El segundo consistió en asignarle a los polígonos la información de los perfiles. Al existir mayor número de polígonos que de perfiles, se optó por vincularle a los polígonos de suelos la información del perfil más cercano. Este proceso se llevó a cabo en ArcInfo, aplicando macros que permitieron vincular los vectores de centroides y de perfiles, las macros se ejecutaron basándose en dos criterios; el primero corresponde a la equivalencia en el tipo de suelo y el segundo a la proximidad entre polígonos y perfiles. El resultado de este proceso fue una tabla con la relación de polígonos y perfiles vinculados y que permitió al modelo asignar a cada polígono la información de las propiedades físicas y químicas de los suelos.

#### **4.2.1.5 Cobertura de uso de suelo y vegetación**

Se generó una capa de información en formato raster a partir de la información contenida en el vector de polígonos de Uso de Suelo y Vegetación de INEGI Serie III. Las clases de estos polígonos fueron reclasificados de acuerdo a aquellas que reconoce el método de la Curva Numérica utilizado por SWAT (Tabla 1), ya que estas clases contienen la información sobre la respuesta de la cobertura vegetal a los diferentes procesos hidrológicos simulados por el modelo.

**Tabla 1.** Clasificación de la cobertura de uso de suelo y vegetación

Nombre	Clasificación	Valor
Agrícola	AGRL	1
Bosque de Coníferas	FRSE	2
Bosque de hojas	FRSD	3
Bosque mixto	FRST	4
Pastizal	PAST	5
Matorral	RNGB	6
Zona urbana	URBN	7
Cuerpo de agua	WATR	8
Sin vegetación	SWRN	9
Humedales	WETL	10
Urbano de alta densidad	URHD	11
Urbano de baja densidad	URLD	12

#### **4.2.2 Procesamiento de información en el modelo SWAT**

La información generada para calcular el del balance hídrico del escenario base (2006) y de los escenarios de los años 2030 y 2050 se procesó de acuerdo al manual SWAT y se consideraron las siguientes etapas:

##### **4.2.2.1 Delineación de la cuenca y subcuencas**

SWAT delineó de manera automatizada la cuenca principal y las subcuencas del área de estudio. Para este proceso se ingresaron las siguientes capas de información: el modelo de elevación digital, la máscara estatal y la red hidrológica; a partir de estos datos el modelo delineó las cuencas y calculó la dirección y acumulación de las corrientes de agua dentro de las mismas. La máscara estatal permitió enfocar la simulación en una zona específica, en este caso el estado de Coahuila; y con el DEM se definieron las características de las subcuencas, tales como pendientes y elevaciones máximas, mínimas y promedios.

La cuenca y las subcuencas fueron delineadas automáticamente con la opción basada en DEM y se definieron seleccionando un área de contribución de 39,000 hectáreas, es

decir el área mínima que tiene que cubrir una corriente para delimitar una cuenca. Se obtuvieron 291 subcuencas (Anexo 2).

#### **4.2.2.2 Definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica**

Para generar las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés), se realizó el cruce de las siguientes capas: pendientes, suelos y uso de suelo y vegetación. En pendientes se consideraron dos clases; 1) de 0 a 8% y 2) >8%. Las HRU se definieron de acuerdo a los suelos, usos de suelo y pendientes dominantes.

La información generada hasta este proceso sirvió como base para la simulación hidrológica de todos los escenarios. En los procesos siguientes se modificó la información climática generada para cada escenario.

#### **4.2.2.3 Generador climático y archivos de entrada**

En este proceso se vinculó la información climática de datos estadísticos y de datos diarios de las estaciones meteorológicas, estas constituyeron la base de los cálculos del generador climático de SWAT que permitió simular el comportamiento del clima en cada subcuenca. Cuando no existen datos diarios el modelo los puede simular tomando como base la información de los datos estadísticos. En este estudio se ingresó la información estadística de nueve escenarios climáticos, solo para el escenario base (2006) fue posible ingresar la información de datos diarios de temperatura y precipitación, en los escenarios restantes el modelo simuló la información faltante con base en los datos estadísticos.

#### **4.2.2.4 Calibración del modelo**

Las simulaciones del modelo SWAT no pudieron ser calibradas debido a la ausencia de información hidrométrica en gran parte del Estado. Se evaluaron las estaciones

hidrométricas contenidas en el programa BANDAS del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), y se encontró que solo cinco estaciones del estado de Coahuila contenían información reciente para poder comparar los valores de escurrimiento real y los simulados por el modelo. Al evaluar la distribución de estas estaciones se observó que estaban concentradas en la región sureste del estado por lo que se optó por no calibrar el modelo.

La mayor parte de las estaciones hidrométricas presentaban inconsistencias, por lo que no pudieron ser utilizadas en el proceso de calibración; algunas de las inconsistencias encontradas fueron la poca o nula información y la falta de coordenadas que permitieran conocer su ubicación exacta, además de que en gran parte de las estaciones la información precede en décadas a la simulación realizada para el escenario base (2006).

#### **4.2.2.5 Simulación hidrológica**

SWAT permite seleccionar el periodo de inicio y término de simulación, el cálculo de la distribución de la precipitación y la frecuencia de salida de los resultados, que puede ser diaria, mensual o anual. Para este estudio las simulaciones se realizaron en un periodo de un año, la distribución de la precipitación fue calculada de forma exponencial con un valor de 1.3, que es el valor por default del modelo, y la frecuencia de salida de resultados fue mensual. Se realizaron simulaciones para el escenario base (2006) y para los escenarios A2 y B2 de los años 2030 y 2050 en los modelos GFDL y HADGEM.

#### **4.2.2.6 Salida de información**

SWAT exportó los resultados de cada simulación a un archivo de salida con formato Microsoft Data Base (mdb), esto permitió extraer la información necesaria para el cálculo del balance hídrico (Tabla 2).

**Tabla 2.** Componentes del balance hídrico

Clave SWAT	Componente (mm)	Unidad de medida
PRECIP	Precipitación total	mm H <sub>2</sub> O
ET	Evapotranspiración real	mm H <sub>2</sub> O
SW	Contenido inicial de agua en el suelo	mm H <sub>2</sub> O
PERC	Percolación	mm H <sub>2</sub> O
SURQ	Escorrentía	mm H <sub>2</sub> O
GW_Q	Flujo de retorno	mm H <sub>2</sub> O

### 4.3 Cálculo del balance hídrico

Los resultados de los escenarios simulados se obtuvieron a nivel subcuenca y con datos de salida mensuales durante el periodo de un año. Los años utilizados en las simulaciones correspondieron a 2006 para el escenario base, y 2030 y 2050 para los escenarios A2 y B2 de los modelos GFDL y HADGEM.

Se realizó el cálculo del balance hídrico para las 291 subcuencas generadas por el modelo, los resultados se agruparon de forma mensual y anual para calcular el balance hídrico a nivel estatal. La unidad de volumen utilizada para cuantificar los resultados del balance hídrico fue la de hectómetros cúbicos (hm<sup>3</sup>). Para el cálculo del balance hídrico fue necesaria la conversión de la información generada por SWAT a unidades de volumen, esta se hizo de la forma siguiente:

El área se convirtió de kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) a hectómetros cuadrados (hm<sup>2</sup>), tomando como base la equivalencia de 1km<sup>2</sup> = 100 hm<sup>2</sup> o hectáreas.

Se convirtieron los milímetros (mm) a hectómetros (hm), tomando como base la equivalencia de 1mm = 0.000001 hm.

El área en hm<sup>2</sup> se multiplicó por los valores en hm, obteniendo hm<sup>3</sup>.

La fórmula utilizada para calcular el balance hídrico fue la siguiente:

$$BH = SW + (PRECIP - SURQ - ET - PERC - GW\_Q)$$

En donde *BH* es el balance hídrico, *SW* es contenido inicial de agua en el suelo, *PRECIP* es la precipitación, *SURQ* es el escurrimiento, *ET* es la evapotranspiración, *PERC* es la percolación, y *GW\_Q* es el flujo de retorno.

#### 4.4 Representación cartográfica del balance hídrico

Se generó la cartografía del balance hídrico de las 291 subcuencas, para identificar de forma espacial la evolución de éste en cada escenario simulado se agruparon los resultados en cinco rangos expresados en  $\text{hm}^3$  (Tabla 3).

**Tabla 3.** Rangos en  $\text{hm}^3$

1)	600	-	900
2)	300	-	600
3)	0	-	300
4)	-300	-	0
5)	-600	-	-300

Las variaciones del balance hídrico de los escenarios del 2030 y 2050 con respecto al escenario base (2006) se agruparon en 5 rangos (Tabla 4).

**Tabla 4.** Variaciones en  $\text{hm}^3$

1)	400	-	600
2)	200	-	400
3)	0	-	200
4)	-200	-	0
5)	-400	-	-200

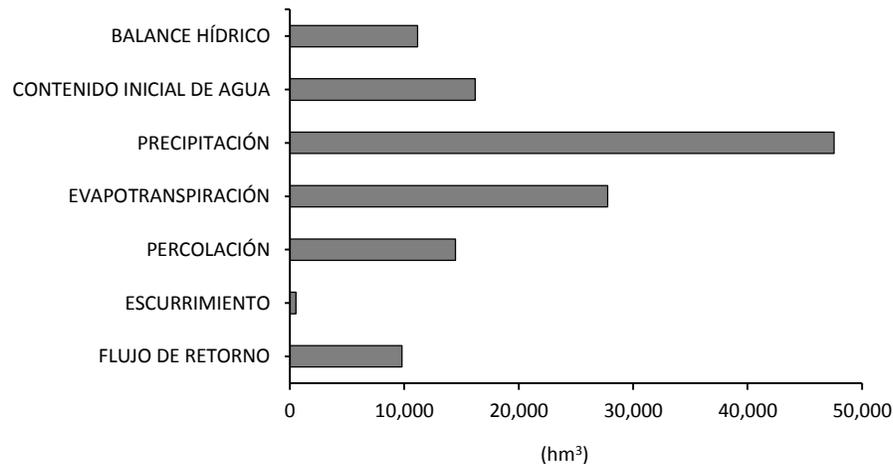
Con el fin de identificar, en cada escenario, la superficie estatal ocupada por el balance hídrico positivo, se generaron mapas agrupando las subcuencas de acuerdo al valor positivo o negativo obtenido.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Escenario base (2006)

#### 5.1.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca

El balance hídrico anual obtenido en el escenario base (2006) fue de 11,163.32 hm<sup>3</sup>, y representa la diferencia entre las entradas y pérdidas de agua en el estado. Para los componentes que contribuyen a las entradas se obtuvieron 63,758.44 hm<sup>3</sup>, de los cuales el 75% (47,559.51 hm<sup>3</sup>) corresponde a precipitación y 25% (16,198.92 hm<sup>3</sup>) a contenido inicial de agua en el suelo. En cuanto a las pérdidas, estas suman 52,595.12 hm<sup>3</sup>, de los cuales el 53% (27,780.81 hm<sup>3</sup>) corresponde a evapotranspiración, 27% (14,469.42 hm<sup>3</sup>) a percolación, 19% (9,810.23 hm<sup>3</sup>) a flujo de retorno y 1% (534.66 hm<sup>3</sup>) a escurrimiento (Figura 7).

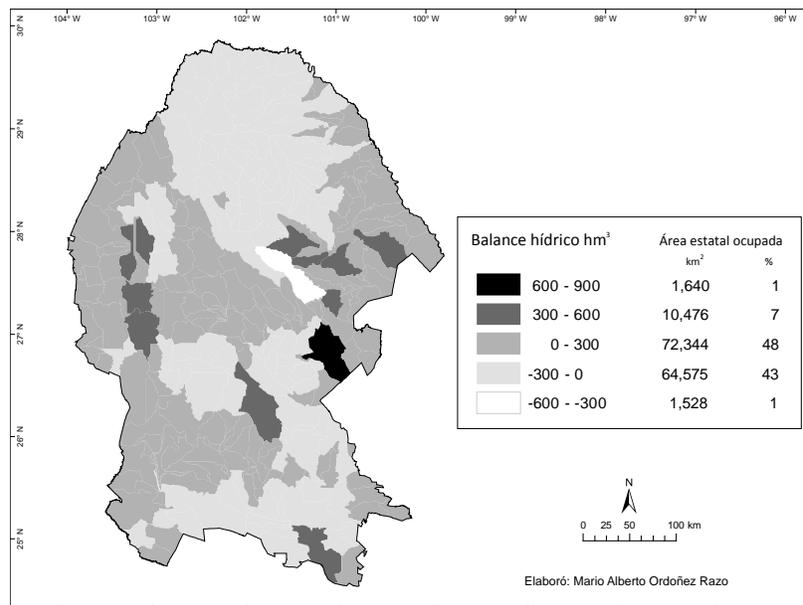


**Figura 7.** Balance hídrico anual; escenario base (2006)

La distribución del balance hídrico a nivel subcuenca (Figura 8), muestra que el 44% de la superficie estatal (66,103 km<sup>2</sup>) presentó un balance hídrico negativo con valores entre -600 y 0 hm<sup>3</sup>, mientras que el 56% restante (84,460 km<sup>2</sup>) presentó balance hídrico positivo, del cual, a nivel estatal el 48% tiene valores de 0 a 300 hm<sup>3</sup>, el 7% valores de 300 a 600 hm<sup>3</sup> y el 1% valores de 600 a 900 hm<sup>3</sup>.

En el estado las zonas con balance hídrico negativo se ubican, principalmente, en los siguientes municipios: Acuña, Zaragoza y Múzquiz en el norte; Cuatrociénegas, Frontera, Sacramento y Castaños en el centro; Ramos Arizpe y Saltillo en el sureste; y Parras y General Cepeda en el sur. Los valores mínimos se presentan en una zona que cubre el este de San Buenaventura, el norte de Escobedo y el este y noreste de Progreso.

Con respecto a las zonas con balance hídrico positivo, estas presentan los valores máximos en parte de los municipios de Abasolo, Monclova y Candela ubicados en el este del estado.



**Figura 8.** Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario base (2006)

### 5.1.2 Balance hídrico mensual

Los resultados obtenidos de forma mensual, muestran que el balance hídrico presenta los valores más altos en los meses de julio y diciembre (2,328.31 y 5,338.86 hm<sup>3</sup>) y los valores más bajos en abril y octubre (-563.74 y -1,525.29 hm<sup>3</sup>) (Figura 9). Para los

componentes que conforman el balance hídrico, correspondientes a entradas y pérdidas de agua, se obtuvieron los siguientes valores máximos y mínimos:

Entradas. En contenido inicial de agua en el suelo el valor máximo se presenta en diciembre (3,987.26 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (0 hm<sup>3</sup>). Y para precipitación el máximo se presenta en agosto (9,876.09 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en febrero (411.78 hm<sup>3</sup>).

Pérdidas. En la evapotranspiración el valor máximo ocurre en agosto (4,774.05 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (543.74 hm<sup>3</sup>); en percolación el máximo se da en agosto (3,654.66 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (30.31 hm<sup>3</sup>); en escurrimiento el máximo se presenta en agosto (129.43 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en febrero (0 hm<sup>3</sup>); y para flujo de retorno el máximo ocurre en septiembre (2,291.38 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en enero (5.76 hm<sup>3</sup>).

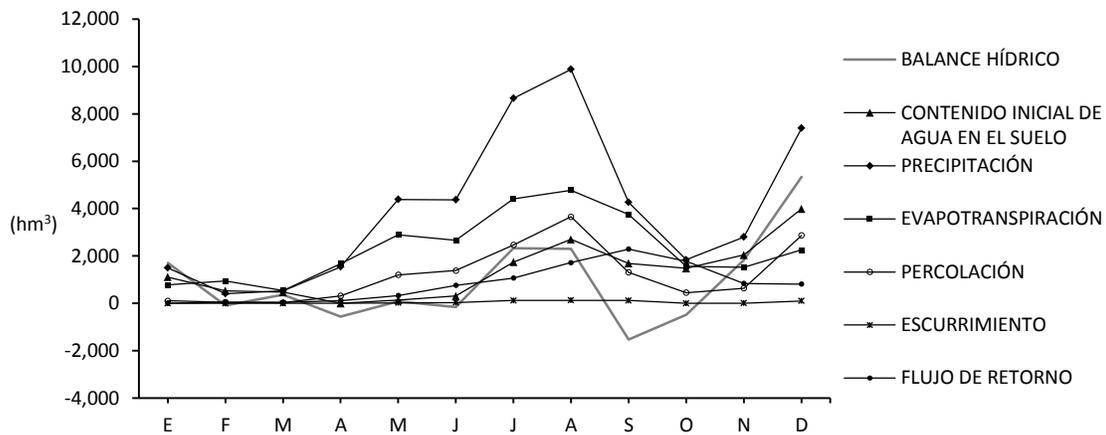


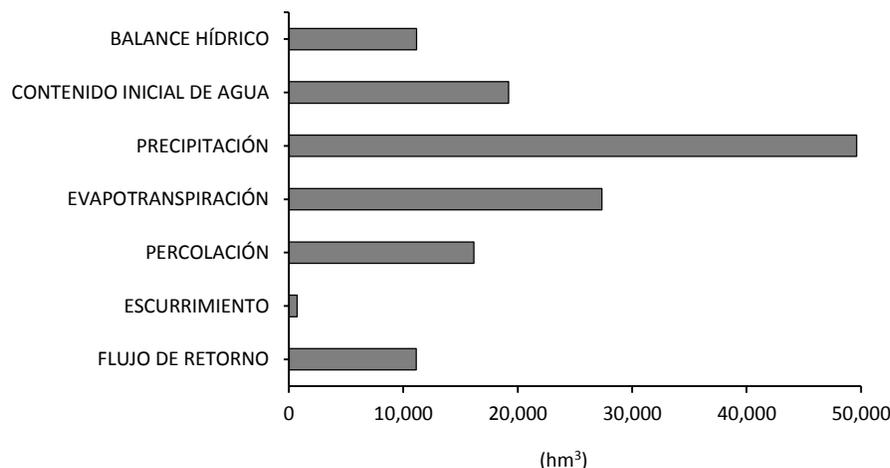
Figura 9. Balance hídrico mensual; escenario base (2006)

## 5.2 Escenario GFDL A2 año 2030

### 5.2.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca

El balance hídrico para este escenario fue de 13,392.93 hm<sup>3</sup>. En los componentes que contribuyen a las entradas de agua se obtuvieron 68,837.35 hm<sup>3</sup>; de estos el 72% (49,629.69 hm<sup>3</sup>) corresponde a precipitación y el 28% (19,207.66 hm<sup>3</sup>) a contenido

inicial de agua en el suelo. Las pérdidas suman 55,444.42 hm<sup>3</sup>, de las cuales el 49% (27,366.09 hm<sup>3</sup>) corresponde a evapotranspiración, 29% (16,187.55 hm<sup>3</sup>) a percolación, 1% (740.74 hm<sup>3</sup>) a escurrimiento y 20% (11,150.03 hm<sup>3</sup>) a flujo de retorno (Figura 10).

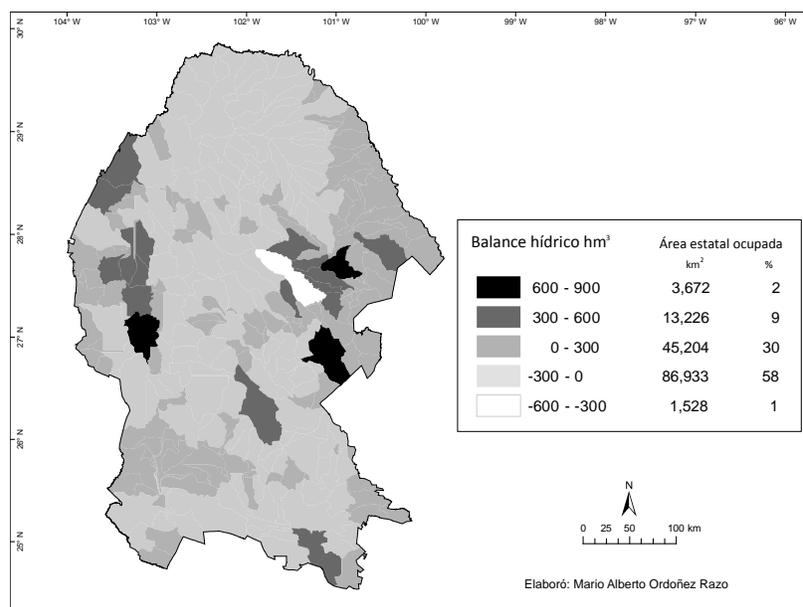


**Figura 10.** Balance hídrico anual; escenario GFDL A2 año 2030

A nivel subcuenca la distribución del balance hídrico (Figura 11), muestra que el 59% de la superficie del estado (88,461 km<sup>2</sup>) presenta balance negativo, con valores dentro del rango de -600 a 0 hm<sup>3</sup>, mientras que el 41% restante (62,102 km<sup>2</sup>) presenta balance positivo; a nivel estatal el 30% tiene valores de 0 a 300 hm<sup>3</sup>, el 9% de 300 a 600 hm<sup>3</sup> y el 2% de 600 a 900 hm<sup>3</sup>.

Los municipios que presentan balance hídrico negativo se ubican, en gran parte, en las zonas del norte, centro, oeste, sureste, y sur del estado; siendo Acuña, Múzquiz, Zaragoza, San Buenaventura, Ocampo, Cuatrociénegas, Sacramento, Frontera Ramos Arizpe, General Cepeda, Viesca, Torreón y Saltillo los municipios en donde las zonas con balance hídrico negativo cubren casi toda su superficie. Los valores mínimos se presentan en una zona que cubre el este de San Buenaventura, el norte de Escobedo y el este y noreste de Progreso.

Los municipios en dónde se presentan las zonas con los valores máximos del balance hídrico son Abasolo, Frontera, Monclova y Candela en el este y Ocampo en el oeste del estado.



**Figura 11.** Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario GFDL A2 año 2030

### 5.2.2 Balance hídrico mensual

Los resultados muestran que el balance hídrico presenta valores máximos en diciembre y julio ( $6,266.65$  y  $4,328.90 \text{ hm}^3$ ) y mínimos en septiembre y abril ( $-1,905.43$  y  $-485.06 \text{ hm}^3$ ) (Figura 12). Para los componentes que conforman el balance hídrico, correspondientes a entradas y pérdidas de agua, se obtuvieron los siguientes valores máximos y mínimos:

Entradas: En contenido inicial de agua en el suelo el valor máximo ocurre en diciembre ( $4,448.04 \text{ hm}^3$ ) y el mínimo en abril ( $0 \text{ hm}^3$ ), y para precipitación el máximo se presenta en julio ( $15,012.54 \text{ hm}^3$ ) y el mínimo en marzo ( $525.42 \text{ hm}^3$ ).

Pérdidas: En la evapotranspiración el valor máximo ocurre en julio (5,477.15 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (551.84 hm<sup>3</sup>); en percolación el máximo en julio (6,074.51 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (34.12 hm<sup>3</sup>); el escurrimiento máximo se presenta en julio (463.14 hm<sup>3</sup>) y el mínimo (0 hm<sup>3</sup>), en un periodo que inicia en enero y termina en abril; y para flujo de retorno el máximo se presenta en agosto (3,201.42 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en enero (5.29 hm<sup>3</sup>).

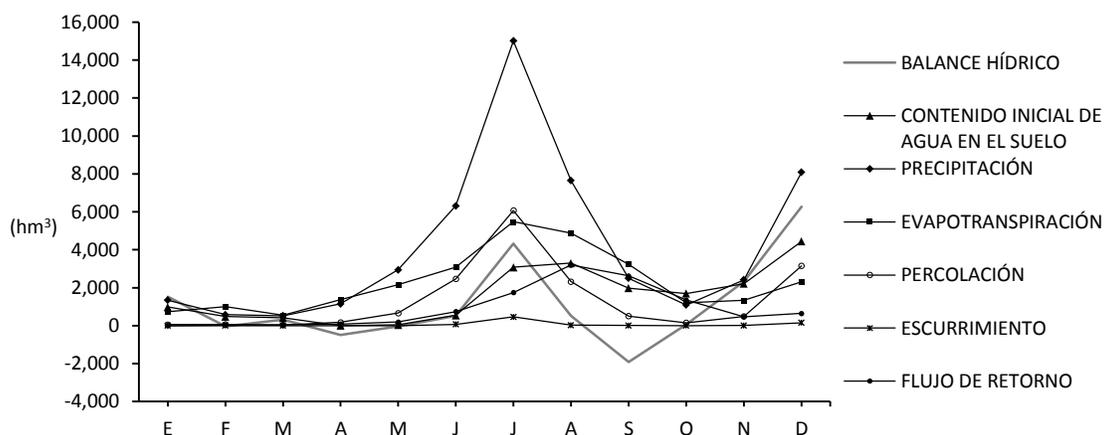


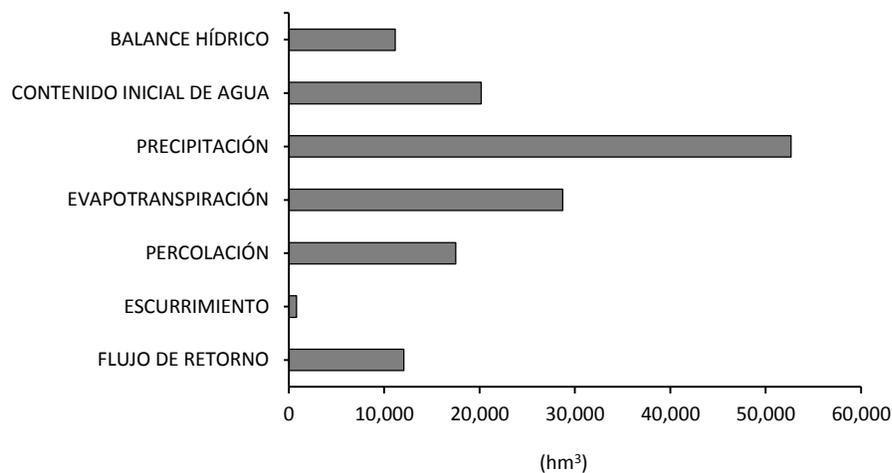
Figura 12. Balance hídrico mensual; escenario GFDL A2 año 2030

### 5.3 Escenario GFDL B2 año 2030

#### 5.3.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca

El balance hídrico anual para este escenario fue de 13,740.45 hm<sup>3</sup>. Para los componentes que contribuyen a las entradas de agua se obtuvieron 72,847.14 hm<sup>3</sup>, de estos el 72% (52,678.15 hm<sup>3</sup>) corresponde a la precipitación y 28% (20,168.99 hm<sup>3</sup>) al contenido inicial de agua en el suelo.

En cuanto a las pérdidas de agua, estas suman 59,106.69 hm<sup>3</sup>, de las cuales el 49% (28,721.83 hm<sup>3</sup>) corresponde a evapotranspiración, 30% (17,515.17 hm<sup>3</sup>) a percolación, 20% (12,058.99 hm<sup>3</sup>) a flujo de retorno y 1% (810.70 hm<sup>3</sup>) a escurrimiento (Figura 13).

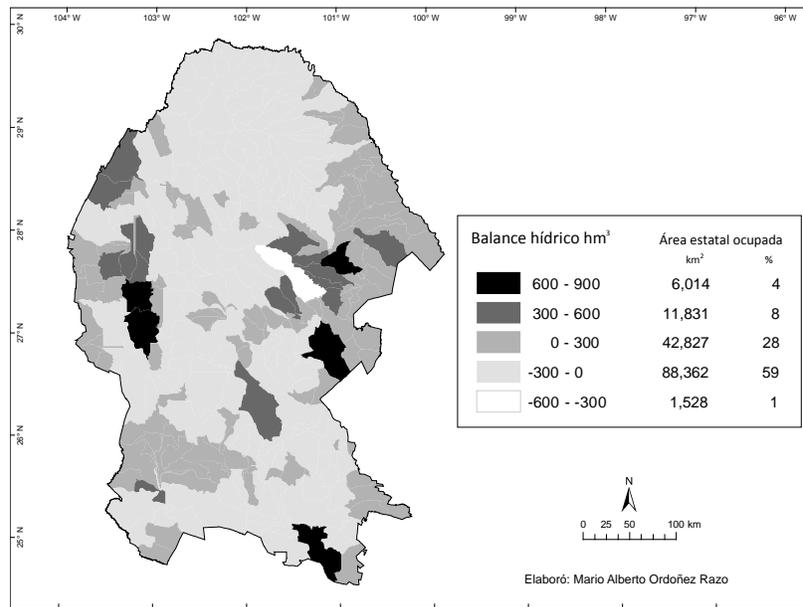


**Figura 13.** Balance hídrico anual; escenario GFDL B2 año 2030

La distribución del balance hídrico a nivel subcuenca (Figura 14), muestra que 60% de la superficie estatal (89,890 km<sup>2</sup>) presentó un balance negativo con valores entre -600 y 0 hm<sup>3</sup>, mientras el 40% restante (60,673 km<sup>2</sup>) tiene balance positivo; a nivel estatal el 28% con valores de 0 a 300 hm<sup>3</sup>, el 8% de 300 a 600 hm<sup>3</sup> y el 4% de 600 a 900 hm<sup>3</sup>.

Los valores positivos se distribuyen, principalmente, en municipios del norte (Acuña, Zaragoza, Morelos y Múzquiz), centro (Castaños, Cuatrociénegas, Frontera y Sacramento) y en una franja que cubre del suroeste al sureste del estado (Torreón, Viesca, Parras, General Cepeda Ramos Arizpe y parte de Saltillo). Los valores mínimos se presentan en una zona que cubre el este de San Buenaventura, el norte de Escobedo y el este y noreste de Progreso.

Los valores positivos se concentran en municipios que se encuentran en una franja que se extiende desde el noreste al este del estado (Jiménez, Piedras Negras, Guerrero, Hidalgo, Villa Unión, Juárez, Progreso, Sabinas, Candela Escobedo) y en algunas zonas de los municipios del oeste (Ocampo y Sierra Mojada), del suroeste (Francisco I. Madero, Matamoros y San Pedro) y del sureste del estado (Arteaga y Saltillo). Los valores máximos del balance hídrico se presentan en algunas zonas de los municipios de Juárez, Sabinas, Abasolo, Monclova, Candela y Ocampo.



**Figura 14.** Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario GFDL B2 año 2030

### 5.3.2 Balance hídrico mensual

Los resultados muestran que el balance hídrico mensual tiene valores máximos en los meses de diciembre y julio (6,459.21 y 4,135.71 hm<sup>3</sup>) y valores mínimos en abril y septiembre (-531.25 y -2,186.88 hm<sup>3</sup>) (Figura 15). Para los componentes que conforman el balance hídrico, correspondientes a entradas y pérdidas de agua, se obtuvieron los siguientes valores máximos y mínimos:

**Entradas.** En contenido inicial de agua en el suelo el valor máximo en diciembre (4,667.97 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (0 hm<sup>3</sup>), y para precipitación el valor máximo en julio (14,349.65 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en febrero (570.54 hm<sup>3</sup>).

**Pérdidas.** Para evapotranspiración el valor máximo ocurre en julio (5,444.17 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (588.87 hm<sup>3</sup>); en percolación el valor máximo en julio (5,636.67 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (44.53 hm<sup>3</sup>); en escurrimiento el valor máximo en julio (393.36 hm<sup>3</sup>) y el mínimo de enero a abril (0 hm<sup>3</sup>); y para flujo de retorno el valor máximo en agosto (3,112.46 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en enero (5.45 hm<sup>3</sup>).

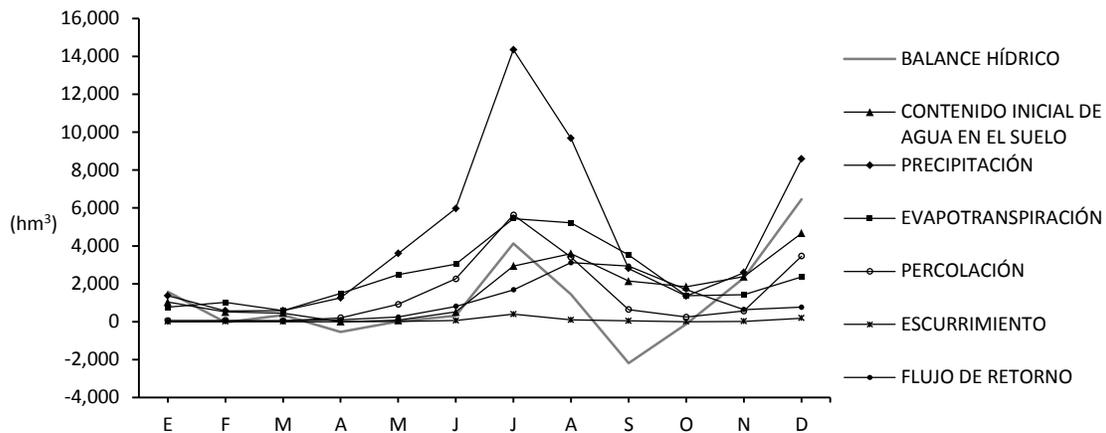


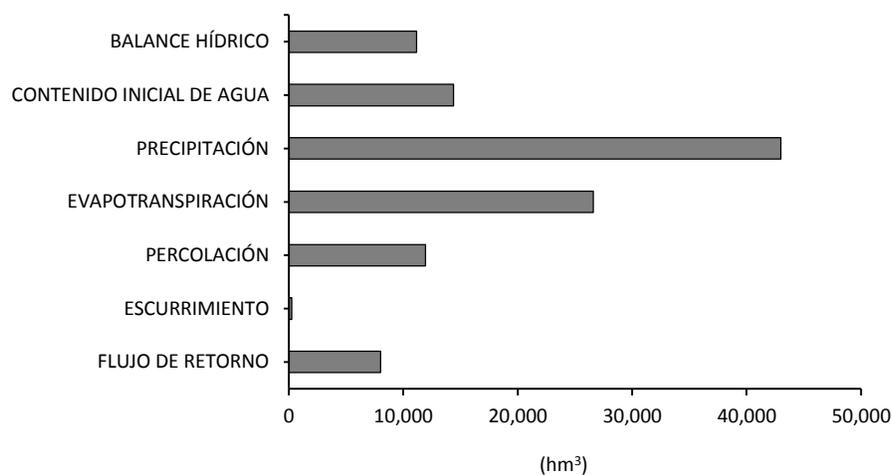
Figura 15. Balance hídrico mensual; escenario GFDL B2 año 2030

## 5.4 Escenario HADGEM A2 año 2030

### 5.4.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca

El balance hídrico anual en este escenario fue de 10,541.94 hm<sup>3</sup>. Para los componentes que contribuyen a las entradas de agua se obtuvieron 57,379.17 hm<sup>3</sup>, de estos el 75% (42,994.79 hm<sup>3</sup>) corresponde a precipitación y 25% (14,384.38 hm<sup>3</sup>) a contenido inicial de agua en el suelo.

En cuanto a las pérdidas de agua, estas suman 46,837.23 hm<sup>3</sup>, de las cuales el 57% (26,596.48 hm<sup>3</sup>) corresponde a evapotranspiración, 25% (11,943.35 hm<sup>3</sup>) a percolación, 17% (8,030.59 hm<sup>3</sup>) a flujo de retorno y 1% (266.81 hm<sup>3</sup>) a escurrimiento (Figura 16).

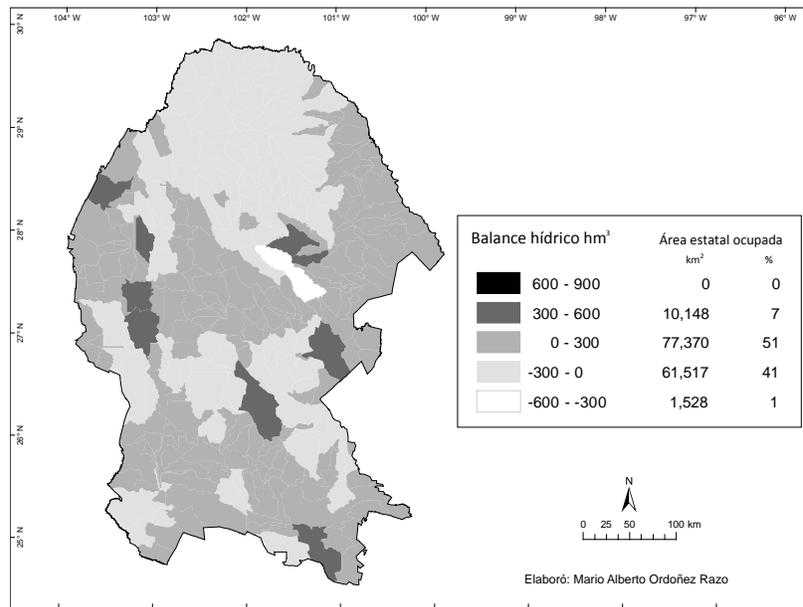


**Figura 16.** Balance hídrico anual; escenario HADGEM A2 año 2030

La distribución del balance hídrico a nivel subcuenca (Figura 17), muestra que el 42% de la superficie estatal ( $63,045 \text{ km}^2$ ) tuvo un balance negativo con valores entre  $-600$  y  $0 \text{ hm}^3$ , mientras que el 58% restante ( $87,518 \text{ km}^2$ ) obtuvo balance positivo; a nivel estatal el 51% con valores de  $0$  a  $300 \text{ hm}^3$  y el 7% con valores de  $300$  a  $600 \text{ hm}^3$ .

Las zonas en donde se presenta balance hídrico negativo se encuentran, principalmente, en los municipios del norte (Acuña, Zaragoza, Morelos Múzquiz y San Buenaventura), del centro (Castaños, Cuatrociénegas y Francisco I. Madero), del suroeste (Torreón) y del sureste (Ramos Arizpe). Los valores mínimos se presentan en una zona que cubre el este de San Buenaventura, el norte de Escobedo y el este y noreste de Progreso.

A nivel estatal el balance hídrico positivo cubre zonas que van desde el municipio de Hidalgo en el este hasta el municipio de Sierra Mojada en el oeste y zonas que van desde Arteaga en el sureste hasta Matamoros al suroeste, incluyendo municipios como Saltillo General Cepeda, Parras y San Pedro. Las zonas donde se presentaron los valores máximos del balance hídrico son: gran parte de Abasolo, suroeste de Candela, sur de Monclova, suroeste de Ocampo, norte de Sierra Mojada y sur de Saltillo.



**Figura 17.** Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario HADGEM A2 año 2030

#### 5.4.2 Balance hídrico mensual

Los resultados obtenidos muestran que el balance hídrico presenta valores máximos en los meses de julio y diciembre (2,483.07 y 4,829.41 hm<sup>3</sup>) y mínimos en septiembre y octubre (-1,050.42 y -745.10 hm<sup>3</sup>). (Figura 18) Para los componentes que conforman el balance hídrico, correspondientes a entradas y pérdidas de agua, se obtuvieron los siguientes valores máximos y mínimos:

**Entradas.** En contenido inicial de agua en el suelo el valor máximo es en diciembre (3,565.90 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (0 hm<sup>3</sup>), y para precipitación el valor máximo en agosto (8,695.78 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en febrero (426.94 hm<sup>3</sup>).

**Pérdidas.** Para evapotranspiración el valor máximo ocurre en agosto (4,745.21 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (588.35 hm<sup>3</sup>); en percolación el valor máximo se presenta en agosto (2,829.64 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (33.28 hm<sup>3</sup>); en escurrimiento el máximo se presenta en septiembre (97.05 hm<sup>3</sup>) y el mínimo (0 hm<sup>3</sup>) de enero a abril; y para

flujo de retorno el valor máximo se presenta en septiembre (2,003.09 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en enero (6.09 hm<sup>3</sup>).

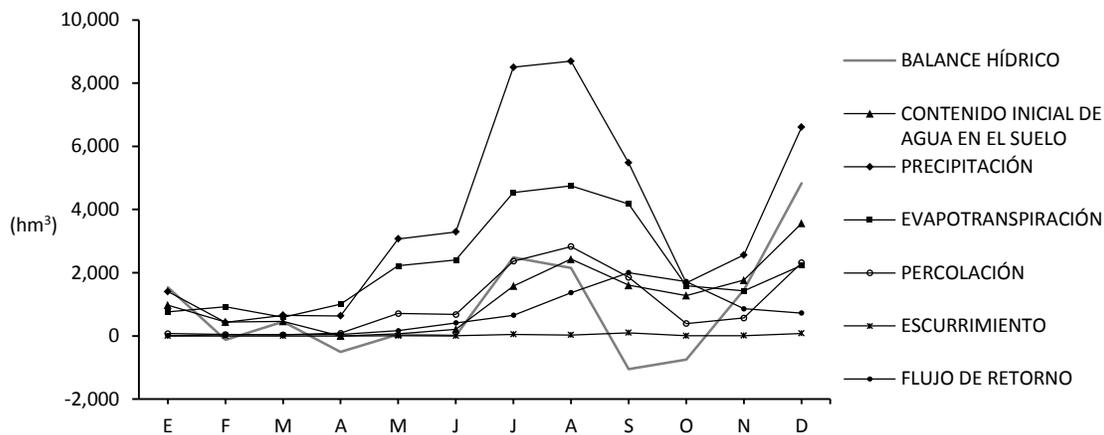


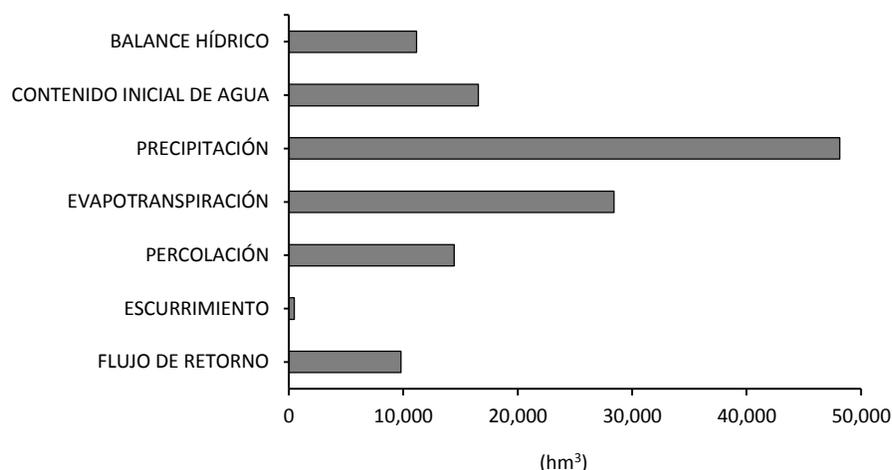
Figura 18. Balance hídrico mensual; escenario HADGEM A2 año 2030

## 5.5 Escenario HADGEM B2 año 2030

### 5.5.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca

El balance hídrico anual obtenido para este escenario fue de 11,581.82 hm<sup>3</sup>, y representa la diferencia entre las entradas y pérdidas de agua en el estado. Para los componentes que contribuyen a las entradas de agua se obtuvieron 64,724.73 hm<sup>3</sup>, de estos el 74% (48,153.92 hm<sup>3</sup>) corresponde a precipitación y 26% (16,570.81 hm<sup>3</sup>) a contenido inicial de agua en el suelo.

En cuanto a las pérdidas de agua, estas suman 53,142.91 hm<sup>3</sup>, de las cuales el 53% (28,418.68 hm<sup>3</sup>) corresponde a evapotranspiración, 27% (14,438.16 hm<sup>3</sup>) a percolación, 18% (9,798.95 hm<sup>3</sup>) a flujo de retorno y 1% (487.12 hm<sup>3</sup>) a escurrimiento (Figura 19)

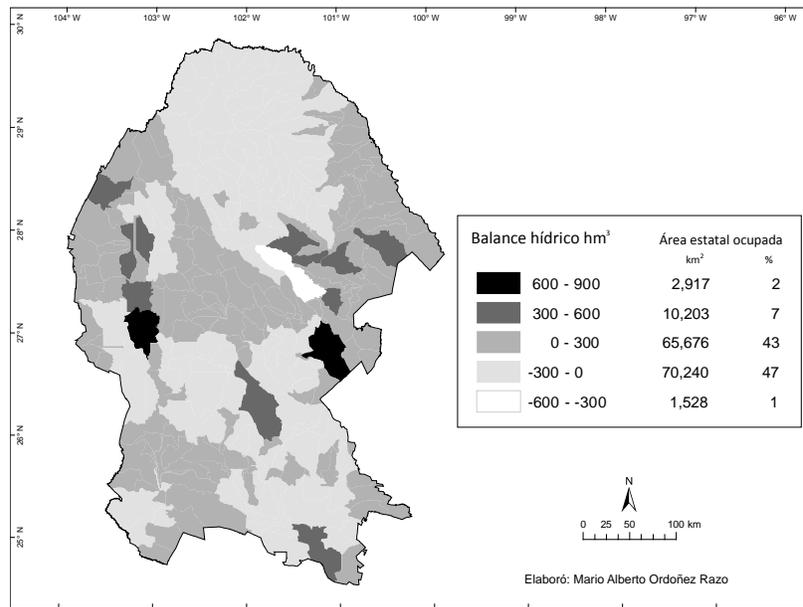


**Figura 19.** Balance hídrico anual; escenario HADGEM B2 año 2030

La distribución del balance hídrico a nivel subcuenca (Figura 20), muestra que el 48% de la superficie estatal ( $71,767 \text{ km}^2$ ) tuvo un balance negativo con valores entre  $-600$  y  $0 \text{ hm}^3$ , mientras el 52% restante ( $78,795 \text{ km}^2$ ) obtuvo balance positivo; a nivel estatal el 44% tiene de  $0$  a  $300 \text{ hm}^3$ , el 7% de  $300$  a  $600 \text{ hm}^3$  y el 2% de  $600$  a  $900 \text{ hm}^3$ .

En el estado, las zonas con balance hídrico negativo se encuentran principalmente en municipios del norte (Acuña, Zaragoza, Múzquiz y Morelos), en el este (Castaños), del centro (Cuatrociénegas), en el oeste (Francisco I. Madero), del suroeste (Ramos Arizpe, Saltillo y General Cepeda), en el sur (Parras), y del suroeste (Torreón y Viesca). Los valores mínimos se presentan en una zona que cubre el este de San Buenaventura, el norte de Escobedo y el este y noreste de Progreso.

Las zonas del estado con balance hídrico positivo cubren municipios que se encuentran desde el noreste hasta el este (de Jiménez hasta Candela); desde el este hasta el oeste (de Hidalgo hasta Sierra Mojada), en el suroeste (Matamoros y San Pedro) y en sureste (Arteaga y el sur de Saltillo).



**Figura 20.** Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario HADGEM B2  
año 2030

### 5.5.2 Balance hídrico mensual

Los resultados obtenidos muestran que el balance hídrico presenta valores máximos en los meses de agosto y diciembre (2,834.97 y 5,429.26 hm<sup>3</sup>) y mínimos en septiembre y octubre (-1,594.90 y -728.21 hm<sup>3</sup>) (Figura 21). Para los componentes que conforman el balance hídrico, correspondientes a entradas y pérdidas de agua, se obtuvieron los siguientes valores máximos y mínimos:

**Entradas.** En contenido inicial de agua en el suelo su valor máximo se presenta en diciembre (4,052.24 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (0 hm<sup>3</sup>), y para precipitación el valor máximo se presenta en agosto (10,691.59 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en febrero (456.58 hm<sup>3</sup>).

**Pérdidas.** Para evapotranspiración el valor máximo ocurre en agosto (5,083.43 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (616.80 hm<sup>3</sup>); en percolación el máximo se presenta en agosto (3,930.25 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (45.50 hm<sup>3</sup>); en escurrimiento el máximo se presenta en septiembre (131.11 hm<sup>3</sup>) y el mínimo (0 hm<sup>3</sup>) de enero a abril; y para flujo

de retorno el valor máximo fue en septiembre (2,472.66 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en enero (5.55 hm<sup>3</sup>).

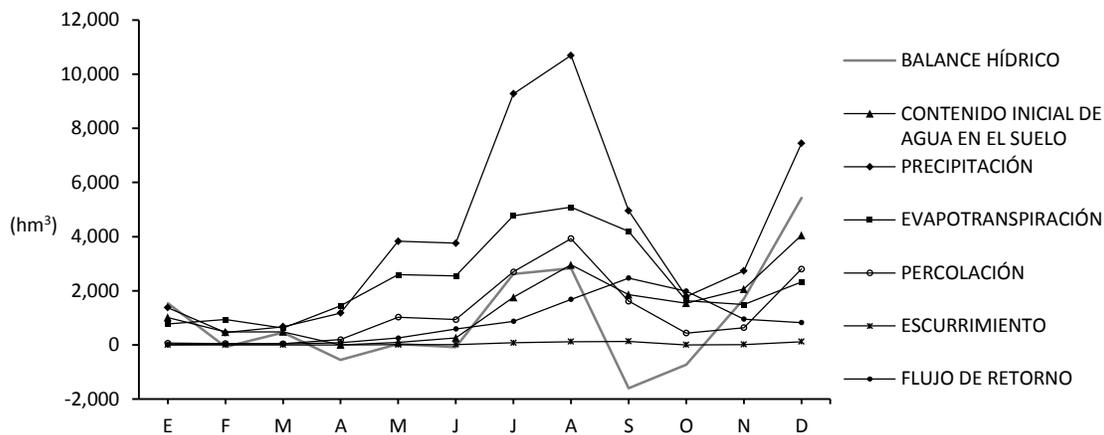


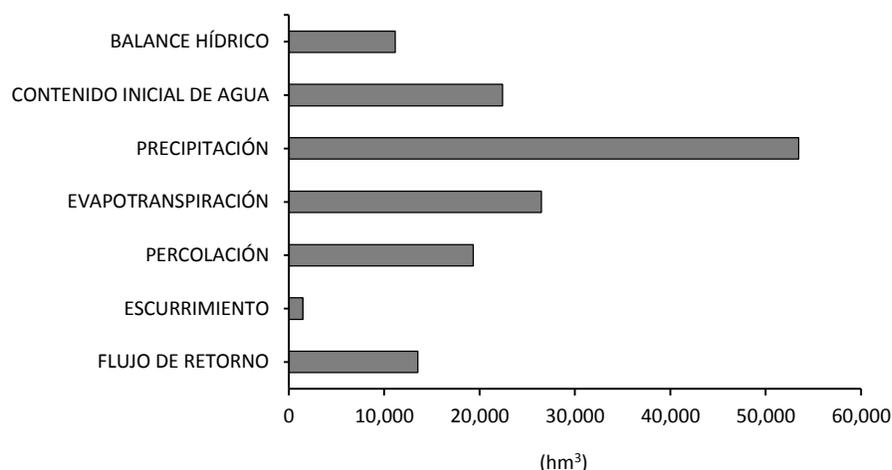
Figura 21. Balance hídrico mensual; escenario HADGEM B2 año 2030

## 5.6 Escenario GFDL A2 año 2050

### 5.6.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca

El balance hídrico anual obtenido para este escenario fue de 15,016.28 hm<sup>3</sup>, y representa la diferencia entre las entradas y pérdidas de agua en el estado. Para los componentes que contribuyen a las entradas de agua se obtuvieron 75,867.98 hm<sup>3</sup>, de estos 70% (53,450.96 hm<sup>3</sup>) corresponde a precipitación y 30% (22,417.02 hm<sup>3</sup>) a contenido inicial de agua en el suelo.

En cuanto a las pérdidas de agua, estas suman 60,851.70 hm<sup>3</sup>, de las cuales 44% (26,475.59 hm<sup>3</sup>) corresponde a evapotranspiración, 32% (19,344.17 hm<sup>3</sup>) a percolación, 22% (13,538.54 hm<sup>3</sup>) a flujo de retorno y 2% (1,493.39 hm<sup>3</sup>) a escurrimiento (Figura 22).

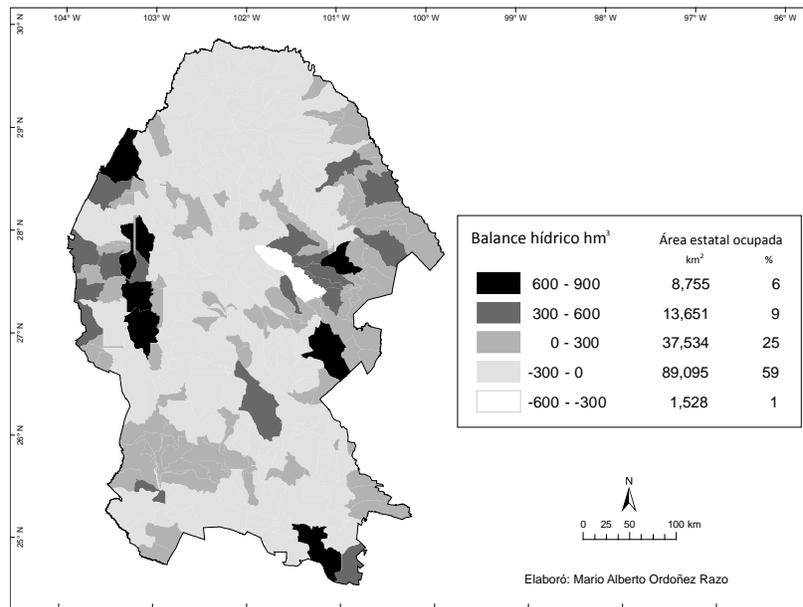


**Figura 22.** Balance hídrico anual; escenario GFDL A2 año 2050

La distribución del balance hídrico a nivel subcuenca (Figura 23), muestra que el 60% de la superficie estatal (90,623 km<sup>2</sup>) presentó balance negativo con valores que van desde -600 hasta 0 hm<sup>3</sup>, mientras que el 40% restante (59,940 km<sup>2</sup>) obtuvo balance positivo; de los cuales, a nivel estatal, 25% tiene valores de 0 a 300 hm<sup>3</sup>, 9% valores de 300 a 600 hm<sup>3</sup> y 6% valores de 600 a 900 hm<sup>3</sup>.

Las zonas que presentan balance hídrico negativo ocupan gran parte de los municipios del norte (Acuña, Zaragoza, Morelos, Múzquiz y este de Ocampo), en el centro (Frontera, Sacramento y Cuatrociénegas), del oeste (Francisco I. Madero), en el sureste (Ramos Arizpe, General Cepeda y Saltillo), del sur (Parras) y en el suroeste (Saltillo y Viesca). Los valores mínimos se presentan en una zona que cubre el este de San Buenaventura, el norte de Escobedo y el este y noreste de Progreso.

Con respecto a las zonas en donde el balance hídrico es positivo, éstas se presentan en gran parte de los municipios que se encuentran desde el noreste hasta el este del estado (desde Jiménez hasta Candela) y en algunos municipios del oeste (Sierra Mojada y oeste de Ocampo), del suroeste (Matamoros, San Pedro y noroeste de Parras) y del sureste (Viesca y sur de Saltillo).



**Figura 23.** Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario GFDL A2 año 2050

### 5.6.2 Balance hídrico mensual

Los resultados obtenidos muestran que el balance hídrico presenta valores máximos en los meses de julio y diciembre (5,073.84 y 7,192.50 hm<sup>3</sup>) y mínimos en agosto y septiembre (-512.27 y -2,303.17 hm<sup>3</sup>) (Figura 24). En los componentes que conforman el balance hídrico, correspondientes a entradas y pérdidas de agua, se obtuvieron los siguientes valores máximos y mínimos:

**Entradas.** En contenido inicial de agua en el suelo el máximo se presenta en diciembre (5,076.60 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (0 hm<sup>3</sup>), y para precipitación el valor máximo se presenta en julio (19,121.04 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (499.13 hm<sup>3</sup>).

**Pérdidas.** Para evapotranspiración el valor máximo ocurre en julio (5,836.61 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (567.11 hm<sup>3</sup>); en percolación el valor máximo se presenta en julio (8,646.18 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (39.80 hm<sup>3</sup>); en escurrimiento el valor máximo se presenta en julio (1,052.11 hm<sup>3</sup>) y el mínimo (0 hm<sup>3</sup>) de enero a abril; y para flujo de

retorno el valor máximo se presenta en agosto (4,345.65 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en enero (6.49 hm<sup>3</sup>).

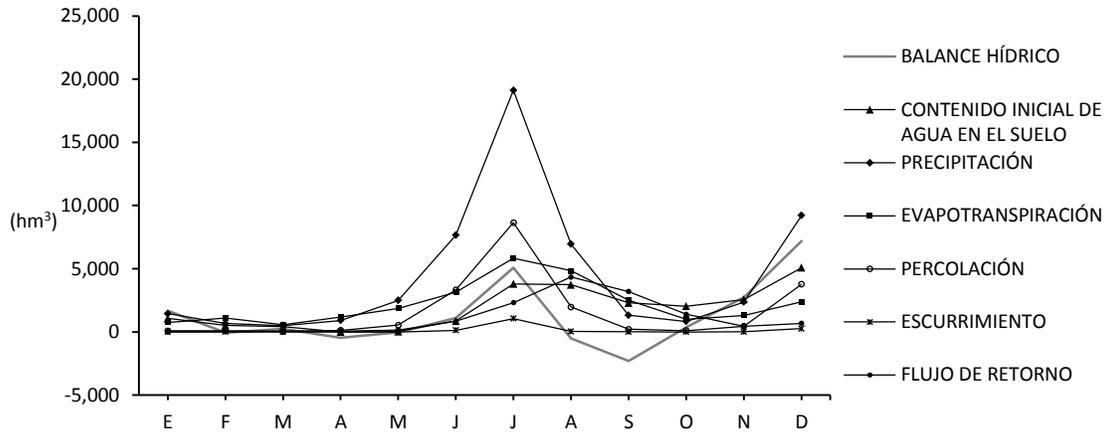


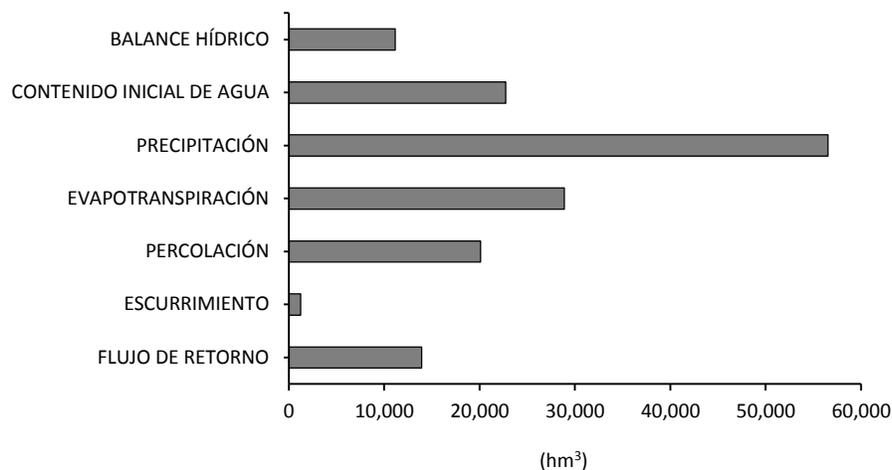
Figura 24. Balance hídrico mensual; escenario GFDL A2 año 2050

## 5.7 Escenario GFDL B2 año 2050

### 5.7.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca

El balance hídrico anual obtenido para este escenario fue de 15,113.91 hm<sup>3</sup>, y representa la diferencia entre las entradas y pérdidas de agua en el estado. Para los componentes que contribuyen a las entradas de agua se obtuvieron 79,300.55 hm<sup>3</sup>, de estos 71% (56,543.73 hm<sup>3</sup>) corresponde a precipitación y 29% (22,756.82 hm<sup>3</sup>) a contenido inicial de agua en el suelo.

En cuanto a las pérdidas de agua, estas suman 64,186.64 hm<sup>3</sup>, donde el 45% (28,895.53 hm<sup>3</sup>) corresponde a evapotranspiración, 31% (20,112.55 hm<sup>3</sup>) a percolación, 22% (13,920.80 hm<sup>3</sup>) a flujo de retorno y 2% (1,257.75 hm<sup>3</sup>) a escurrimiento (Figura 25).

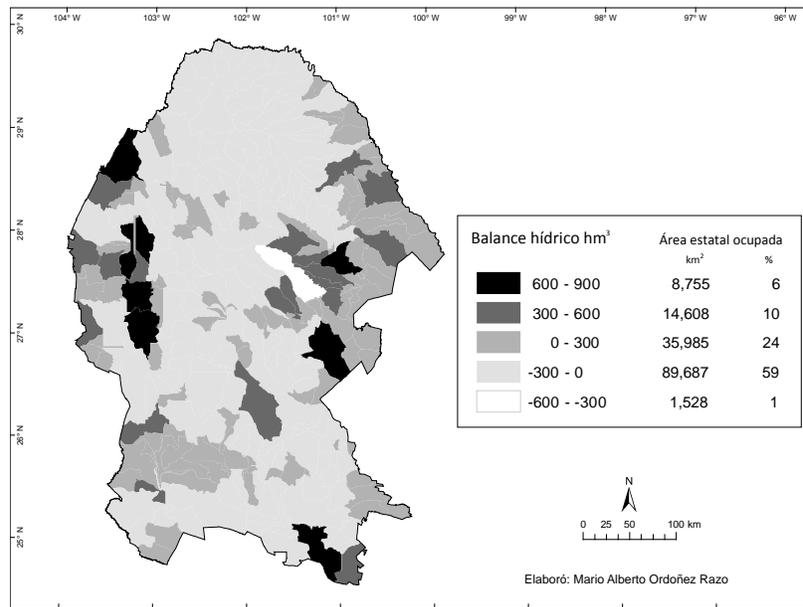


**Figura 25.** Balance hídrico anual; escenario GFDL B2 año 2050

La distribución del balance hídrico a nivel subcuenca (Figura 26), muestra que 61% de la superficie estatal (91,214 km<sup>2</sup>) tuvo balance negativo con valores entre -600 y 0 hm<sup>3</sup>, mientras el 39% restante (59,348 km<sup>2</sup>) obtuvo balance positivo; de los cuales, a nivel estatal, 24% tiene valores de 0 a 300 hm<sup>3</sup>, 10% valores de 300 a 600 hm<sup>3</sup> y 6% valores de 600 a 900 hm<sup>3</sup>.

En el estado, las zonas con balance hídrico negativo cubren municipios que se encuentran a partir del norte y hasta el sur del estado (desde Acuña hasta Parras), y también gran parte de los municipios de Castaños, Sacramento y Cuatrociénegas en el centro; de Francisco I. Madero en el oeste; de General Cepeda, Ramos Arizpe y Saltillo en el sureste; de Parras en el sur; y de Torreón y Viesca en el suroeste. Los valores mínimos se presentan en una zona que cubre el este de San Buenaventura, el norte de Escobedo y el este y noreste de Progreso.

Las zonas del estado con balance hídrico negativo se encuentran desde el noreste hasta el este (de Jiménez hasta Candela); en el sureste en Arteaga y sur de Saltillo; en el suroeste en Viesca, San Pedro y norte y sur de Torreón; y en el oeste en Ocampo y Sierra Mojada. Los valores máximos del balance se presentan en zonas reducidas del sur de Abasolo, este de Monclova, suroeste de Candela, sureste de Sabinas, el norte de Juárez, el noreste, oeste y sur de Ocampo y en el sur de Saltillo.



**Figura 26.** Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario GFDL B2 año 2050

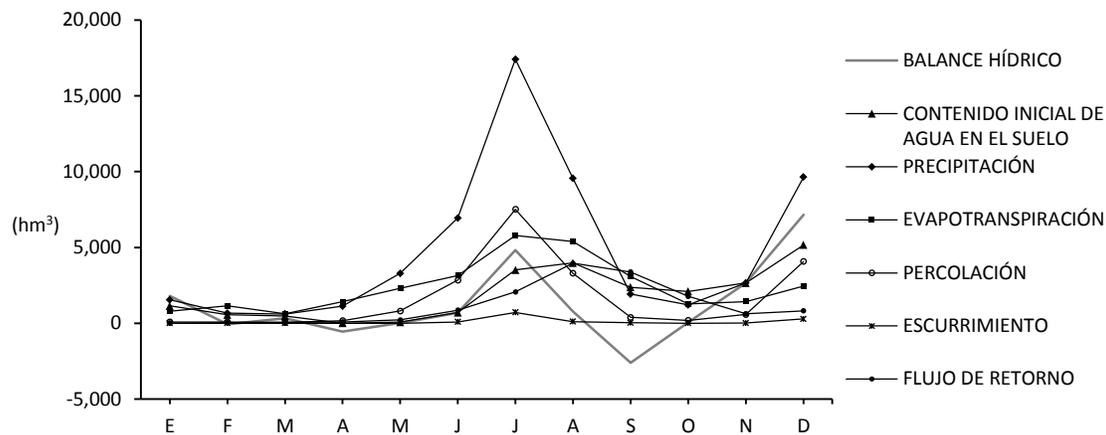
### 5.7.2 Balance hídrico mensual

Los resultados obtenidos muestran que el balance hídrico presenta valores máximos en los meses de julio y diciembre (4,820.64 y 7,160.95 hm<sup>3</sup>) y mínimos en abril y septiembre (-550.85 y -2,600.85 hm<sup>3</sup>). (Figura 27) Para los componentes que conforman el balance hídrico, correspondientes a entradas y pérdidas de agua, se obtuvieron los siguientes valores máximos y mínimos:

**Entradas.** En contenido inicial de agua en el suelo el valor máximo se presenta en diciembre (5,168.83 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (0 hm<sup>3</sup>), y para precipitación el máximo se presenta en julio (17,404.15 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (606.43 hm<sup>3</sup>).

**Pérdidas.** Para evapotranspiración el valor máximo ocurre en julio (5,799.52 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (632.08 hm<sup>3</sup>); en percolación el máximo se presenta en julio (7,514.31 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (57.41 hm<sup>3</sup>); en escurrimiento el máximo se presenta en julio (712.71 hm<sup>3</sup>) y el mínimo (0 hm<sup>3</sup>) de enero a abril; y para flujo de

retorno el máximo se presenta en agosto (3,957.29 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en enero (7.32 hm<sup>3</sup>).



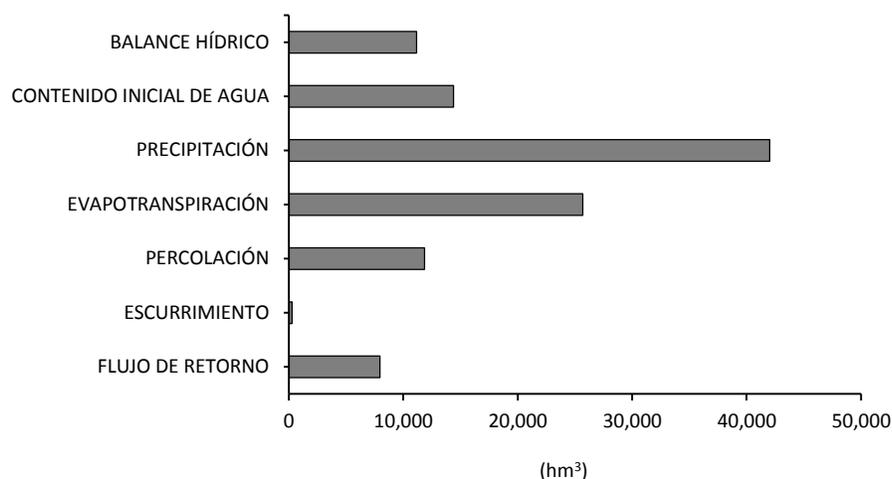
**Figura 27.** Balance hídrico mensual; escenario GFDL B2 año 2050

## 5.8 Escenario HADGEM A2 año 2050

### 5.8.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca

El balance hídrico anual obtenido para este escenario fue de 10,638.33 hm<sup>3</sup>, y representa la diferencia entre las entradas y pérdidas de agua en el estado. Para los componentes que contribuyen a las entradas de agua alcanzaron 56,422.90 hm<sup>3</sup>, de estos 74% (42,027.62 hm<sup>3</sup>) corresponde a precipitación y 26% (14,395.28 hm<sup>3</sup>) a contenido inicial de agua en el suelo.

En cuanto a las pérdidas de agua, estas suman 45,784.57 hm<sup>3</sup>, de las cuales el 56% (25,687.55 hm<sup>3</sup>) corresponde a evapotranspiración, 26% (11,851.12 hm<sup>3</sup>) a percolación, 17% (7,954.02 hm<sup>3</sup>) a flujo de retorno y 1% (291.88 hm<sup>3</sup>) a escurrimiento (Figura 28).

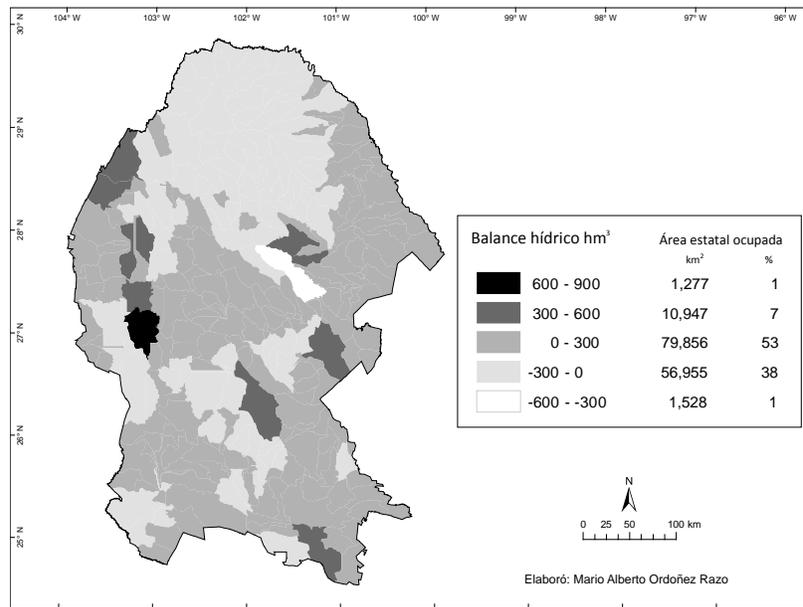


**Figura 28.** Balance hídrico anual; escenario HADGEM A2 año 2050

La distribución del balance hídrico a nivel subcuenca (Figura 29), muestra que 39% de la superficie estatal (58,483 km<sup>2</sup>) tuvo balance negativo con valores entre -600 y 0 hm<sup>3</sup>, mientras el 61% restante (92,080 km<sup>2</sup>) obtuvo balance positivo; de los cuales, a nivel estatal, 53% tiene valores de 0 a 300 hm<sup>3</sup>, 7% valores de 300 a 600 hm<sup>3</sup> y 1% valores de 600 a 900 hm<sup>3</sup>.

Las zonas de balance hídrico negativo se concentran, principalmente en el norte del estado en municipios como Acuña, Zaragoza, Múzquiz, Morelos San Buenaventura y el noreste de Ocampo; también en municipios del centro como Sacramento, Frontera, sur de Cuatrociénegas y noroeste de Castaños; y en municipios del oeste y suroeste como Francisco I. Madero, Saltillo y el este de Viesca. Los valores mínimos se presentan en una zona que cubre el este de San Buenaventura, norte de Escobedo y este y noreste de Progreso.

Las zonas con balance hídrico positivo se encuentran en casi todo el estado, excepto en la parte norte. Los valores máximos del balance se presentaron en el sureste del municipio de Ocampo, seguido del sur de Múzquiz, este de Sabinas, este de Monclova, sureste de Candela, noreste de Ramos Arizpe, sureste de Cuatrociénegas y sur de Saltillo.



**Figura 29.** Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario HADGEM A2 año 2050

### 5.8.2 Balance hídrico mensual

Los resultados obtenidos muestran que el balance hídrico presenta valores máximos en julio y diciembre (2,401.87 y 4,778.82 hm<sup>3</sup>) y mínimos en septiembre y octubre (-873.76 y -849.88 hm<sup>3</sup>) (Figura 30). Para los componentes que conforman el balance hídrico, correspondientes a entradas y pérdidas de agua, se obtuvieron los siguientes valores máximos y mínimos:

**Entradas.** En contenido inicial de agua en el suelo el valor máximo se presenta en diciembre (3,597.82 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (0 hm<sup>3</sup>), y para precipitación el máximo se presenta en agosto (8,746.21 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (150.28 hm<sup>3</sup>).

**Pérdidas.** Para evapotranspiración el valor máximo ocurre en agosto (4,678.38 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (627.02 hm<sup>3</sup>); en percolación el máximo se presenta en agosto (2,856.32 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (7.24 hm<sup>3</sup>); en escurrimiento el máximo se presenta en septiembre (132.27 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (0 hm<sup>3</sup>); y para flujo de retorno el máximo se presenta en septiembre (2,023.77 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en enero (8.48 hm<sup>3</sup>).

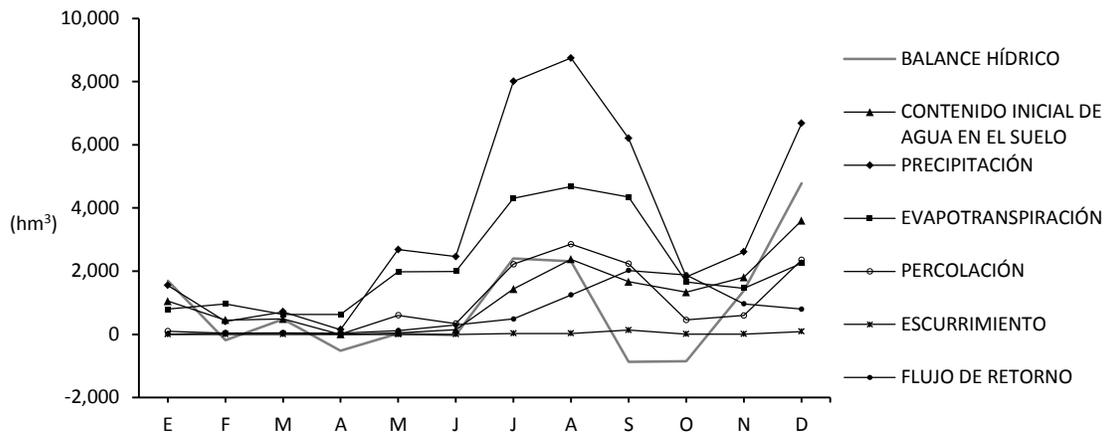


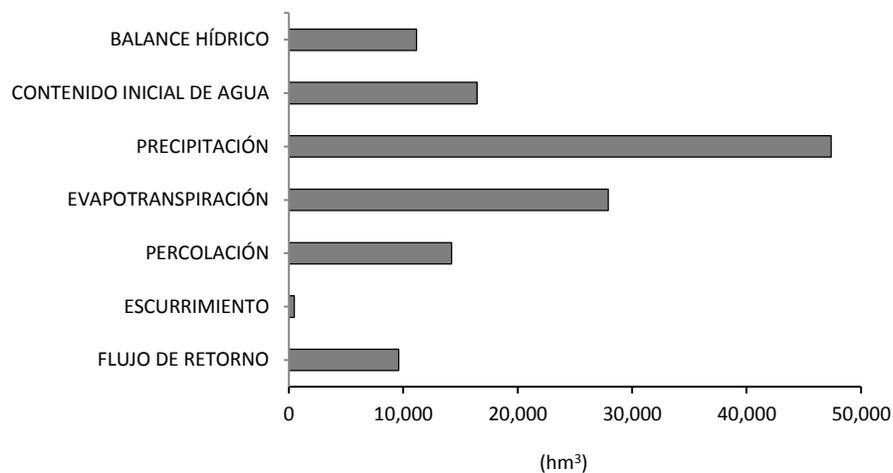
Figura 30. Balance hídrico mensual; escenario HADGEM A2 año 2050

## 5.9 Escenario HADGEM B2 año 2050

### 5.9.1 Balance hídrico anual y su distribución a nivel subcuenca

El balance hídrico anual obtenido para este escenario fue de 11,627.35 hm<sup>3</sup>, y representa la diferencia entre las entradas y pérdidas de agua en el estado. Para los componentes que contribuyen a las entradas de agua se obtuvieron 63,846.29 hm<sup>3</sup>, de estos 74% (47,395.20 hm<sup>3</sup>) corresponde a precipitación y 26% (16,451.10 hm<sup>3</sup>) a contenido inicial de agua en el suelo.

En cuanto a las pérdidas de agua, estas alcanzan 52,218.94 hm<sup>3</sup>, de las cuales 53% (27,926.33 hm<sup>3</sup>) corresponde a evapotranspiración, 27% (14,219.15 hm<sup>3</sup>) a percolación, 18% (9,595.77 hm<sup>3</sup>) a flujo de retorno y 1% (477.69 hm<sup>3</sup>) a escurrimiento (Figura 31).

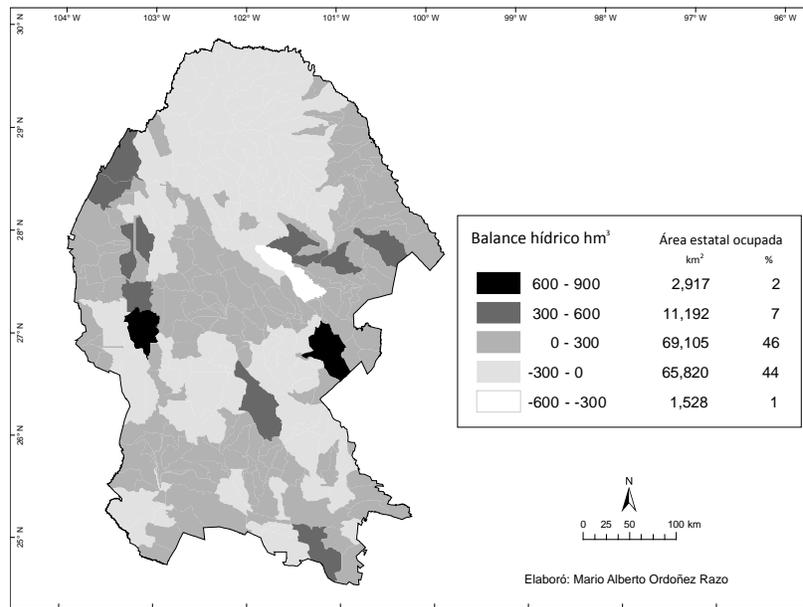


**Figura 31.** Balance hídrico anual; escenario HADGEM B2 año 2050

La distribución del balance hídrico a nivel subcuenca (Figura 32), muestra que 45% de la superficie estatal (67,348 km<sup>2</sup>) presentó balance negativo con valores que van desde -600 hasta 0 hm<sup>3</sup>, mientras que 55% restante (83,214 km<sup>2</sup>) obtuvo balance positivo; de los cuales, a nivel estatal, 46% tiene valores de 0 a 300 hm<sup>3</sup>, 7% valores de 300 a 600 hm<sup>3</sup> y 2% valores de 600 a 900 hm<sup>3</sup>.

Las zonas con balance negativo se presentan, principalmente, en municipios del norte, centro, sureste y oeste del estado, siendo Acuña, Zaragoza, Morelos, Múzquiz, Frontera, Cuatrociénegas, Francisco I. Madero, Ramos Arizpe, Saltillo y Viesca los municipios en donde estas zonas cubren casi toda la superficie. Los valores mínimos se presentan en una zona que cubre el este de San Buenaventura, norte de Escobedo y el este y noreste de Progreso.

En cuanto a las zonas con balance hídrico positivo, las que tienen los valores máximos se encuentran al suroeste de Ocampo, al sur de Abasolo, este de Monclova y sureste de Candela.



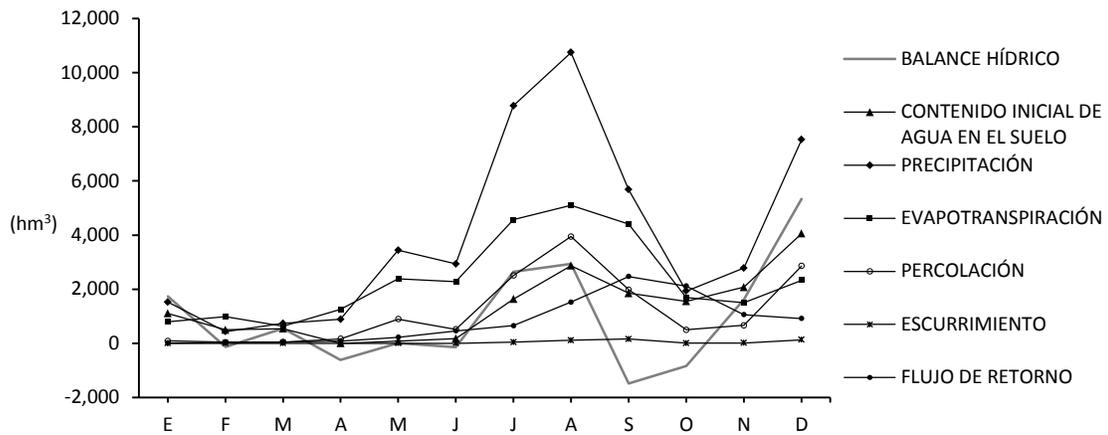
**Figura 32.** Distribución del balance hídrico anual a nivel subcuenca; escenario HADGEM B2 año 2050

### 5.9.2 Balance hídrico mensual

Los resultados obtenidos muestran que el balance hídrico presenta valores máximos en de agosto y diciembre (2,931.66 y 5,339.79 hm<sup>3</sup>) y mínimos en septiembre y octubre (-1,480.73 y -832.64 hm<sup>3</sup>) (Figura 33). Para los componentes que conforman el balance hídrico, correspondientes a entradas y pérdidas de agua, se obtuvieron los siguientes valores máximos y mínimos:

**Entradas.** En contenido inicial de agua en el suelo el valor máximo se presenta en diciembre (4,057.16 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (0 hm<sup>3</sup>), y para precipitación el máximo se presenta en agosto (10,742.13 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en febrero (437.21 hm<sup>3</sup>).

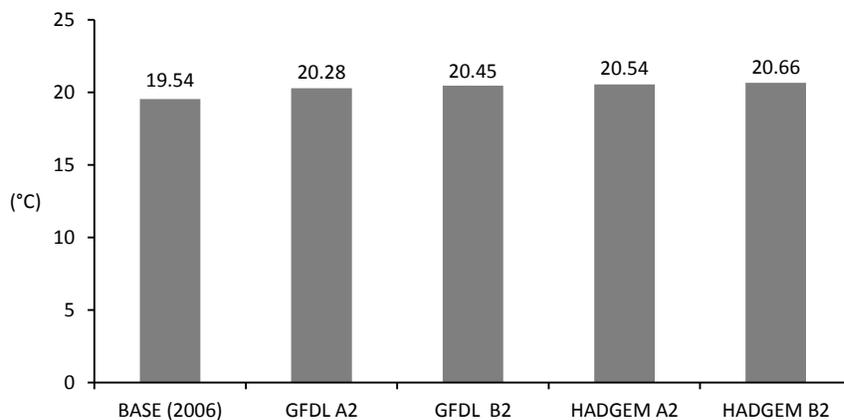
**Pérdidas.** En evapotranspiración el valor máximo ocurre en agosto (5,094.79 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en marzo (637.03 hm<sup>3</sup>); en percolación el máximo en agosto (3,945.06 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en febrero (45.86 hm<sup>3</sup>); en escurrimiento el máximo en septiembre (159.58 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en abril (0 hm<sup>3</sup>); y para flujo de retorno el máximo en septiembre (2,469.21 hm<sup>3</sup>) y el mínimo en enero (7.73 hm<sup>3</sup>).



**Figura 33.** Balance hídrico mensual; escenario HADGEM B2 año 2050

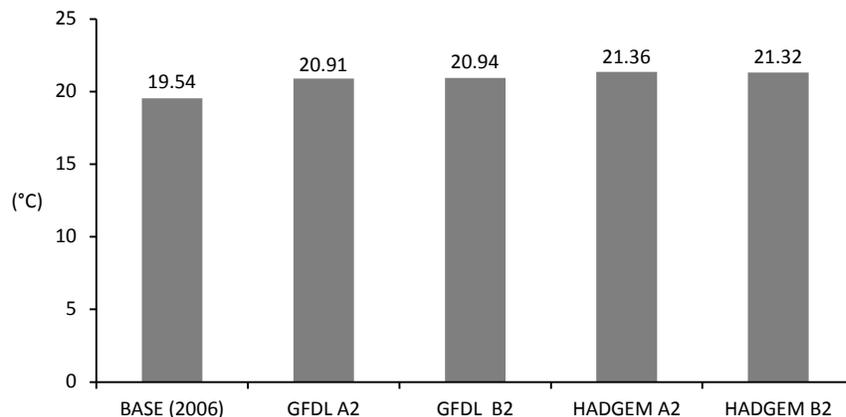
### 5.10 Variación de la temperatura media anual: escenario base (2006) y escenarios de los años 2030 y 2050

La temperatura media anual obtenida en el escenario base (2006) para el estado de Coahuila fue de 19.54 °C, para el año 2030 las variaciones que presentan los modelos GFDL y HADGEM son, principalmente, incrementos (Figura 34). En el modelo GFDL estos incrementos son de 0.74 °C en el escenario A2 y de 0.91 °C en el B2, mientras que en el modelo HADGEM los incrementos son mayores; 1 °C en el escenario A2 y 1.12 °C en el B2.



**Figura 34.** Temperatura media anual escenario base (2006) y escenarios del año 2030

Para el año 2050 las variaciones en la temperatura media anual son mayores que para 2030 (Figura 35). Los escenarios del modelo HADGEM presentan los mayores incrementos de la temperatura media anual con respecto a la obtenida en el escenario base (2006); así, para el modelo HADGEM hay un incremento de 1.82 °C en el escenario A2 y de 1.78 °C en el escenario B2, y para el modelo GFDL, este presenta un incremento de 1.37 °C en el escenario A2 y 1.40 °C en el escenario B2.



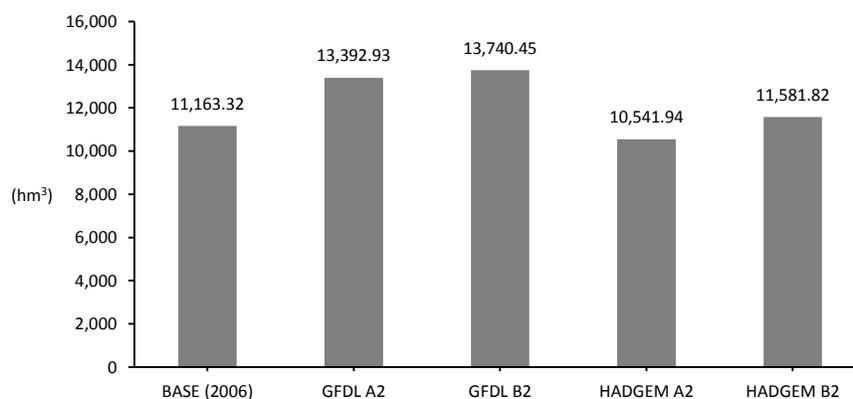
**Figura 35.** Temperatura media anual; escenario base (2006) y escenarios del año 2050

## 5.11 Variaciones del balance hídrico anual en los escenarios simulados

### 5.11.1 Variación del balance hídrico: escenario base (2006) y escenarios del año 2030

El resultados del escenario base (2006) y de los simulados para el año 2030 (Figura 36), muestran que el balance hídrico en el escenario base fue de 11,163.32 hm<sup>3</sup>, y que en los escenarios del modelo GFDL este se incrementa 19.97% (2,229.61 hm<sup>3</sup>) en el escenario A2 y 23.09% (2,577.13 hm<sup>3</sup>) en el B2. Para el modelo HADGEM, en el escenario A2 el balance hídrico disminuye 5.57% (621.38 hm<sup>3</sup>), mientras que en el B2 aumenta 3.75% (418.50 hm<sup>3</sup>).

Para el año 2030 los escenarios en donde se obtienen los mayores incrementos corresponden al modelo GFDL, siendo el escenario B2 el que proyecta mayor aumento. En contraste, el escenario A2 del modelo HADGEM es el único donde el balance hídrico disminuye.



**Figura 36.** Balance hídrico; escenario base (2006) y escenarios del año 2030

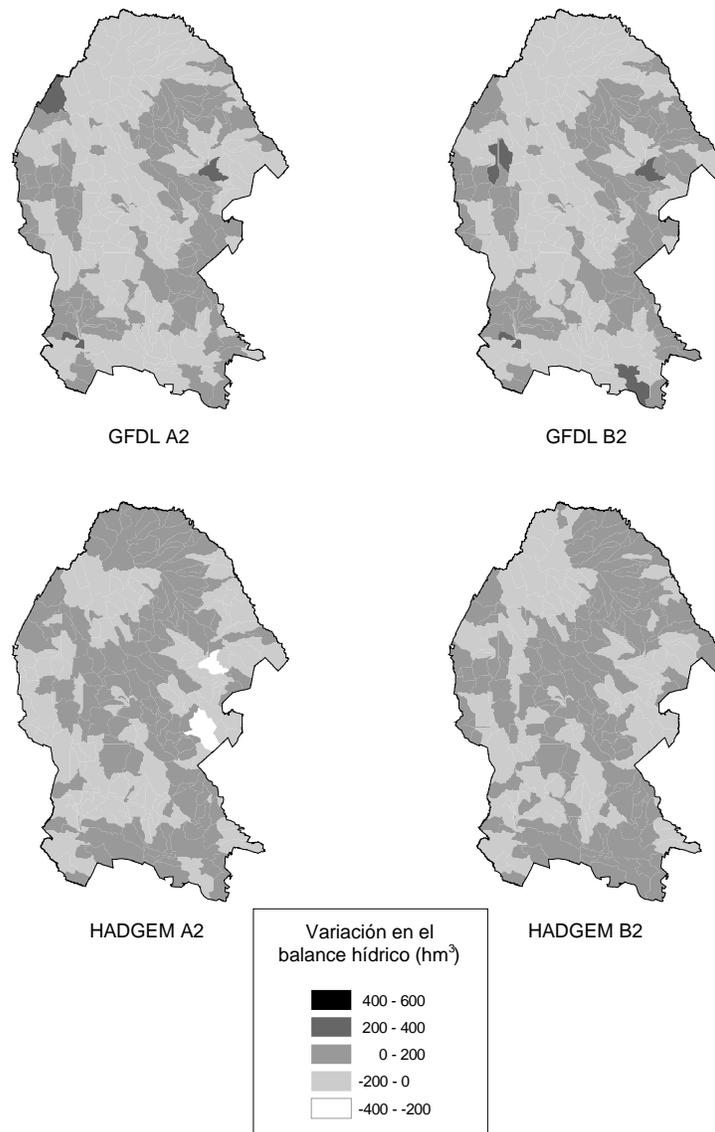
### 5.11.2 Distribución estatal de las variaciones del balance hídrico de los escenarios del año 2030 con respecto al escenario base (2006)

Los resultados del balance hídrico a nivel subcuenca permiten conocer la distribución de las variaciones entre el balance hídrico de los escenarios simulados para el año 2030 y el del escenario base (2006), estas variaciones se encuentran dentro de un rango que va de  $-400 \text{ hm}^3$  en las variaciones negativas y hasta  $600 \text{ hm}^3$  en las variaciones positivas (Figura 37).

En los escenarios del modelo GFDL las variaciones negativas se encuentran dentro del rango de  $-200$  a  $0 \text{ hm}^3$ ; en el escenario A2 estas variaciones representan 60% de la superficie estatal ( $90,326 \text{ km}^2$ ), y en el escenario B2 representan 58% ( $87,227 \text{ km}^2$ ). En cuanto a las variaciones positivas, estas se encuentran dentro de los rangos de 0 a 200 y de 200 a  $400 \text{ hm}^3$ . La superficie estatal con variaciones dentro del rango de 0 a 200  $\text{hm}^3$  ocupa 38% ( $57,693 \text{ km}^2$ ) en el escenario A2 y 39% ( $59,461 \text{ km}^2$ ) en el escenario B2. Y la superficie estatal con variaciones positivas dentro del rango de 200 a  $400 \text{ hm}^3$

es de 2% (2,544 km<sup>2</sup>) en el escenario A2 y de 3% (3,875 km<sup>2</sup>) en el escenario B2. En el escenario GFDL A2, las zonas que presentan las variaciones positivas más altas se encuentran en el norte de Ocampo, sureste de Sabinas, este de Juárez y norte de Viesca. En el escenario B2 las variaciones positivas se presentan en el oeste de Ocampo, sureste de Sabinas, oeste de Juárez, sur de Saltillo y norte de Viesca.

Para el modelo HADGEM las variaciones negativas fluctúan dentro el rango de -400 a -200 hm<sup>3</sup> ocupan el 2% (2,395 km<sup>2</sup>) de la superficie estatal en el escenario A2, mientras que la superficie ocupada por las variaciones dentro del rango de -200 a 0 hm<sup>3</sup>, es de 43% (64,941 km<sup>2</sup>) en el escenario A2 y de 41% (62,304 km<sup>2</sup>) en el escenario B2. En lo que respecta a las variaciones positivas, estas solo se encuentran dentro del rango de 0 a 200 hm<sup>3</sup> en los dos escenarios; ocupando el 55% (83,227 km<sup>2</sup>) de la superficie estatal en el escenario A2 y 59% (88,259 km<sup>2</sup>) en el escenario B2. En los escenarios del modelo HADGEM no se presenta zonas con variaciones positivas altas, por el contrario, en el escenario A2 se presentan las zonas con variaciones negativas más importantes, estas se encuentran en el sureste de Sabinas, este de Juárez, este de Monclova y sureste de Candela.



**Figura 37.** Variación del balance hídrico de los escenarios del año 2030 con respecto al escenario base (2006)

Los resultados a nivel subcuenca permitieron conocer la superficie que ocupa el balance hídrico positivo y negativo en el estado (Figura 38). La superficie estatal con balance hídrico positivo representó 56% (84,460 km<sup>2</sup>) en el escenario base (2006); el 41% (62,102 km<sup>2</sup>) en el escenario GFDL A2 y 40% (60,673 km<sup>2</sup>) en el GFDL B2; y para el modelo HADGEM 58% (87,518 km<sup>2</sup>) en el escenario A2 y 52% (78,795 km<sup>2</sup>) en el B2. Estos resultados permiten identificar una reducción de la superficie estatal con

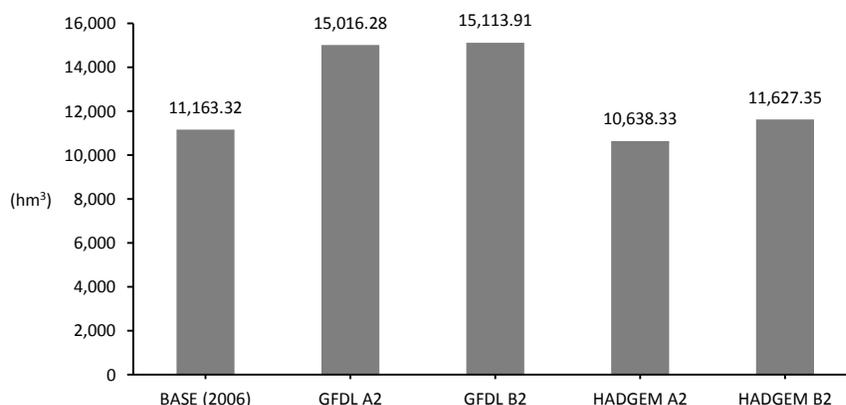
balance hídrico positivo en los escenarios A2 y B2 del modelo GFDL y el escenario B2 del modelo HADGEM; afectando principalmente a los municipios de Ocampo, Sierra Mojada, Francisco I. Madero, Cuatrociénegas, Parras, Ramos Arizpe, Torreón, Viesca y San Pedro. El único escenario en donde la superficie con balance hídrico positivo aumenta es el A2 del modelo HADGEM, principalmente en los municipios de General Cepeda, Parras y Saltillo.



**Figura 38.** Distribución estatal del balance hídrico; escenario base (2006) y escenarios del año 2030

### 5.11.3 Variación del balance hídrico: escenario base (2006) y escenarios del año 2050

Partiendo del balance hídrico del escenario base (2006) que fue de 11,163.32 hm<sup>3</sup>, y comparando el balance hídrico de los escenarios simulados para el año 2050 (Figura 39), se puede observar que en el modelo GFDL el balance hídrico aumentara 34% (3,852.96 hm<sup>3</sup>) en el escenario A2 y 35.39% en el B2, mientras que en el modelo HADGEM disminuirá 4.70% (524.99 hm<sup>3</sup>) en el escenario A2 y aumentara 4.16% (464.03 hm<sup>3</sup>) en el B2. Estos resultados muestran que el balance hídrico solo disminuye en el escenario A2 del modelo HADGEM, y que aumenta en los escenarios restantes, siendo el escenario B2 del modelo GFDL en donde se presenta el mayor aumento.



**Figura 39.** Balance hídrico: escenario base (2006) y escenarios del año 2050

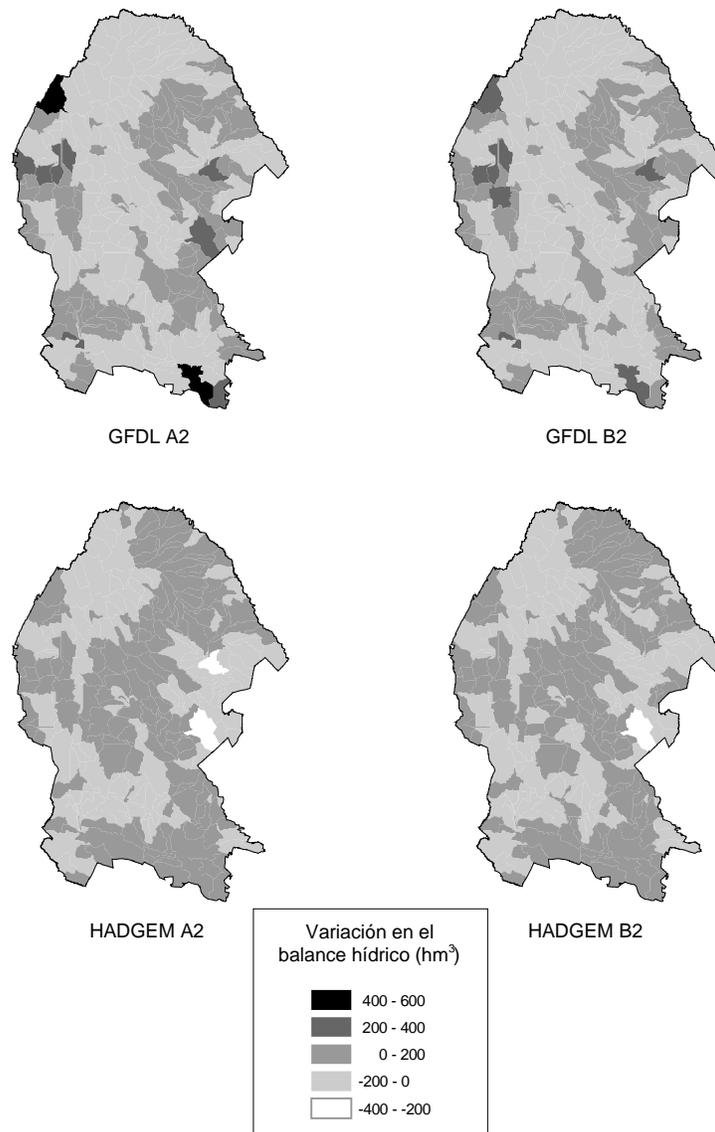
### 5.11.4 Distribución estatal de las variaciones del balance hídrico de los escenarios del año 2050 con respecto al escenario base (2006)

Las variaciones del balance hídrico de los escenarios del 2050 con respecto al obtenido en el escenario base (2006) (Figura 40) son las siguientes:

En los escenarios del modelo GFDL las variaciones negativas se encuentran dentro del rango de -200 a 0 hm<sup>3</sup>, y ocupan 59% (88,967 km<sup>2</sup>) de la superficie estatal en el

escenario A2 y 62% (92,832 km<sup>2</sup>) en B2. En este modelo las variaciones positivas se encuentran dentro de tres rangos; 1) de 0 a 200 hm<sup>3</sup>, que representa 35% de la superficie estatal en el escenario A2 y un 34% en B2; 2) de 200 a 400 hm<sup>3</sup>, ocupa el 4% (6,477 km<sup>2</sup>) de la superficie del estado el escenario A2 y 5% (6,814 km<sup>2</sup>) el B2; 3) de 400 a 600 hm<sup>3</sup>, ocupa una superficie estatal de 2% el escenario A2. Los municipios en los que se encuentran las zonas con las variaciones positivas más altas, tanto en el escenario A2 como en el B2, son: Ocampo, Sierra Mojada, Abasolo, Monclova, Candela y Saltillo

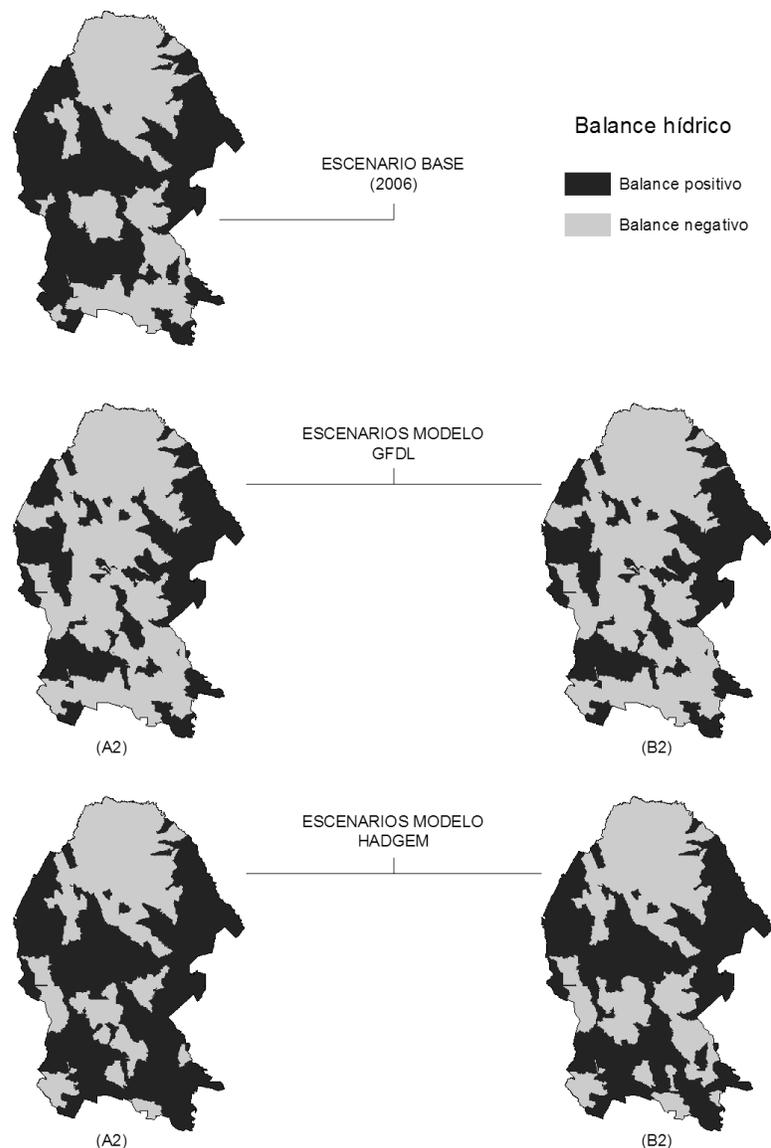
En los escenarios del modelo HADGEM la superficie estatal ocupada por las variaciones negativas dentro del rango de -400 a -200 hm<sup>3</sup> es de 2% (2,395 km<sup>2</sup>) en el escenario A2 y 1% (1,640 km<sup>2</sup>) en el B2, y las variaciones negativas dentro del rango de -200 a 0 hm<sup>3</sup> ocupan el 42% (63,604 km<sup>2</sup>) en el escenario A2 y 44% (65,922 km<sup>2</sup>) en el B2. En cuanto a la superficie ocupada por las variaciones positivas, estas se encuentran dentro del rango que va de 0 a 200 hm<sup>3</sup>; representando 56% (84,564 km<sup>2</sup>) en el escenario A2 y 55% (83,000 km<sup>2</sup>) en el B2. En los escenarios del modelo HADGEM destacan variaciones negativas de importancia que afectan zonas de los municipios de Sabinas, Juárez, Monclova y Candela.



**Figura 40.** Variaciones del balance hídrico de los escenarios del año 2050 con respecto al escenario base (2006)

Conociendo el balance hídrico a nivel subcuenca del escenario base (2006) y de los escenarios simulados para el año 2050, se puede identificar la superficie estatal cubierta tanto por balance hídrico positivo como por balance hídrico negativo (Figura 41). En el escenario base (2006) la superficie con balance hídrico positivo fue de 56% (84,460 km<sup>2</sup>); en los escenarios del modelo GFDL fue de 40% (59,940 km<sup>2</sup>) en A2 y de 39% (59,348 km<sup>2</sup>) en B2; y en los escenarios del modelo HADGEM fue de 61% (92,080

km<sup>2</sup>) en A2 y de 55% (83,215 km<sup>2</sup>) en B2. Estos resultados muestran que la superficie estatal con balance hídrico positivo se reduce en los escenarios GFDL A2 y B2 y HADGEM B2; afectando a municipios como Sierra Mojada, Ocampo, Francisco I. Madero y Cuatrociénegas. En el escenario A2 del modelo HADGEM solo se afectan Sierra Mojada y Francisco I. Madero, mientras que se benefician municipios como Castañas, Ramos Arizpe, Cuatrociénegas, Parras y Saltillo.



**Figura 41.** Distribución estatal del balance hídrico; escenario base (2006) y escenarios del año 2050

## **5.12 Variaciones del balance hídrico mensual en los escenarios simulados**

### **5.12.1 Balance hídrico del escenario base (2006) y escenarios del año 2030**

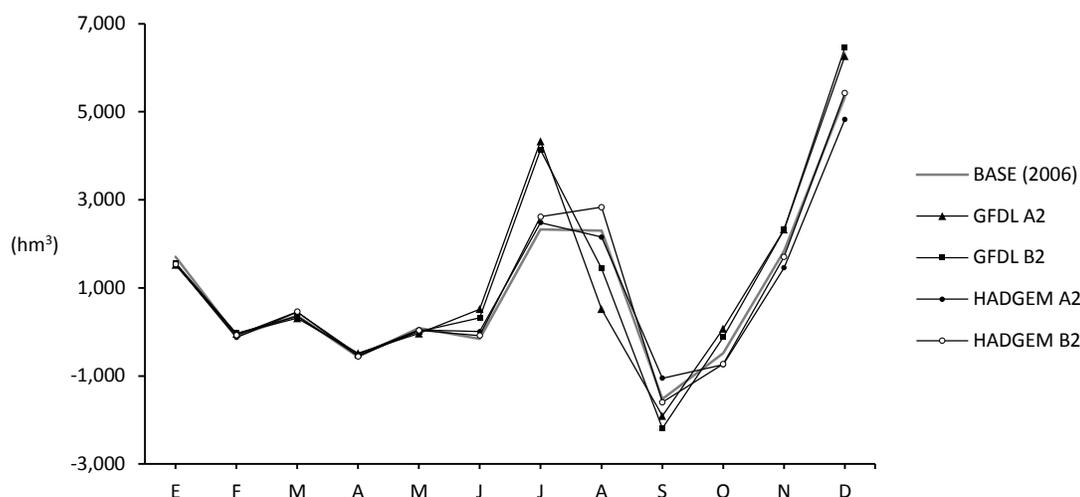
Los resultados del balance hídrico mensual de los escenarios simulados para el año 2030 muestran las siguientes variaciones con respecto al escenario base (2006):

De enero a mayo las variaciones son mínimas, el aumento mayor se da en marzo ( $86.35 \text{ hm}^3$ ) en el escenario B2 del modelo HADGEM, y el descenso más importante ocurre en enero en el escenario A2 del modelo GFDL ( $-185.56 \text{ hm}^3$ ). A partir de junio y hasta diciembre todos los escenarios presentan incrementos y descensos en los valores del balance hídrico, por lo que en estos meses el balance hídrico de los escenarios del año 2030 tiene mayor variabilidad con respecto al balance hídrico del escenario base (2006).

En el modelo GFDL los mayores incrementos en el balance hídrico, ocurren en junio, julio, octubre y noviembre para el escenario A2 y para diciembre en el B2. Los descensos más importantes se presentan en agosto con el escenario A2 y en diciembre con el B2.

Para el modelo HADGEM los incrementos más importantes se presentan en julio y agosto con el escenario B2 y en septiembre con el A2. En cuanto a los descensos, los más importantes se presentan en octubre, noviembre y diciembre con el escenario A2.

A nivel general, el modelo GFDL presenta las mayores variaciones del balance hídrico, el mayor incremento se presenta en el mes de julio en el escenario A2 del modelo GFDL ( $2,000.60 \text{ hm}^3$ ) y el mayor descenso se presenta en el mes de agosto del mismo escenario ( $-1,785.51 \text{ hm}^3$ ).



**Figura 42.** Variación del balance hídrico mensual; escenario base (2006) y escenarios del año 2030

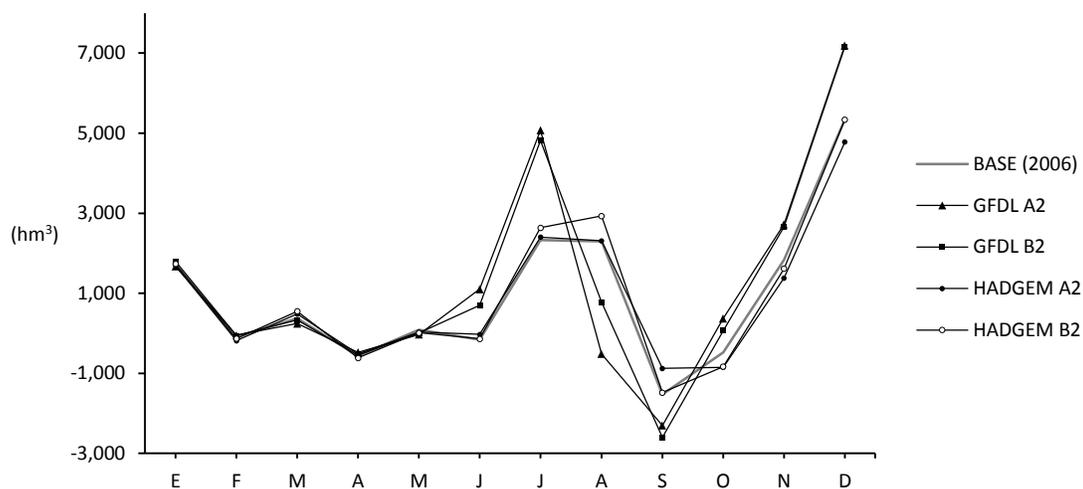
### 5.12.2 Balance hídrico del escenario base (2006) y escenarios del año 2050

Los resultados del balance hídrico mensual de los escenarios simulados para el año 2050 muestran las siguientes variaciones con respecto al escenario base (2006):

De enero a mayo en ningún escenario existen variaciones importantes en los valores del balance hídrico, el aumento más grande se presenta en el mes de abril ( $177.36 \text{ hm}^3$ ) en el escenario B2 del modelo HADGEM, mientras que el descenso más importante ocurre en marzo ( $-125.60 \text{ hm}^3$ ) en el escenario A2 del modelo GFDL.

Desde junio y hasta diciembre existe mayor variabilidad en el balance hídrico de los escenarios simulados; en el modelo GFDL las variaciones más importantes se presentan con incrementos en el escenario A2 en los meses de junio, julio, octubre, noviembre y diciembre, y con descensos en agosto y septiembre en los escenarios A2 y B2. En el modelo HADGEM los principales incrementos se presentan en julio y agosto del escenario B2 y en septiembre en el escenario A2, y los principales descensos se presentan en el escenario A2 en los meses de octubre, noviembre y diciembre.

En el balance hídrico mensual de los escenarios del año 2050 las principales variaciones ocurren en el escenario A2 del modelo GFDL, en él se encuentran el incremento más importante en el mes de julio (5,745.53 hm<sup>3</sup>) y el principal descenso en el mes de agosto (-2,813.81 hm<sup>3</sup>)



**Figura 43.** Variación del balance hídrico mensual: escenario base (2006) y escenarios del año 2050

## 6. DISCUSIÓN

Los resultados del balance hídrico anual para los años 2030 y 2050, coinciden con las proyecciones publicadas por el IPCC (2007), donde menciona que algunas zonas ubicadas en altas latitudes se verán beneficiadas ante los efectos del cambio climático. En el estado se observó que en gran parte de los escenarios, excepto en los escenarios HADGEM A2 2030 y HADGEM B2 2050, el balance hídrico aumenta con respecto al escenario base (2006). Sin embargo, al analizar su distribución a nivel subcuenca se observó que las zonas con disponibilidad de agua se ven reducidas en la mayor parte de los escenarios simulados, excepto en los escenarios A2 y B2 del modelo HADGEM en los años 2030 y 2050; estos resultados coinciden con las proyecciones publicadas por Gay (2005), en donde se prevé una disminución en la disponibilidad de los recursos hídricos en las zonas del norte del país.

Al analizar las simulaciones realizadas para los años 2030 y 2050 se observó que la precipitación disminuye en la mayor parte de las estaciones climáticas que se utilizaron en este estudio, lo cual concuerda con las proyecciones publicadas por el Centro de Ciencias de la Atmosfera de la UNAM (CCA), donde se prevé que la precipitación disminuya para esos años. Sin embargo los resultados obtenidos en los escenarios de los años 2030 y 2050 se contraponen a ambos datos de precipitación, esto se debió posiblemente a que quizás aquellas estaciones en donde la precipitación aumentó tuvieron mayor influencia que las estaciones en donde disminuyó.

En las simulaciones se identificó que en referencia a las estimaciones del escenario base (2006), las variaciones en el balance hídrico mensual de los años 2030 y 2050 tienen un comportamiento similar; de enero a mayo donde las variaciones son mínimas y de junio a diciembre se presentan variaciones de importancia, siendo los meses de junio, julio, agosto y septiembre en donde éstas variaciones alcanzan sus valores máximos. Los resultados del balance hídrico mensual mostraron que los escenarios del modelo GFDL en los años 2030 y 2050 presentan las variaciones más importantes con respecto al escenario base (2006).

Con respecto a la aplicación del modelo SWAT para simular las condiciones hidrológicas del estado, este se presentó como una herramienta eficaz en el cálculo del balance hídrico, incluso en zonas 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 la evolución de los procesos hídricos ante el cambio climático proyectado para los años 2030 y 2050 en los escenarios A2 y B2 de los modelos GFDL y HADGEM.

## **7. CONCLUSIONES**

El cambio climático modificará los procesos hídricos del estado de Coahuila, las proyecciones generadas por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) pronostican aumentos en las temperaturas y descensos en las precipitaciones. Los resultados obtenidos con los modelos GFDL y HADGEM difieren con relación a la intensidad de los cambios que se presentaran por efecto del cambio climático global, la distribución de los zonas con disponibilidad de agua es diferente entre los modelos utilizados, lo que muestra la importancia de utilizar diversos modelos para generar proyecciones con el fin de evaluar los cambios que podrían ocurrir en el futuro, y así planear el manejo más conveniente de los recursos hídricos ante los diferentes escenarios proyectados, tanto para los que presentan condiciones óptimas y que suponen oportunidades, así como para los que vislumbran un futuro con condiciones adversas en cuanto a disponibilidad y distribución de los recursos hídricos.

Los efectos del clima proyectado para los años 2030 y 2050 causaran incrementos en el balance hídrico del estado de Coahuila. Sin embargo, la distribución de estos será desigual en el estado; los resultados prevén que el aumento en la disponibilidad de agua se concentrará solo en algunas zonas, mientras que gran parte del estado la superficie sin disponibilidad de agua se incrementará.

La aplicación del modelo SWAT facilitó la evaluación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos del estado de Coahuila, permitiendo simular los componentes necesarios para calcular el balance hídrico del escenario base (2006) y de los escenarios de los años 2030 y 2050.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Bates, B.C., Kundzewicz, Z. W., Wu S. y Palutikof, J.P. (2008). El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 p.

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, 14 (2): 5-28

Blanco A., Martínez S. y Cisneros C. (1998). Un modelo de balances hídricos para cuencas hidrográficas: discusión, propuesta y aplicaciones. Universidad Tecnológica Mixteca (UTM), México, 10 p.

Bonini, A., Guzmán, J., Matamoros, D. (2009), Estimación de Caudales y Sedimentos en la Cuenca del Río Chaguana, Mediante El Modelo Matemático Avswat. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 10 p.

Bravo, L., Sánchez, J., Lemus, O. (2000). Evaluación integral de la cuenca del Río Bravo usando un sistema de información geográfica. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente: Memorias técnicas. México, D.F, pp.1-20

CCA. (2009). Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), UNAM, México.  
<http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico> Consultado el 24 de noviembre de 2009.

CONAGUA. (2009). Estadísticas del Agua en México 2008. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México. 233 p.

CONAMA. (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Universidad de Chile, Chile. 47 p.

Conde C. y Palma B. (2005). Escenarios de riesgo para el territorio veracruzano ante un posible cambio climático. Universidad Veracruzana (UV), México, 15 p.

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, 105 p.

CODESAN. (2006). Pago por servicios ambientales, buscando incentivos para promover el uso sostenible de los recursos y generar nuevas y dinámicas de desarrollo en las cuencas hidrográficas. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecoregión Andina (CODESAN), Lima, Perú, pp. 1-4

Garza de León, A., Morán, I., Valdés, F. y Tinajero, R. (2007). Avifaunas Estatales de México. CIPAMEX. Pachuca, Hidalgo, México. pp. 98-136

Gay, C. y Estrada, F. (2007). Cambio Climático en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, 31 p.

IMTA. (2007). Gaceta IMTA Número 7, noviembre 2007. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), México. 10 p. Disponible en internet: <http://www.imta.mx/gaceta/anteriores/g07-11-2007/gaceta-imta-07.pdf>

INEGI. (2009a)

[http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/coa/ubic\\_geo.cfm?c=1203&e=05&CFID=490273&CFTOKEN=31513870](http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/coa/ubic_geo.cfm?c=1203&e=05&CFID=490273&CFTOKEN=31513870) Consultado el 05 de octubre de 2009.

INEGI. (2009b)

<http://cuentame.inegi.gob.mx/monografias/informacion/Coah/Territorio/default.aspx?te=ME&e=05>. Consultado el 5 de octubre de 2009.

INEGI. (2009c)

<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/coa/geolo.cfm>. Consultado el 5 de octubre de 2010.

INEGI. (2010a)

<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/coa/climas2.cfm?c=1210&e=05&CFID=1404728&CFTOKEN=16988165>. Consultado el 2 de febrero de 2010.

INEGI. (2010b)

<http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=geo&c=124&e=05>. Consultado el 2 de febrero de 2010.

INEGI. (2010c)

[http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/coa/agr\\_veget.cfm?c=1215&e=05&CFID=1404728&CFTOKEN=16988165](http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/coa/agr_veget.cfm?c=1215&e=05&CFID=1404728&CFTOKEN=16988165). Consultado el 2 de febrero de 2010.

IPCC 1ª (2009) <http://www1.ipcc.ch/languages/spanish.htm> Consultado el 19 de febrero de 2010.

IPCC. (2001). Working Group II. Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability. J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, F. J. Dokken, K.S. White Cambridge University Press. 1,032 p.

IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.

Lafragua, J., Gutiérrez, A., Aguilar, E., Aparicio, J., Mejía, R., Santillán, O., Suárez, M.A. y Preciado, M. (2003). Balance hídrico del Valle de México. Anuario IMTA 2003, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, pp. 40-45

Maderey, L. (2005). Principios de Hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico. Serie Textos Universitarios, Núm. 1, Instituto de Geografía, UNAM, 100 p.

Mendoza A. (2005). Determinación de la disponibilidad de agua en Tlaxcala para uso agrícola ante el cambio climático. Tesis Maestría (Maestría en Geografía) Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, 148 p.

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, EUA. 530 p.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. Williams, and K.W. King. 2002. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Versión 2005. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, EUA. Documento en línea. Disponible desde internet en:

<http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2000theory.pdf>

OMM. (1994). Guía de prácticas hidrológicas, núm. 168, Organización Meteorológica Mundial, 655 p.

Oñate, F. y Aguilar, G. (2003). Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del Río Catamayo. Tercer Congreso Latinoamericano de manejo de cuencas hidrográficas, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador, 11 p.

Oñate, F., Duque, E., León, P., Duque, F., Rojas, W. y Tenesaca, F. (2007). Caracterización climática, meteorológica e hidrológica de la cuenca binacional Catamayo-Chira previo a la implementación de los modelos SWAT y WATEM/SEDEM con fines de planificación territorial. IX Congreso Nacional de Hidráulica, I de Manejo de Recursos Hídricos, Quito, Ecuador, 10 p.

Ospina, E. y Gay, C. (2007). Cambio Climático: Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos y de los Sistemas de Generación-Transmisión de Energía Hidroeléctrica en Colombia. XVI Congreso Mexicano de Meteorología, noviembre de 2007, Veracruz, México, 15 p.

PAHO, (2010). Documento en línea.

<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd50/escenarios/cap3.pdf> Consultado el 3 de enero de 2010.

Palma, B. (2005). Generación de escenarios de cambio climático para la zona centro del estado de Veracruz, México. Tesis de Maestría (Maestría en Geografía) Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México. 134 p.

Palma, B., Conde C., Morales R. y Colorado G. (2007). Escenarios de Cambio Climático para Veracruz. En Plan Estatal de Acción Climática del Estado de Veracruz (A. Tejeda-Martínez, coordinador). Documento en línea. Disponible desde internet en: [http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com\\_content&view=article&id=77&Itemid=74](http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=77&Itemid=74). Consultado el 15 de noviembre de 2009.

PECC. (2009) Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. Diario Oficial de la Federación 28/08/2009, México, 118 p.

PECC-ANEXOS. (2009) Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. Diario Oficial de la Federación 28/08/2009, México, 110 p.

Proaño M., Gavilanes C., y Cisneros C. (2006). Aplicación del Modelo SWAT en la subcuenca del Río Ambato. Agrupación Grupo Randi. Ecuador, 32p.

Rymer, C., Humblet, E. y Ndaba, N. (2008). Impactos hídricos del cambio climático en la República Dominicana. Escuela de Asuntos Internacionales y Públicos de la Universidad de Columbia, New york, U.S.A., 21 p.

Sainz, S., Becerra, P. (2003). Los conflictos por el agua en México. Gaceta Ecológica, México, pp. 61-68

Sánchez, F. J. (2004). Medidas puntuales de permeabilidad. Universidad de Salamanca. Documento en línea. Disponible desde internet en: <http://web.usal.es/javisan/hidro>

SEDAC, (2010). Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Universidad de Columbia, New York, EUA.

[http://sedac.ciesin.org/mva/iamcc.tg/GCM\\_thematic\\_guide.html#complexity](http://sedac.ciesin.org/mva/iamcc.tg/GCM_thematic_guide.html#complexity) Consultado del 5 de enero de 2010.

SEMARNAT (2010a).

([http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/politica\\_ambiental/cambioclimatico/Pages/cicc.aspx](http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/politica_ambiental/cambioclimatico/Pages/cicc.aspx)). Consultado el 19 de febrero de 2010.

SEMARNAT. (2009) Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México, 93 p.

SHCP-SEMARNAT. (2009). La economía del cambio climático, Síntesis. Galindo M. (Coordinador). Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México, 81 p.

Sokolov, A. y Chapman, T. (1981). Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos. Instituto de Hidrología de España/Unesco. Madrid, España, 191 p.

Thomas, D. y Goudie, A. (2008). The dictionary of physical geography 3<sup>a</sup> ed. Blackwell Publishing Ltd, Malden, U.S.A., 624 p.

Torres, E., Mejía, E., Cortés, J., Palacios, E., Exebio, A. (2005). Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del Río Laja, Guanajuato, México. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México, pp. 481-490

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). San José, Costa Rica. 54 p.

Villareal, J. y Encina, J. (2005). Plantas vasculares endémicas de Coahuila y algunas áreas adyacentes, México. Acta Botánica Mexicana, enero, número 070. Instituto de Ecología A.C. Pátzcuaro, México, pp. 1 - 46

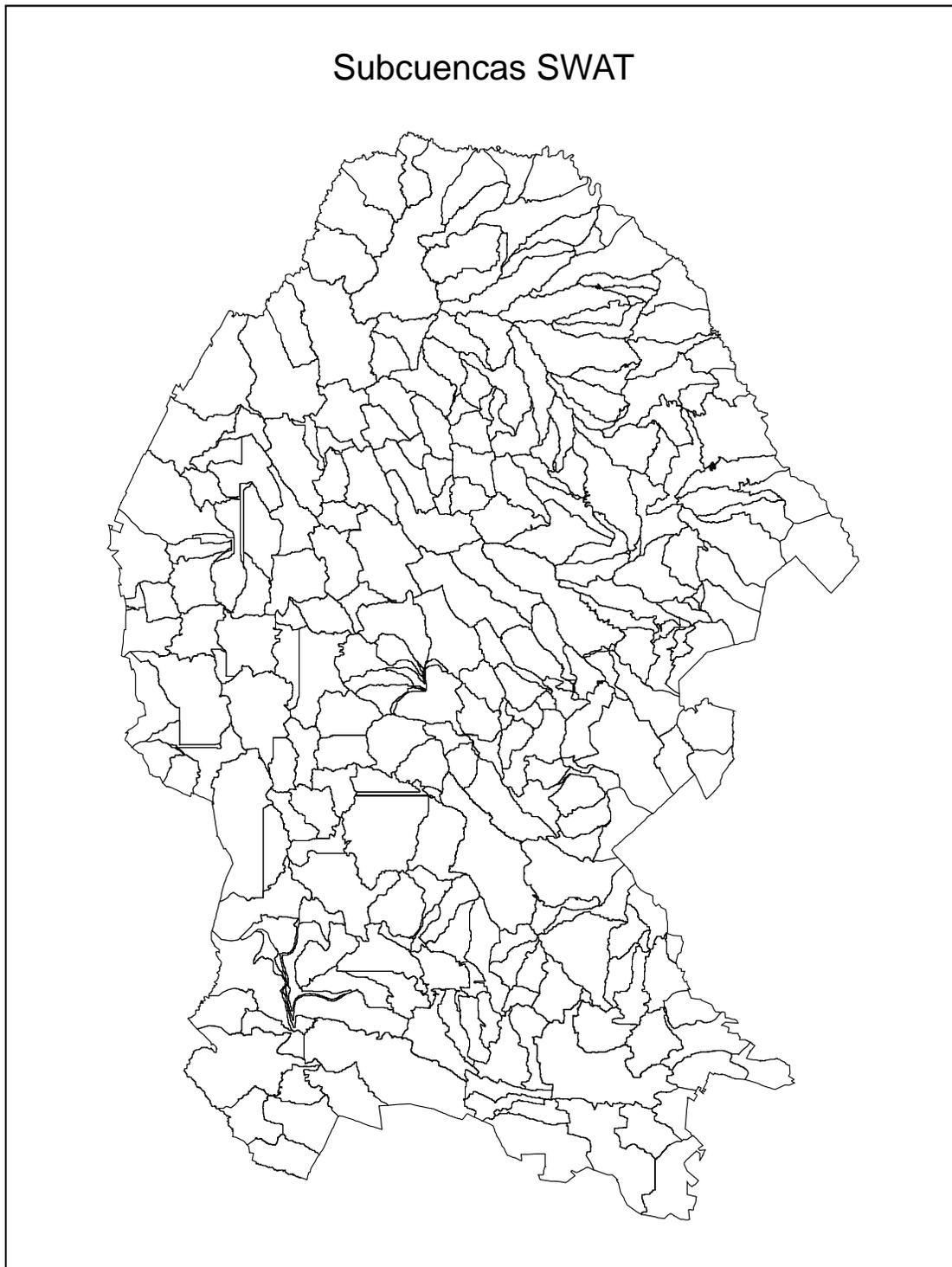
Winchel, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M. y Arnold, J. (2007). ArcSWAT interface for SWAT2005. Texas Agricultural Experiment Station, Grassland, Soil, and Water Research Laboratory, Texas, EUA, 436 p.

## 9. ANEXOS

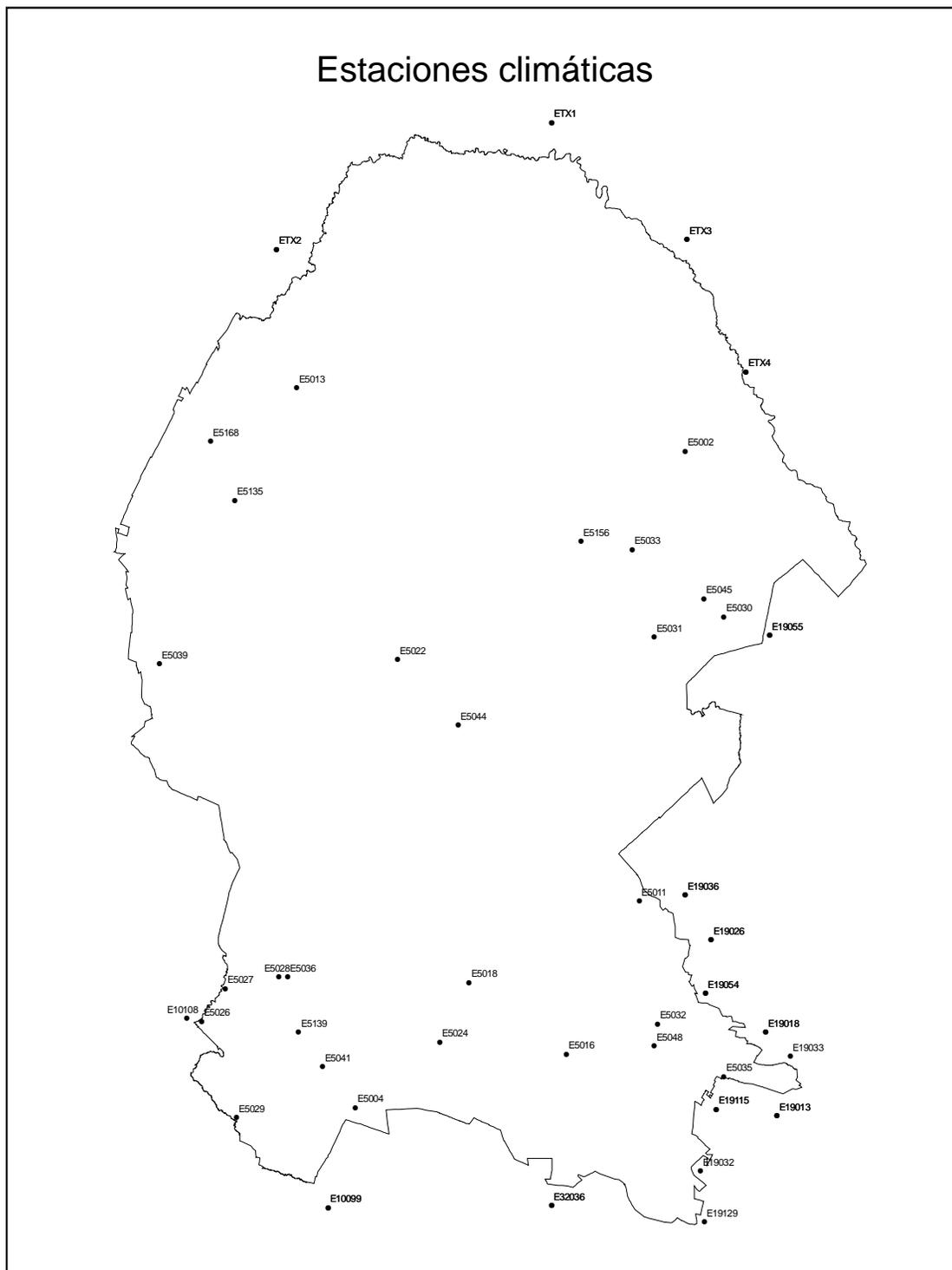
### Anexo A. Coberturas genéricas utilizadas por SWAT

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 <sub>max</sub> =2.5)	perennial
Range-brush	RNGB	Little Bluestem (LAI <sub>max</sub> =2.0)	perennial
Range-southwestern US	SWRN	Little Bluestem (LAI <sub>max</sub> =1.5)	perennial
Water	WATR		Not applicable

**Anexo B. Subcuencas delimitadas por el modelo SWAT**



## Anexo C. Estaciones climáticas con datos estadísticos



## Anexo D. Resultados de los componentes del balance hídrico mensual

**Tabla D1. Escenario base (2006)**

Mes	Contenido inicial de agua en el suelo	Precipitación	Evapotranspiración	Percolación	Escurrimiento	Flujo de retorno	Balance hídrico
E	1,106.91	1,495.45	778.76	109.95	0.02	5.76	1,707.88
F	529.86	411.78	938.45	46.73	0.00	45.41	-88.95
M	473.08	523.94	543.74	30.31	0.00	50.79	372.18
A	0.00	1,538.70	1,672.93	313.72	0.07	115.73	-563.74
M	141.29	4,387.05	2,893.38	1,200.37	17.70	326.83	90.06
J	310.66	4,369.13	2,662.91	1,381.31	31.45	758.91	-154.80
J	1,740.27	8,656.51	4,414.59	2,464.63	119.54	1,069.71	2,328.31
A	2,702.23	9,876.09	4,774.05	3,654.66	129.43	1,718.65	2,301.54
S	1,688.59	4,262.93	3,754.10	1,308.20	123.12	2,291.38	-1,525.29
O	1,475.59	1,843.33	1,567.16	452.45	1.93	1,776.22	-478.84
N	2,043.19	2,802.09	1,522.78	635.69	10.49	840.21	1,836.10
D	3,987.26	7,392.52	2,257.97	2,871.42	100.91	810.61	5,338.86
Tota							
I	16,198.92	47,559.51	27,780.81	14,469.42	534.66	9,810.23	11,163.32

**Tabla D2. Escenario GFDL A2 2030**

Mes	Contenido inicial de agua en el suelo	Precipitación	Evapotranspiración	Percolación	Escurrimiento	Flujo de retorno	Balance hídrico
E	983.96	1,342.19	735.35	63.17	0.02	5.29	1,522.31
F	484.51	579.49	1,002.26	71.16	0.00	33.17	-42.60
M	417.63	525.42	551.84	34.12	0.00	45.50	311.60
A	0.00	1,150.78	1,378.77	176.13	0.00	80.94	-485.06
M	44.45	2,942.44	2,162.13	664.23	4.00	192.28	-35.75
J	551.68	6,320.72	3,076.44	2,468.22	72.10	737.08	518.55
J	3,078.62	15,012.54	5,477.15	6,074.51	463.14	1,747.45	4,328.90
A	3,301.87	7,653.71	4,885.90	2,327.92	24.31	3,201.42	516.03
S	1,980.60	2,498.08	3,240.84	505.69	12.56	2,625.00	-1,905.43
O	1,697.94	1,097.03	1,210.53	155.62	0.16	1,356.08	72.57
N	2,218.36	2,417.03	1,337.83	486.98	10.63	474.80	2,325.15
D	4,448.04	8,090.25	2,307.03	3,159.79	153.81	651.02	6,266.65
Tota							
I	19,207.66	49,629.69	27,366.09	16,187.55	740.74	11,150.03	13,392.93

**Tabla D3. Escenario GFDL B2 2030**

Mes	Contenido inicial de agua en el suelo	Precipitación	Evapotranspiración	Percolación	Escurrimiento	Flujo de retorno	Balance hídrico
E	1,033.38	1,370.06	762.85	64.66	0.02	5.45	1,570.46
F	515.13	570.54	1,014.24	69.13	0.00	33.36	-31.06
M	454.49	580.29	588.87	44.53	0.00	45.20	356.18
A	0.00	1,253.17	1,487.09	205.27	0.00	92.05	-531.25
M	78.74	3,592.22	2,484.67	921.01	8.98	248.94	7.37
J	510.37	5,970.13	3,034.68	2,259.64	61.44	805.18	319.55
J	2,942.56	14,349.65	5,444.17	5,636.67	393.36	1,682.30	4,135.71
A	3,593.10	9,670.49	5,217.95	3,399.82	95.97	3,112.46	1,437.39
S	2,146.32	2,805.62	3,522.83	640.93	45.35	2,929.71	-2,186.88
O	1,852.32	1,351.42	1,374.42	248.39	0.79	1,698.73	-118.59
N	2,374.61	2,585.11	1,418.31	560.98	14.89	643.21	2,322.34
D	4,667.97	8,579.44	2,371.75	3,464.14	189.90	762.41	6,459.21
Total	20,168.99	52,678.15	28,721.83	17,515.17	810.70	12,058.99	13,740.45

**Tabla D4. Escenario HADGEM A2 2030**

Mes	Contenido inicial de agua en el suelo	Precipitación	Evapotranspiración	Percolación	Escurrimiento	Flujo de retorno	Balance hídrico
E	977.15	1,402.18	761.57	73.21	0.01	6.09	1,538.44
F	439.71	426.94	918.12	42.64	0.00	32.05	-126.16
M	461.07	651.34	588.35	33.28	0.01	36.98	453.79
A	0.00	634.71	1,003.51	85.41	0.00	50.82	-505.02
M	69.23	3,070.30	2,219.29	709.50	2.23	163.23	45.28
J	209.78	3,292.48	2,407.59	676.08	2.30	409.13	7.17
J	1,580.12	8,505.75	4,537.11	2,364.40	46.91	654.39	2,483.07
A	2,431.09	8,695.78	4,745.21	2,829.64	28.70	1,369.94	2,153.39
S	1,606.42	5,476.28	4,176.29	1,856.69	97.05	2,003.09	-1,050.42
O	1,278.57	1,674.10	1,583.92	390.32	2.49	1,721.04	-745.10
N	1,765.33	2,560.41	1,427.49	569.57	9.50	861.08	1,458.08
D	3,565.90	6,604.52	2,228.04	2,312.61	77.61	722.75	4,829.41
Total	14,384.38	42,994.79	26,596.48	11,943.35	266.81	8,030.59	10,541.94

**Tabla D5. Escenario HADGEM B2 2030**

Mes	Contenido inicial de agua en el suelo	Precipitación	Evapotranspiración	Percolación	Escurrecimiento	Flujo de retorno	Balance hídrico
E	1,012.30	1,375.51	778.15	65.97	0.02	5.55	1,538.14
F	481.09	456.58	936.32	47.50	0.00	30.38	-76.53
M	483.86	674.25	616.80	45.50	0.01	37.26	458.53
A	0.00	1,176.23	1,450.01	196.40	0.00	85.85	-556.03
M	93.72	3,827.94	2,595.54	1,024.31	7.66	257.47	36.68
J	258.18	3,756.76	2,555.39	935.63	13.53	591.31	-80.91
J	1,762.14	9,272.26	4,767.99	2,700.53	79.39	870.30	2,616.18
A	2,958.69	10,691.59	5,083.43	3,930.25	118.34	1,683.30	2,834.97
S	1,861.42	4,955.14	4,191.40	1,616.29	131.11	2,472.66	-1,594.90
O	1,544.00	1,788.32	1,633.41	437.05	3.81	1,986.27	-728.21
N	2,063.17	2,732.44	1,487.21	636.12	15.18	952.46	1,704.65
D	4,052.24	7,446.88	2,323.03	2,802.60	118.09	826.14	5,429.26
Total	16,570.81	48,153.92	28,418.68	14,438.16	487.12	9,798.95	11,581.82

**Tabla D6. Escenario GFDL A2 2050**

Mes	Contenido inicial de agua en el suelo	Precipitación	Evapotranspiración	Percolación	Escurrecimiento	Flujo de retorno	Balance hídrico
E	1,065.67	1,449.46	757.10	78.00	0.02	6.49	1,673.51
F	524.84	667.20	1,110.30	91.00	0.00	41.25	-50.52
M	410.82	499.13	567.11	39.80	0.00	56.45	246.58
A	0.00	901.98	1,180.13	123.01	0.00	72.87	-474.04
M	37.61	2,484.58	1,859.13	539.07	0.74	151.62	-28.37
J	863.66	7,653.34	3,134.18	3,314.24	127.90	838.76	1,101.93
J	3,800.27	19,121.04	5,836.61	8,646.18	1,052.11	2,312.56	5,073.84
A	3,737.37	6,942.71	4,845.34	1,971.65	29.70	4,345.65	-512.27
S	2,301.57	1,321.22	2,510.45	213.61	6.08	3,195.82	-2,303.17
O	2,030.00	829.79	997.38	95.20	0.05	1,396.06	371.09
N	2,568.62	2,364.03	1,300.32	453.86	10.92	442.35	2,725.20
D	5,076.60	9,216.50	2,377.55	3,778.55	265.86	678.65	7,192.50
Total	22,417.02	53,450.96	26,475.59	19,344.17	1,493.39	13,538.54	15,016.28

**Tabla D7. Escenario GFDL B2 2050**

Mes	Contenido inicial de agua en el suelo	Precipitación	Evapotranspiración	Percolación	Escurrimiento	Flujo de retorno	Balance hídrico
E	1,147.78	1,545.97	804.89	86.55	0.04	7.32	1,794.95
F	563.73	662.78	1,154.91	85.39	0.00	43.23	-57.02
M	472.31	606.43	632.08	57.41	0.00	56.40	332.86
A	0.00	1,125.09	1,414.41	169.79	0.00	91.73	-550.85
M	74.39	3,288.71	2,314.46	810.23	7.04	221.46	9.91
J	708.77	6,940.31	3,153.35	2,843.47	88.79	865.85	697.62
J	3,513.68	17,404.15	5,799.52	7,514.31	712.71	2,070.66	4,820.64
A	3,980.87	9,549.99	5,384.80	3,300.58	108.91	3,957.29	779.27
S	2,374.37	1,920.10	3,079.01	392.74	37.08	3,386.50	-2,600.85
O	2,097.38	1,210.18	1,272.02	196.25	0.53	1,773.86	64.89
N	2,654.72	2,658.95	1,433.65	578.54	17.59	622.35	2,661.54
D	5,168.83	9,631.07	2,452.45	4,077.30	285.05	824.14	7,160.95
Total	22,756.82	56,543.73	28,895.53	20,112.55	1,257.75	13,920.80	15,113.91

**Tabla D8. Escenario HADGEM A2 2050**

Mes	Contenido inicial de agua en el suelo	Precipitación	Evapotranspiración	Percolación	Escurrimiento	Flujo de retorno	Balance hídrico
E	1,050.88	1,552.10	799.82	98.97	0.01	8.48	1,695.70
F	452.73	407.52	961.93	40.30	0.00	40.41	-182.39
M	484.77	714.32	631.83	40.86	0.02	42.77	483.62
A	0.00	150.28	627.02	7.24	0.00	31.33	-515.30
M	46.91	2,683.73	1,978.58	601.12	0.24	119.95	30.75
J	145.29	2,461.27	1,992.39	341.35	0.05	297.43	-24.66
J	1,433.43	8,007.77	4,304.57	2,220.28	26.69	487.79	2,401.87
A	2,377.53	8,746.21	4,678.38	2,856.32	26.95	1,249.49	2,312.59
S	1,664.26	6,200.94	4,346.96	2,235.97	132.27	2,023.77	-873.76
O	1,334.76	1,815.65	1,655.36	455.19	6.30	1,883.44	-849.88
N	1,806.89	2,609.14	1,459.97	598.07	9.14	967.88	1,380.96
D	3,597.82	6,678.69	2,250.74	2,355.46	90.21	801.28	4,778.82
Total	14,395.28	42,027.62	25,687.55	11,851.12	291.88	7,954.02	10,638.33

**Tabla D9. Escenario HADGEM B2 2050**

Mes	Contenido inicial de agua en el suelo	Precipitación	Evapotranspiración	Percolación	Escurrimiento	Flujo de retorno	Balance hídrico
E	1,104.97	1,525.36	797.27	91.58	0.02	7.73	1,733.73
F	502.97	437.21	989.56	45.86	0.00	38.77	-134.00
M	542.61	736.97	637.03	49.94	0.02	43.05	549.53
A	0.00	889.90	1,254.87	167.04	0.00	81.54	-613.55
M	77.00	3,441.19	2,382.03	894.14	2.61	224.98	14.43
J	177.31	2,937.08	2,274.10	516.70	0.60	459.53	-136.54
J	1,637.88	8,774.11	4,569.65	2,503.88	45.95	652.96	2,639.55
A	2,866.97	10,742.13	5,094.79	3,945.06	112.70	1,524.90	2,931.66
S	1,856.09	5,679.86	4,407.80	1,980.08	159.58	2,469.21	-1,480.73
O	1,553.05	1,929.92	1,690.90	501.28	8.30	2,115.13	-832.64
N	2,075.09	2,781.12	1,500.31	666.27	14.60	1,058.90	1,616.12
D	4,057.16	7,520.35	2,328.02	2,857.32	133.31	919.07	5,339.79
Total	16,451.10	47,395.20	27,926.33	14,219.15	477.69	9,595.77	11,627.35

**Anexo E. Resultados del balance hídrico mensual****Tabla E1. Balance hídrico: escenario base (2006) y escenarios del año 2030**

MES/ESCENARIO	BASE	GFDL A2	GFDL B2	HADGEM A2	HADGEM B2
ENE	1,707.88	1,522.31	1,570.46	1,538.44	1,538.14
FEB	-88.95	-42.60	-31.06	-126.16	-76.53
MAR	372.18	311.60	356.18	453.79	458.53
ABR	-563.74	-485.06	-531.25	-505.02	-556.03
MAY	90.06	-35.75	7.37	45.28	36.68
JUN	-154.80	518.55	319.55	7.17	-80.91
JUL	2,328.31	4,328.90	4,135.71	2,483.07	2,616.18
AGO	2,301.54	516.03	1,437.39	2,153.39	2,834.97
SEP	-1,525.29	-1,905.43	-2,186.88	-1,050.42	-1,594.90
OCT	-478.84	72.57	-118.59	-745.10	-728.21
NOV	1,836.10	2,325.15	2,322.34	1,458.08	1,704.65
DIC	5,338.86	6,266.65	6,459.21	4,829.41	5,429.26
TOTAL	11,163.32	13,392.93	13,740.45	10,541.94	11,581.82

**Tabla E2.** Balance hídrico: escenario base (2006) y escenarios del año 2050

MES/ESCENARIO	BASE	GFDL A2	GFDL B2	HADGEM A2	HADGEM B2
ENE	1,707.88	1,673.51	1,794.95	1,695.70	1,733.73
FEB	-88.95	-50.52	-57.02	-182.39	-134.00
MAR	372.18	246.58	332.86	483.62	549.53
ABR	-563.74	-474.04	-550.85	-515.30	-613.55
MAY	90.06	-28.37	9.91	30.75	14.43
JUN	-154.80	1,101.93	697.62	-24.66	-136.54
JUL	2,328.31	5,073.84	4,820.64	2,401.87	2,639.55
AGO	2,301.54	-512.27	779.27	2,312.59	2,931.66
SEP	-1,525.29	-2,303.17	-2,600.85	-873.76	-1,480.73
OCT	-478.84	371.09	64.89	-849.88	-832.64
NOV	1,836.10	2,725.20	2,661.54	1,380.96	1,616.12
DIC	5,338.86	7,192.50	7,160.95	4,778.82	5,339.79
TOTAL	11,163.32	15,016.28	15,113.91	10,638.33	11,627.35