



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“MEDIDAS DE MITIGACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LOS USOS DE LA CUENCA DEL RÍO
ANGULO.”

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA CIVIL

PRESENTA:

NADIA SOTO ALONSO

ASESORA:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

COASESORA:

M.C. ALEJANDRA CORREA GONZÁLEZ

Morelia, Michoacán, Octubre 2015.



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. ANTECEDENTES.....	9
2.1. Ubicación de la cuenca en estudio.....	9
2.2. Modelos matemáticos.....	9
2.3. Modelos lluvia – escorrentía.....	13
2.4. Cambio climático.....	14
2.4.1. Efecto invernadero.....	15
2.4.2. Instituciones y legislación.....	20
2.4.3. Modelos de Circulación General.....	25
2.4.4. Escenarios de cambio climático.....	27
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
3.1. Materiales.....	31
3.1.1. Materiales para la modelación de hidrología superficial.....	31
3.1.2. ArcSWAT como material para la modelación.....	36
3.1.3. Materiales para la calibración y validación de la modelación.....	39
3.2. Métodos.....	40
3.2.1. Metodología para la simulación con SWAT.....	40
3.2.2. Metodología de los modelos de cambio climático.....	49
4. MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL PERIODO HISTÓRICO.....	55
4.1. Modelación inicial.....	55
4.2. Calibración y validación del modelo.....	61
5. SIMULACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO ANGULO CON CAMBIO CLIMÁTICO.....	68
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	71
6.1. Usos del agua en la cuenca del río Angulo.....	71
6.2. Esgurrimiento en la cuenca del río Angulo.....	73
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
7.1. Conclusiones generales.....	79



7.2.	Conclusiones a nivel de cuenca.....	79
8.	REFERENCIAS.....	82
9.	ANEXOS.	85
	Ley General de Cambio Climático.	85
	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente	89
	Estrategia Nacional de Cambio Climático.	91
	Plan Nacional de Desarrollo 2013 - 2018.	93
	Programa Especial de Cambio Climático.....	94



AGRADECIMIENTOS.

Al Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán, por el apoyo dado para la realización de este trabajo.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe, porque con el ánimo que ponía en cada plática, tomé el valor para hacer este proyecto que tanto me gustó.

A la M. C. Alejandra Correa Gonzáles, por ayudarme a entender el complejo mundo de la modelación y hacer un poco menos accidentado mi aprendizaje.

A los M. C. Jaime Madrigal y Liliana García.

También, a mis grandes amigos y compañeros de penas y alegrías, Laura Idalia Blanco y José Sergio Campuzano, que desde el inicio de esta travesía en la Facultad de Ingeniería Civil, estuvieron a mi lado. Sin ustedes me habría vuelto loca por tanto estrés; gracias por todos los buenos y malos momentos; por aguantar mis regaños y hacerme reír; por las aventuras dentro y fuera del salón; y sobre todo, por el apoyo en cada causa a la que nos uníamos, siempre juntos en todos lados.



DEDICATORIAS.

A Dios.

A mis padres: Eustacio Soto y Catalina Alonso, no podría haber llegado hasta aquí sin ustedes. A pesar de todas las adversidades, me dieron la fuerza y el apoyo para seguir adelante. No dudaron que podría lograrlo. Los quiero mucho.

A José Sergio Campuzano: Mi mejor amigo, mi compañero, mi gran amor. Gracias por cada día impulsándome, apoyándome, acompañándome. Sin tu ayuda, todo este trabajo habría sido más pesado.

A mis hermanos: Noé y Nuvia, por creer siempre en mí.

A Hielisa: Por cada noche de desvelo en la me acompañaste, me hiciste reír y me inspiraste; por despertarme cada mañana antes que el despertador; por 15 años de compañía.



RESUMEN.

La cuenca del Río Angulo, comprendida desde el origen del Río Angulo hasta donde se localiza la presa Melchor Ocampo, tiene una superficie de aportación de 2,064 kilómetros cuadrados.

El modelo usado es Soil and Water Assessment Tool (SWAT), con interfaz de ArcSWAT, el cual se diseñó para predecir y evaluar el impacto del uso del suelo sobre los recursos hídricos y problemas de contaminación del tipo difuso en cuencas no aforadas.

Para la evaluación del cambio climático se tomaron los escenarios que el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en conjunto con diversas instituciones, desarrollaron mediante un análisis regional del periodo histórico y de las proyecciones de 15 modelos de circulación global (MCG) a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099) para el caso de México.

Palabras clave: Modelo, evaluación, escurrimiento, cambio climático, mitigación.

ABSTRACT.

The Angulo River Basin, ranging from the origin of the River Angulo to location of dam Melchor Ocampo, has an area of 2,064 square kilometers contribution.

The model used is Soil and Water Assessment Tool (SWAT), with ArcSWAT interface, which is designed to predict and assess the impact of land use on water resources and problems of diffuse pollution in ungauged basins.

For the assessment of climate change the scenarios were taken to the National Institute of Ecology and Climate Change (INECC), together with various institutions, developed through a regional analysis of the historical period and projections of 15 global circulation models (GCMs) in the near future (2015-2039) and distant future (2075-2099) for the case of Mexico.



1. INTRODUCCIÓN.

La gestión del agua por cuencas hidrológicas es una de las bases fundamentales para lograr el desarrollo sustentable. La selección de la cuenca hidrológica superficial como un contexto espacial para el análisis y la acción, garantiza la efectividad práctica de los objetivos de gestión de recursos naturales, particularmente del agua. La gestión de las aguas de una cuenca debe tener en consideración la interdependencia de los múltiples usos practicados y sobre todo una concertación con todos los usuarios.

El clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja. A diferencia del concepto tradicional del clima, como el promedio de alguna variable, hoy en día se piensa en éste como un estado cambiante, en diversas escalas de tiempo y espacio. Cuando un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura sale de su valor medio de muchos años, se habla de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como la inestabilidad en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta (concentración de gases de efecto invernadero, cambios en el uso de suelo, etc.) resultado de la actividad humana. (Martínez et al., 2004)

Es cierto que la temperatura media global en la superficie ha aumentado desde finales del siglo XIX. Cada uno de los tres últimos decenios ha sido sucesivamente más cálido en la superficie de la Tierra que cualquier decenio anterior desde que existen los registros instrumentales, y el decenio de 2000 fue el más cálido de todos. Los cambios en las precipitaciones son más difíciles de medir a partir de los registros de que se dispone, debido a la gran dificultad que supone tomar muestras de las precipitaciones y también porque se espera que las precipitaciones experimenten un cambio fraccional menor que el contenido de vapor de agua del aire a medida que se calienta el clima. (Stocker et al., 2013)

De acuerdo con los estudios más recientes elaborados para México (UK Met Office, 2011), en el país ya se pueden observar los siguientes cambios:

- El país se ha vuelto más cálido desde la década de 1960.



- Las temperaturas promedio a nivel nacional aumentaron 0.85°C y las temperaturas invernales 1.3°C .
- Se ha reducido la cantidad de días más frescos desde los años sesenta del siglo pasado y hay más noches cálidas.
- La precipitación ha disminuido en la porción sureste desde hace medio siglo.

Los diversos modelos coinciden que la temperatura en México aumentará 4°C en la zona fronteriza con Estados Unidos de América, y se estima que el resto del país aumentará entre 2.5 y 3.5°C . En cuanto a la precipitación, se espera que disminuya en promedio entre un 5 y 10% (entre 22 a 4.5 mm/mes menos), aunque los diferentes modelos no coinciden en sus estimaciones.

Aún en la actualidad, a pesar de lo difundido del tema, se dificulta aplicar las medidas necesarias para la mitigación del impacto ambiental; el conocimiento no llega a los subsistemas como los escurrimientos y usos de una cuenca. Para poder frenar el cambio climático y hacer frente a los efectos que se están presentando, es necesario estar informado y trabajar de manera coordinada.

La mitigación, de acuerdo al IPCC, se refiere a una intervención antropogénica para reducir las fuentes o mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero. Aunque hay varias políticas sociales, económicas y tecnológicas que pueden reducir las emisiones, la mitigación, referida al cambio climático, es la aplicación de políticas destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a potenciar los sumideros.

Para evaluar las probables medidas de mitigación en la cuenca del río Angulo, en este trabajo se modelaron los gastos de dicha cuenca en el periodo histórico con el programa SWAT y, posteriormente, se usaron los escenarios de cambio climático, que el INECC pone a disposición de los usuarios, para modificar este modelo y así evaluar a futuro (corto plazo) el efecto del cambio climático de los gastos generados en la cuenca y la afectación en los usos que se le da en la misma.



2. ANTECEDENTES.

2.1. Ubicación de la cuenca en estudio.

La zona hidrológica Río Lerma-Chapala pertenece a la Región Hidrológica número 12 Lerma-Santiago la cual se encuentra ubicada en el centro del país, en parte de los estados de Guanajuato, Jalisco, México, Michoacán y Querétaro. El sistema hidrológico de esta zona está constituido por el Río Lerma, que es la corriente principal, de aproximadamente 708 kilómetros de longitud, con origen en la Laguna de Almoloya, al Sureste de la ciudad de Toluca. En su recorrido se integran como tributarios importantes los ríos La Gavia, Jaltepec, de La Laja, Silao, Guanajuato, Turbio, Angulo y Duero, hasta descargar al Lago de Chapala, que es el vaso interior de mayores dimensiones del país y en donde también descargan los ríos La Pasión y Zula. La condición generalizada de las cuencas es de déficit, lo que indica que existe un grave problema de sobreexplotación.

La cuenca Río Angulo, comprendida desde el origen del Río Angulo en el cerro Nahuatzen, hasta donde se localiza la presa Melchor Ocampo. Tiene una superficie de aportación de 1,908 km². Se encuentra delimitada por las siguientes regiones y cuencas hidrológicas: al Norte por las cuencas Río Lerma 5 y Río Lerma 6, al Sur por la cuenca Lago de Pátzcuaro, al Este por la cuenca Lago de Cuitzeo, y al Oeste por la cuenca Río Duero. Su principal aportador es el Río de la Patera, el cual lo intercepta por su margen derecha. En la figura 1 y 2 se muestra la macro y micro localización.

2.2. Modelos matemáticos.

Comencemos definiendo lo que es un modelo. En un sentido amplio, un modelo de un sistema puede ser definido como una conceptualización del mismo que preserva sus características esenciales para el fin que nos ocupa, sin necesidad de preservarlas todas. Por tanto, hay muchos tipos de modelos, entre otros:

- Descriptivos.
- Gráficos.

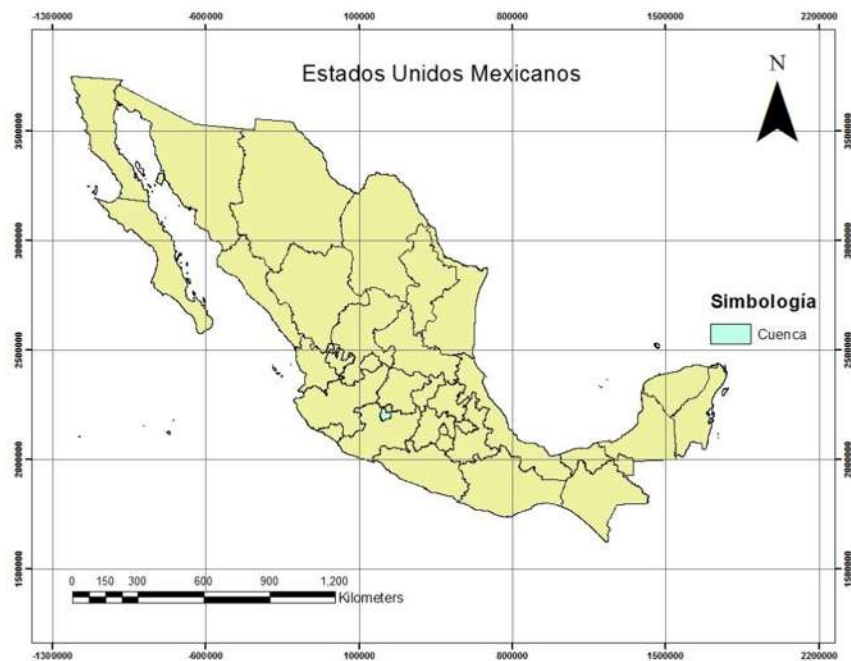


Figura 1. Macro localización de la cuenca del río Angulo

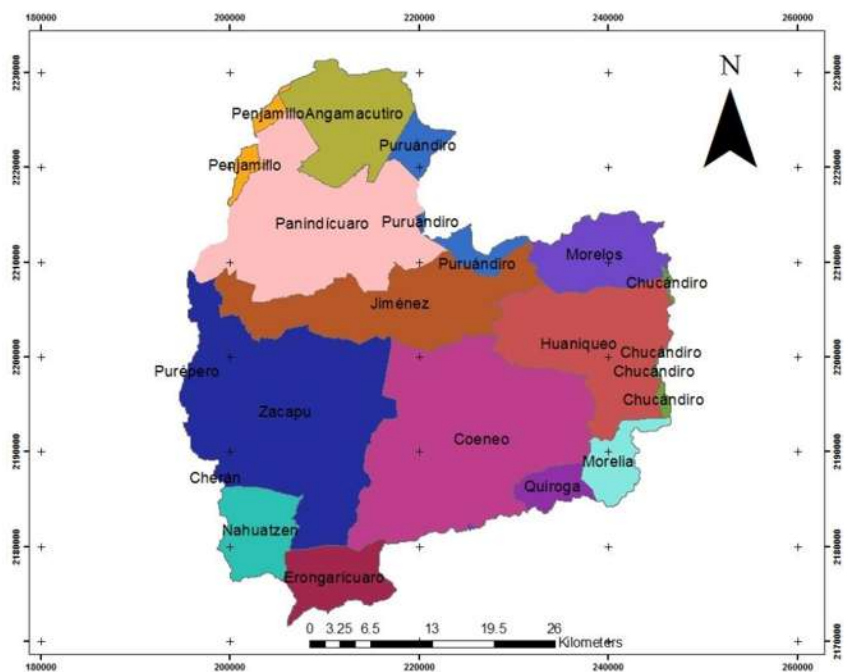


Figura 2. Micro localización de la cuenca del río Angulo.



- Experimentales (o modelos “de juicio”).
- Analógicos.
- A escala (o modelos físicos)
- Matemáticos

Los modelos matemáticos son los más fáciles de transmitir de forma intacta a otras personas, y son cuantitativamente más precisos que los experimentales (pero no cualitativamente). Debido a esto los vamos a utilizar mucho, pero hay que tener siempre bien presente que los modelos matemáticos son herramientas al servicio del “juicio ingenieril” y no sustitutos mejoradores del mismo.

Dichos modelos prácticamente siempre constan de tres componentes:

- **Parámetros:** Son valores numéricos que describen propiedades fijas y supuestamente conocidas del sistema. Son dados por el usuario, por lo que suelen llamarse “datos” y no cambian en una utilización (o “ejecución”) del modelo. Los datos “incontrolables” suelen ser aquellos que están ligados a características inherentes al sistema físico que difícilmente pueden ser cambiadas, se suponen invariables para un determinado sistema, y no varían ni siquiera para diferentes ejecuciones del modelo (por ejemplo la longitud de un río). Los datos “controlables” son aquellos que el usuario del modelo puede, y a veces debe, cambiar para obtener y evaluar diferentes alternativas y por tanto varían de una ejecución a otra, aunque dentro de la misma ejecución permanecen con valores fijos.
- **Variables:** Son valores numéricos que reflejan el comportamiento del sistema y sus prestaciones. Solo reciben valores numéricos durante la ejecución del modelo. Normalmente se llaman resultados (o “salidas”) a un subconjunto de las variables que resulta interesante conocer en cada ejecución y que queda plasmado de forma escrita o almacenado de alguna otra forma.



- Restricciones: Son expresiones matemáticas (aunque no siempre) que describen las relaciones entre variables y entre estas y los parámetros. Suelen ser igualdades o desigualdades algebraicas o ecuaciones integrales o diferenciales. (Álvarez et al., 1989)

En la figura 3 se esquematizan los componentes anteriormente mencionados.

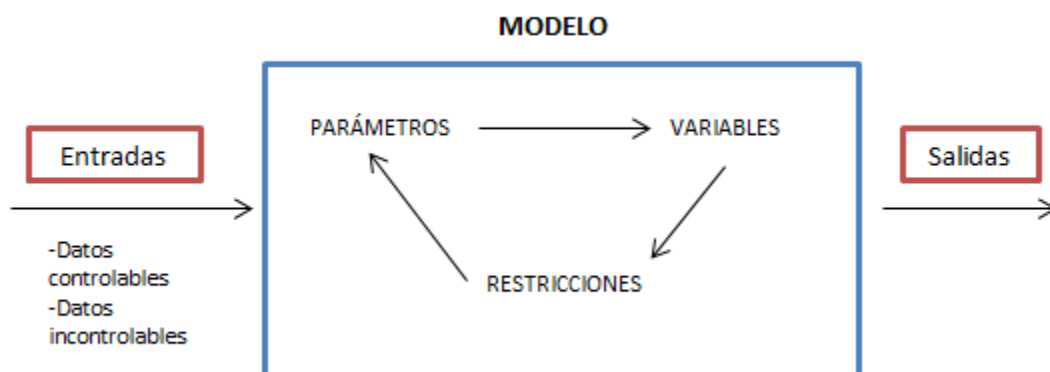


Figura 3. Esquema simplificado del método de los modelos matemáticos.

Los modelos matemáticos pueden ser clasificados atendiendo a diversos conceptos, por lo que existen multitud de clasificaciones. Una clasificación obvia sería atendiendo al proceso modelado. Así tenemos modelos de:

- Lluvia-escorrentía
- Crecidas
- Síntesis hidrológica
- Flujo subterráneo
- Etc.

También se pueden clasificar según el problema o el uso que se le dé, un modelo puede ser:

- De predicción (o de “simulación”) si se utiliza para conocer “qué pasa si...” (también son llamados “descriptivos”).



- De “optimización” si el modelo modifica internamente los valores de los datos controlables y /o las variables para alcanzar el óptimo valor de una función objetivo previamente definida.
- De identificación. En estos modelos los datos que para los anteriores han sido denominados incontrolables pasan a ser las variables o incógnitas a ser determinadas.

La ventaja de los modelos de optimización es que una vez asumido que representan aceptablemente al sistema, obtienen valores óptimos de las variables de control, mientras que al ser la técnica de simulación una técnica de prueba-error, no es seguro que se vaya a dar con el óptimo.

Teniendo en cuenta lo anterior, lo sensato es utilizar combinadamente simulación y optimización aprovechando las ventajas de cada una de las técnicas. Así, los modelos de optimización pueden ser utilizados para “filtrar” alternativas que después pueden ser evaluadas con más detalle con modelos de simulación. (Álvarez et al., 1989)

2.3. Modelos lluvia – escorrentía.

Los modelos lluvia-escorrentía son modelos que, a partir de datos externos tales como secuencias pluviométricas y valores de evapotranspiración potencial, nos dan como resultado el caudal de escorrentía en unos puntos de interés.

Si bien existen métodos o modelos antiguos, tales como la fórmula racional y otras, que hacen uso de la teoría de sistemas lineales (modelo de hidrograma unitario) para relaciones lluvia-escorrentía a corto plazo, nos referimos aquí a los modelos de simulación de balance hidráulico continuo y a los de simulación de sucesos.

La variabilidad temporal de lluvias y de otros factores puede obviarse simplemente efectuando los cálculos para incrementos de tiempo pequeños; mientras que la no linealidad del proceso de escorrentía hace que sea erróneo el remplazar la distribución de la lluvia en el espacio, por la media de ésta en la cuenca. Una solución sería dividir la cuenca en unas subcuencas o segmentos, pero si se tienen muchos segmentos el



tiempo de cálculo aumenta. Además de la variabilidad de la lluvia, y superpuesta a ella, está la variabilidad de las características de la cuenca y de las variables de estado de la misma.

Es necesario pues, el uso de parámetros agregados que definan las características medias de cada segmento y combinar los resultados de los varios segmentos para obtener el caudal total de escorrentía.

Es así que la utilidad de los modelos lluvia-escorrentía puede verse de distintas maneras. Entre sus varias aplicaciones se pueden citar las siguientes:

- Extensión de registros de caudales, pues si estos son cortos, su aplicación para la determinación de frecuencias de avenidas u otros datos para diseño pueden conducir a los resultados erróneos.
- Obtención de datos de caudales en cuencas no aforadas, mediante la adaptación de los parámetros obtenidos para cuencas próximas que sí dispongan de datos.
- Previsión de caudales a corto plazo, para operación de sistemas en tiempo real.
- Predecir el efecto de cambios en el sistema, como evapotranspiración, infiltración, etc. (Álvarez et al., 1989)

El modelo usado en este trabajo es el Soil and Water Assessment Tool (SWAT), cuyo funcionamiento se describirá más adelante.

2.4. Cambio climático.

El cambio climático es la modificación del clima con respecto al periodo histórico a una escala global o regional. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros meteorológicos: temperatura, presión atmosférica, precipitaciones, nubosidad, entre otros. En teoría, son debidos tanto a causas naturales como antropogénicas.



Los impactos de un clima anómalo o extremo en diversos sectores de la actividad humana son lo que ha llevado a la sociedad, incluyendo sus instituciones de gobierno, a interesarse en el tema de cambio climático. Pero, para determinar acciones de respuesta global, regional o local, se debe primero comprender el problema del cambio climático.

La tierra absorbe radiación solar (radiación de onda corta), principalmente en la superficie, y la redistribuye por circulaciones atmosféricas y oceánicas para intentar compensar los contrastes térmicos, principalmente del ecuador a los polos. La energía recibida es re-emitida al espacio (radiación de onda larga) para mantener en el largo plazo, un balance entre energía recibida y re-emitida. Cualquier proceso que altere tal balance, ya sea por cambios en la radiación recibida o re-emitida, o en su distribución en la Tierra, se reflejará como cambios en el clima. A tales cambios en la disponibilidad de energía radiativa se les como forzamientos radiativos. Cuando éstos son positivos tienden a calentar la superficie de la Tierra. Un enfriamiento se producirá si el forzamiento radiativo es negativo. (Martínez et al., 2004)

2.4.1. Efecto invernadero.

La atmósfera es una capa de gases que cubre a la Tierra, está compuesta principalmente de Nitrógeno (78%) y Oxígeno (21%) pero contiene además pequeñas cantidades de los llamados gases de efecto invernadero (GEI): Vapor de agua, Bióxido de carbono, Metano, Óxidos de nitrógeno, entre otros.

Los aumentos en la concentración de los GEI reducen la eficiencia con la cual la Tierra re-emite la energía recibida al espacio. Parte de la radiación saliente de onda larga emitida por la Tierra al espacio es re-emitida a la superficie por la presencia de esos gases. Así, la temperatura de superficie se elevará para emitir más energía, y aunque parte de ella quede “atrapada”, suficiente energía saldrá al espacio para alcanzar el balance radiativo que mantiene relativamente estable el clima. (Martínez et al., 2004).

En otras palabras, estos gases interactúan con la radiación de onda corta que proviene del Sol, cierto porcentaje de dicha radiación es reflejada directamente por las nubes, otro llega a los océanos donde una parte es absorbida y otra reflejada. En el continente la



radiación de onda corta es absorbida por la Tierra y esta la emite como radiación de onda larga; parte de la radiación de onda larga pasa a través de la atmósfera y se libera al espacio, mientras que otra parte es absorbida y re-emitida por los gases de efecto invernadero y queda atrapada en la troposfera. A este efecto se le llama efecto invernadero natural. (Véase la figura 4).



Figura 4. Esquematización del efecto invernadero.

El nombre “efecto invernadero” proviene de su similitud con las instalaciones construidas para cultivar plantas en un ambiente más cálido que el exterior; dado que el techo de un invernadero tiene la misma propiedad de dejar entrar la radiación solar y bloquear la terrestre generada en su interior. Algunos autores dicen que el nombre “efecto invernadero” no es el más adecuado, pues un invernadero se calienta más por impedir la convección que por atrapar la radiación, y sugieren que se le llame más bien “efecto atmósfera”.

En la atmósfera y el clima actúan dos tipos de radiación claramente distintos: la luz visible originada en el Sol y la radiación infrarroja (invisible) emitida por la Tierra. La diferencia entre ellas se debe a la disparidad de temperaturas: el Sol emite su radiación como a



6000 grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$); en cambio, los elementos de la Tierra lo hacen a temperaturas alrededor de 0°C . Por estar a cierta distancia del Sol y tener un determinado albedo (blancura, capacidad de reflejar la radiación que le llega), la Tierra debiera tener una temperatura característica de equilibrio llamada *efectiva*. Los valores concretos del albedo planetario y de la distancia del planeta al Sol determinan para la Tierra una temperatura efectiva de -18°C , un valor muy diferente de la temperatura que realmente tiene el planeta (en superficie), cuyo valor *típico* (promedio anual y global) es de $+15^{\circ}\text{C}$, 33°C más arriba. (Martínez et al., 2004).

El forzamiento radiativo se utiliza para cuantificar la variación del balance energético de la Tierra que se produce como consecuencia de un cambio de origen externo. Se expresa en vatios (watts) por metro cuadrado (W/m^2). El concepto de forzamiento radiativo es útil para comparar la influencia en la temperatura media global, en superficie, de la mayor parte de los agentes individuales que más afectan al equilibrio radiativo de la Tierra. (Stocker et al., 2013).

El forzamiento radiativo se define en el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), como la variación del flujo descendente neto (onda corta más onda larga) en la tropopausa, tras permitir que las temperaturas estratosféricas se reajusten hasta alcanzar el equilibrio radiativo, mientras se mantienen fijas otras variables de estado, como las temperaturas troposféricas, el vapor de agua y la cubierta de nubes.

El IPCC en su Quinto Informe de Evaluación, proporciona los valores cuantitativos del forzamiento radiativo del clima entre 1750 y 2011, como se muestra en la figura 5.

Como se mencionó anteriormente, la atmósfera es una mezcla de gases y de aerosoles (partículas sólidas y líquidas) suspendidos en ella. Naturalmente, no todos esos componentes son los responsables del efecto invernadero.

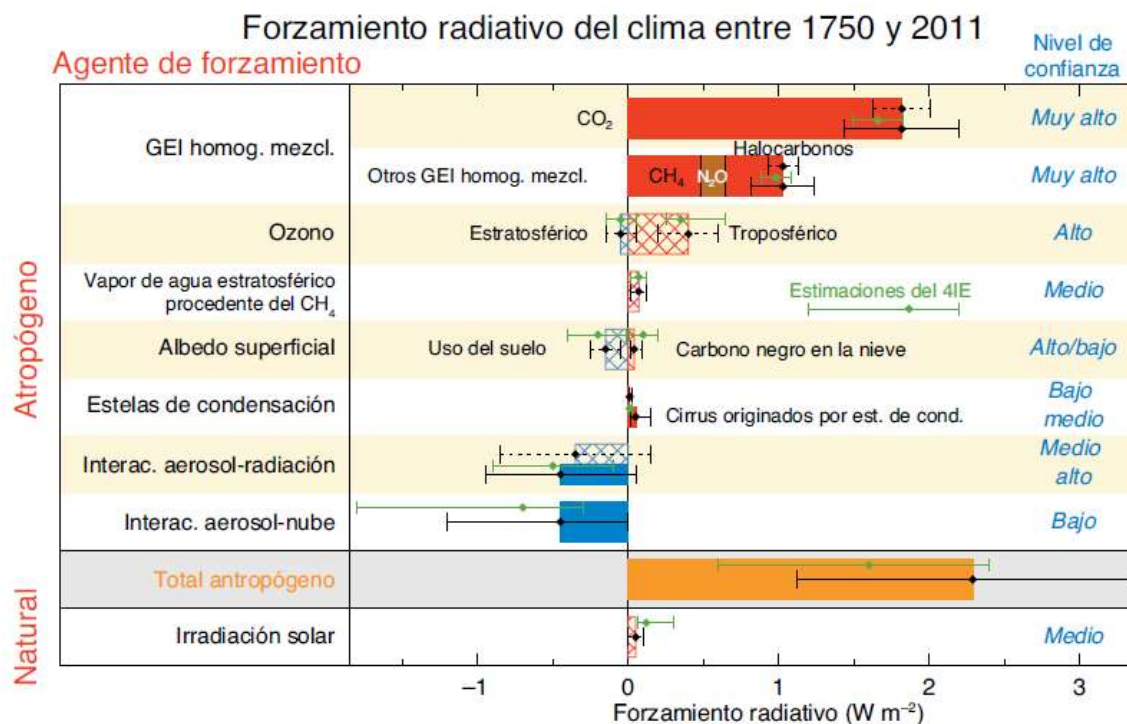


Figura 5. Forzamiento radiativo (FR) y forzamiento radiativo efectivo (FRE) de cambio climático durante la era industrial. Forzamiento debido a los cambios de concentración entre 1750 y 2011 con intervalos de incertidumbre asociados (las barras coloreadas representan el forzamiento radiativo efectivo, las barras rayadas el forzamiento radiativo, y los rombos verdes y las incertidumbres asociadas representan el forzamiento radiativo estimado en el Cuarto Informe de Evaluación (4IE)). (Stocker et al., 2013).

Este efecto se debe sólo a los más complejos y minoritarios, llamados *gases de efecto invernadero* (GEI), que están dentro del 1% restante de la composición atmosférica. En general, están constituidos por tres o más átomos; los que forman moléculas diatómicas o monoatómicas son transparentes a la radiación terrestre. Los más importantes son el vapor de agua (H₂O) y el bióxido de carbono (CO₂); los demás GEI (CH₄, NO_x, etc.) se llaman gases traza por su presencia ínfima en la atmósfera. (Martínez et al., 2004).

En lo referente al forzamiento radiativo por los GEI, la actividad humana contribuye al cambio de la composición atmosférica ya sea de forma directa (mediante la emisión de gases o partículas) o indirecta (por medio de la química atmosférica). Las emisiones antropógenas han regido los cambios de las concentraciones de gases de efecto invernadero homogéneamente mezclados durante la era industrial. (Stocker et al., 2013).



El vapor de agua es el principal gas de efecto invernadero de la atmósfera terrestre. La atmósfera recibe vapor de agua adicional de las actividades antropógenas, principalmente del aumento de evaporación de los cultivos de regadío, pero también de la refrigeración de las plantas eléctricas y, en menor medida, de la combustión de combustibles fósiles. Así pues, resulta lógico preguntarse por qué se pone toda la atención en el CO_2 y no en el vapor de agua como agente de forzamiento del cambio climático. (Stocker et al., 2013).

Hay una diferencia fundamental entre el comportamiento del CO_2 y del vapor de agua: este último se puede condensar y precipitarse. Esta es la razón principal por la que el vapor de agua troposférico (generalmente por debajo de los 10 km de altitud) no se considera un gas antropógeno que contribuye al forzamiento radiativo. Por el contrario, las emisiones antropógenas tienen un impacto notable en el vapor de agua presente en la estratosfera, la parte de la atmósfera por encima de los 10 km. El aumento de las concentraciones de metano (CH_4) debido a las actividades humanas genera, por oxidación, una fuente de agua adicional, que explica parcialmente los cambios observados en esa capa de la atmósfera. La variación de agua en la estratosfera tiene un impacto radiativo, se considera un forzamiento y puede evaluarse. (Stocker et al., 2013).

Sin embargo, otros gases de efecto invernadero, principalmente el CO_2 , son necesarios para mantener la presencia del vapor de agua en la atmósfera. De hecho, si estos otros gases se removiesen de la atmósfera, la temperatura de esta caería lo suficiente como para producir un descenso del vapor de agua, conduciendo a una caída descontrolada del efecto invernadero que llevaría al planeta a un estado de congelación. Así pues, los otros gases de efecto invernadero proporcionan la estructura de temperatura que mantiene los niveles actuales de vapor de agua atmosférico. Por consiguiente, aunque el CO_2 sea el principal agente antropógeno que regula el cambio del clima, el vapor de agua produce una retroalimentación fuerte y rápida que amplifica cualquier forzamiento inicial por un factor típico de entre dos y tres. El vapor de agua no origina un forzamiento inicial significativo, pero aun así es un agente fundamental del cambio climático. (Stocker et al., 2013).

En la figura 6 se muestra cómo el ciclo del agua tiene un efecto en el cambio climático.

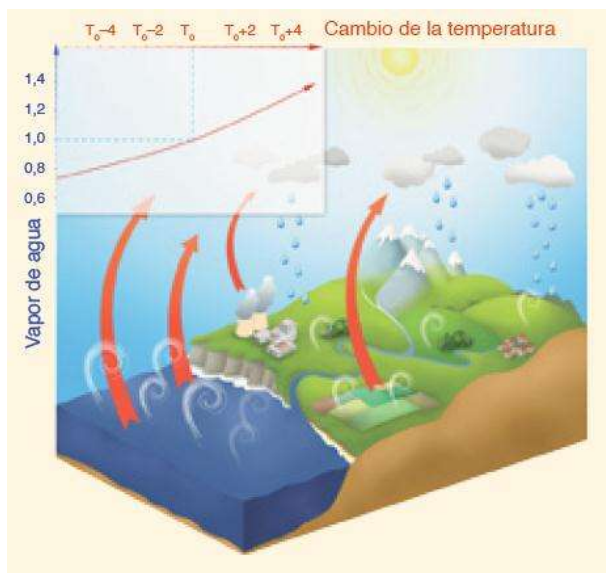


Figura 6. Ilustración del ciclo del agua y su interacción con el efecto invernadero. El gráfico insertado en la parte superior izquierda indica el aumento relativo del contenido potencial de vapor de agua en el aire con un aumento de la temperatura (casi un 7% por grado). Los rizos denotan la evaporación, compensada por la precipitación para cerrar el balance hídrico. Las flechas ilustran la radiación infrarroja saliente que es parcialmente absorbida por el vapor de agua y otros gases, un proceso que es uno de los componentes del efecto invernadero. No se han incluido los procesos de la estratosfera. (Stocker et al., 2013).

2.4.2. Instituciones y legislación.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es el principal órgano internacional encargado de evaluar el cambio climático. Se creó en 1988 a iniciativa del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM), para ofrecer al mundo una visión científica clara del estado actual de los conocimientos sobre el cambio climático y sus posibles repercusiones medioambientales y socioeconómicas. En el mismo año, la Asamblea General de las Naciones Unidas hizo suya la decisión de la OMM y del PNUMA de crear conjuntamente el IPCC.

El IPCC es un órgano intergubernamental. Pueden formar parte de él todos los países miembros de las Naciones Unidas y de la OMM. Actualmente, el IPCC está compuesto por 195 países. El Grupo de Expertos se reúne por lo menos una vez al año en sesión plenaria a nivel de representantes de los gobiernos para adoptar las principales decisiones sobre el programa de trabajo del IPCC y para elegir a los miembros de la



Mesa, entre ellos, el Presidente. Los gobiernos participan también en la exploración del alcance de los informes, la designación de los autores, el proceso de revisión, y aceptan, adoptan y aprueban los informes en las sesiones plenarias.

Los autores de los informes desarrollan su labor actualmente en tres grupos de trabajo, a saber, Grupo de trabajo I: La base científica; Grupo de trabajo II: Impactos, adaptación y vulnerabilidad y Grupo de trabajo III: Mitigación del cambio climático, así como en el Equipo especial sobre los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. El Grupo especial sobre datos y escenarios en apoyo de los análisis de impacto y del clima (TGICA) facilita la distribución y la aplicación de los datos y los escenarios relativos al cambio climático.

Desde el inicio de su labor en 1988, el IPCC ha preparado cinco informes de evaluación en varios volúmenes, los cuales son:

- Primer informe de evaluación. 1990.
- Informes complementarios. 1992.
- Segundo informe de evaluación. 1995.
- Tercer informe de evaluación. 2001.
- Cuarto informe de evaluación. 2007.
- Quinto informe de evaluación. 2013.
- Informe de síntesis. 2014.

La Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), celebrada en 1992, entró en vigor el 21 de marzo de 1994. Hoy en día cuenta con un número de miembros que la hace casi universal. Las denominadas «Partes en la Convención» son los 195 países que la han ratificado.

La CMNUCC Incorporó una línea muy importante de uno de los tratados multilaterales sobre medio ambiente que más éxito han tenido en toda la historia: el Protocolo de Montreal de 1987, en virtud de la cual los estados miembros están obligados a actuar en interés de la seguridad humana incluso a falta de certeza científica.



El protocolo de Montreal tiene como objetivo, establecer medidas concretas para la eliminación del uso de las sustancias que agoten la capa de ozono para evitar los daños a la salud y al medio ambiente, apoyando con recursos financieros (Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal) a los países en desarrollo (denominados en el Artículo 5), a los cuales se les da un periodo de gracia de 10 años antes de cumplir los compromisos específicos de eliminación, respecto de los países desarrollados. Alienta la cooperación intergubernamental para la investigación, la observación sistemática de la capa de ozono, el intercambio de información y el control y eventual eliminación del empleo de las sustancias agotadoras de la capa de ozono, en primera instancia los Clorofluorocarbonos (CFCs). Para este fin, el Protocolo de Montreal entra en vigor el 1° de enero de 1989. México fue de los primeros países en ratificar el Protocolo de Montreal, el 31 de marzo de 1988. El Protocolo ha sido ajustado y enmendado al paso del tiempo para acelerar los calendarios de eliminación, introducir otros tipos de medidas de control y agregar nuevas sustancias controladas a la lista. Actualmente cuenta con cuatro enmiendas denominadas por el lugar de su adopción: Londres, Copenhague, Montreal y Beijing.

Otro logro importante de la CMNUCC, caracterizada por su carácter general y flexible, es que reconoce que el problema del cambio climático es real. La entrada en vigor del tratado representó un gran paso, dado que se disponía de menos pruebas científicas que hoy en día (y todavía hay quienes dudan de que el cambio climático sea un problema real). Es difícil conseguir que las naciones del mundo se pongan de acuerdo en algo, mucho menos en un planteamiento común ante una dificultad que es compleja, cuyas consecuencias no son totalmente claras y que producirá sus efectos más graves dentro de varios decenios e incluso siglos.

La CMNUCC reconoce que es un documento «marco», es decir, un texto que debe enmendarse o desarrollarse con el tiempo para que los esfuerzos frente al calentamiento atmosférico y el cambio climático puedan orientarse mejor y ser más eficaces. La primera adición al tratado, el Protocolo de Kyoto, se aprobó en 1997.

El Protocolo de Kyoto, entró en vigor el 16 de febrero de 2005 para las naciones que han depositado su instrumento de ratificación, entre ellas México, que ratificó el instrumento en el año 2000 y que como país no-Anexo I no tiene obligaciones cuantitativas de



reducción de emisiones de GEI. Establece metas vinculantes de reducción de las emisiones para 37 países industrializados y la Unión Europea, reconociendo que son los principales responsables de los elevados niveles de emisiones de GEI que hay actualmente en la atmósfera, y que son el resultado de quemar fósiles combustibles durante más de 150 años. En este sentido el Protocolo tiene un principio central: el de la «responsabilidad común pero diferenciada».

El Protocolo establece también, entre otras cosas, el Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), el cuál es el único instrumento que permite la realización de proyectos de reducción de emisiones entre países desarrollados y países en desarrollo. México tiene el quinto lugar a nivel mundial en desarrollo de proyectos MDL, mismos que se han desarrollado en las áreas de recuperación de metano, energías renovables, eficiencia energética, procesos industriales y manejo de desechos, entre otros. (SEMARNAT, 2013).

En el ámbito Nacional, desde 1992, México ha venido trabajando en instrumentos de política, arreglos institucionales y documentación relativa al cambio climático. En la figura 7 se resumen las acciones más importantes a nivel nacional. En los anexos se pueden encontrar los puntos importantes de las leyes mencionadas en este apartado.

A nivel federal, los instrumentos de política y órganos de gobierno enfocados a tratar el tema del cambio climático son:

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: La Constitución es la norma suprema en nuestro país. En el Artículo 4º se establece que: “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.”
- Ley General de Cambio Climático (LGCC): La LGCC entró en vigor en octubre de 2012. Tiene como objetivo garantizar el derecho a un medio ambiente sano, mediante la elaboración de políticas públicas para enfrentar los efectos adversos del cambio climático y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. La LGCC determina de manera clara el alcance y contenido de la política nacional de cambio climático, define las obligaciones de las autoridades del Estado y las facultades de los tres órdenes de gobierno. Además, establece los mecanismos institucionales necesarios para hacer frente al cambio climático.

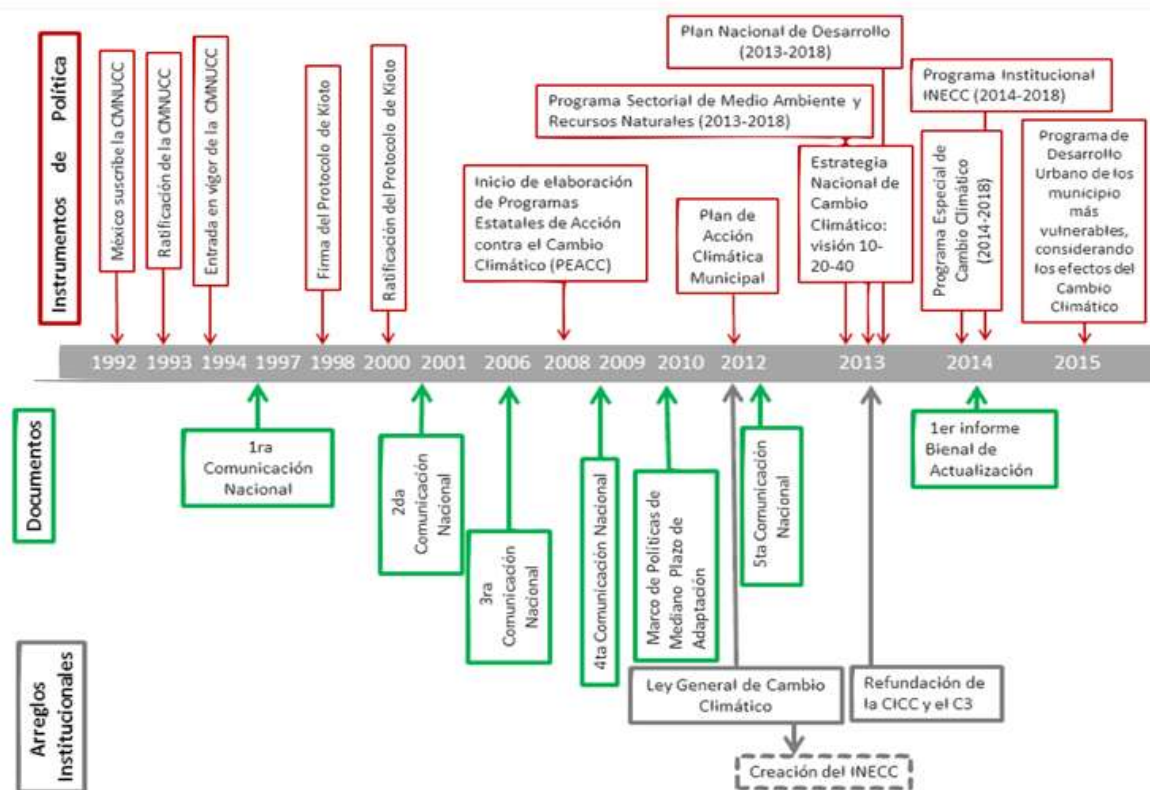


Figura 7. Resumen de acciones ante el cambio climático a nivel nacional. (INECC, 2015)

- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA): La LGEEPA fue publicada en 1988. En ella se definen los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación. El Artículo 5º establece, entre otras cosas, que es facultad de la Federación la formulación y ejecución de acciones de mitigación y adaptación al cambio climático.
- Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC): Es el instrumento de planeación que define la visión de largo plazo.
- Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018: En materia de cambio climático, el PND establece la importancia del desarrollo sustentable y la reducción en la dependencia de los combustibles fósiles.
- Programa Especial de Cambio Climático (PECC): El PECC establece los objetivos, estrategias, acciones y metas para enfrentar el cambio climático mediante la definición de prioridades en materia de adaptación, mitigación, investigación, así como la asignación de responsabilidades, tiempos de ejecución, coordinación de



acciones y de resultados y estimación de costos, de acuerdo con la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC).

- Fondo para el Cambio Climático (FCC): Los artículos 80 al 86 de la LGCC crean el FCC, sus objetivos son captar y canalizar recursos financieros públicos, privados, nacionales e internacionales, para apoyar la implementación de acciones para enfrentar el cambio climático. Las acciones relacionadas con la adaptación serán prioritarias en la aplicación de los recursos del fondo.
- Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC): El SINACC está integrado por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC); el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC); el Consejo de Cambio Climático (C3); las entidades federativas; las asociaciones de autoridades municipales; y el Congreso de la Unión.

A nivel estatal, municipal y regional se tienen las siguientes acciones:

- Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC). De acuerdo a los datos de SEMARNAT e INECC, el estado de Michoacán cuenta con un PEACC en desarrollo aún.
- Plan de Acción Climática Municipal (PACMUN)

2.4.3. Modelos de Circulación General.

Como se mencionó en el apartado de modelos matemáticos, los modelos sirven para simplificar, en cierto modo, la realidad. Con el tiempo, este tipo de modelos han permitido simular relativamente bien, procesos tan complicados como el funcionamiento de la atmósfera.

Gracias a los modelos, se ha encontrado que el calentamiento de la atmósfera por las actividades humanas es real. La utilidad de los modelos numéricos del clima no se limita al estudio del cambio climático. Desde hace ya varios años, se generan predicciones estacionales del clima que apoyan la toma de decisiones y la planeación en sectores vulnerables a condiciones extremas del clima, como en la agricultura, la protección civil, el manejo del agua o la conservación y manejo de bosques. Por ejemplo, si se dispone de



un buen modelo climático se puede estimar cómo varía la temperatura al aumentar la concentración de un gas como el bióxido de carbono (CO_2). (Magaña, 2010).

Hoy en día, se dispone de modelos tan complejos que consideran no sólo la atmósfera, sino también la dinámica de los océanos, de la biosfera, y la criosfera (casquetes de hielo y nieve). Los modelos, son capaces de procesar cascadas de datos que proceden de una red de estaciones, satélites y estaciones de control remoto cada vez más amplia para entregar pronósticos del tiempo precisos, aunque no exactos. Dentro de los grandes foros de análisis del clima como el IPCC, se discute que aún y cuando se determine la predictibilidad de las variaciones interanuales del clima, ésta no necesariamente determinará la confianza que se tenga en las proyecciones del cambio climático. Es por ello, que las proyecciones de cambio climático global y regional consideran a la incertidumbre en el forzante radiativo futuro como determinante para proyectar el clima. (Magaña, 2010).

Para estimar los potenciales impactos del cambio climático y definir acciones de prevención es necesario conocer la magnitud, ubicación y plazo al cual se puede presentar una condición anómala del clima. La única herramienta con la que se cuenta para proyectar el clima a futuro son los modelos del clima, conocidos como Modelos de Circulación General de la Atmósfera (MCG o GCMs, por sus siglas en inglés). Los modelos numéricos dividen la atmósfera en capas, cada capa en una cuadrícula, generando así una retícula de celdas en tres dimensiones. Así los MCG permiten crear escenarios de la condición climática más probable. (Magaña, 2010).

Por lo tanto, podemos definir a los MCG como representaciones numéricas tridimensionales, que se emplean para simular el comportamiento del sistema climático global (incluyendo la atmósfera, los océanos, la biosfera, la criosfera y la superficie terrestre). En general, la calidad de un modelo se determina a través de su habilidad para simular climas pasados o para pronosticar estacionalmente.

Para la regionalización de los MCG, el IPCC (2001) menciona: Las técnicas utilizadas para aumentar el grado de detalle a nivel regional han mejorado. Estas técnicas pueden clasificarse en tres categorías: MCGAO de resolución alta y variable; modelos climáticos



regionales (MCR) (o de una zona inclusiva limitada); y métodos empíricos/estadísticos y estadísticos/dinámicos. Las técnicas tienen distintas virtudes y defectos, y su uso a escala continental depende en gran medida de las necesidades de cada aplicación en particular.

2.4.4. Escenarios de cambio climático.

Son varios los elementos que se deben tomar en cuenta para generar escenarios de cambio climático.

Existe una gran variedad de métodos para crear los escenarios de cambio climático que se pueden agrupar en: escenarios sintéticos (también conocidos como incrementales), análogos, y aquellos que pueden construirse a partir de las salidas de los modelos de circulación general (GCM). Entre esos grupos, la variante más utilizada hasta el momento ha sido la de los GCM, debido a que ellos constituyen las mejores herramientas científicas para proyectar el clima futuro. (Magaña, Caetano, 2007).

En 1992, el IPCC publicó unos escenarios de emisiones que servían de base para los modelos de la circulación mundial, con el fin de desarrollar unos escenarios sobre el cambio climático. Los denominados “escenarios IS92” constituyeron un gran paso adelante. Eran los primeros escenarios mundiales que proporcionaban estimaciones de todos los gases de efecto invernadero.

El IPCC decidió en 1996 desarrollar un nuevo conjunto de escenarios de emisiones. Los IE-EE, constituidos por cuatro conjuntos de escenarios llamados “familias”: A1, A2, B1 y B2. Dentro de cada familia, se han desarrollado dos clases principales de escenarios: unos, basados en supuestos armonizados sobre la población mundial, el crecimiento económico y el uso final de la energía, y otros basados en una cuantificación alternativa de la línea evolutiva. (IPCC, 2000).

En la reunión de expertos del IPCC, que se llevó a cabo en 2007 en Noordwijkerhout, Países Bajos, se decidió estudiar más a fondo una línea alterna de investigación de los escenarios, la cual pudiera desarrollar escenarios mundiales a dos periodos de tiempo: corto y largo plazo. El primer paso fue seleccionar las Vías de Concentración



Representativas (VCR) o “Representative Concentration Pathways” en inglés (RCP), compatibles con todos los escenarios de emisiones de estabilización, mitigación y de referencia; de esta manera serían adecuados para desarrollar las simulaciones de modelos de clima útiles en diversos tipos de investigaciones y evaluaciones relacionadas con cambio climático.

Estos escenarios tienen su nombre de acuerdo al forzamiento radiativo que producen al año 2100: VCR 2.6 W/m², VCR 4.5 W/m², VCR 6.0 W/m² y VCR 8.5 W/m². En la tabla 1 se presentan los datos característicos de dichos escenarios.

Tabla 1. Datos característicos de los escenarios de cambio climático. (Moss, et al., 2010).

Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración (p.p.m.)	Trayectoria	Modelo que provee el RCP
RCP 8.5	>8.5 Wm ⁻² en 2100	>1,370 CO ₂	Aumentando	MESSAGE (Austria)
RCP 6.0	6 Wm ⁻² estable después de 2100	850 CO ₂ estable después de 2100	Estable sin pararse	AIM (Japón)
RCP 4.5	4.5 Wm ⁻² estable después de 2100	650 CO ₂ estable después de 2100	Estable sin pararse	GCAM (EU)
RCP 2.6	Pico en 3Wm ⁻² antes del 2100 y disminuye después	Pico en 490 CO ₂ antes del 2100 y disminuye después	Aumenta y posteriormente disminuye	IMAGE (Países bajos)

En la figura 8 se muestran las series temporales de los valores medios anuales globales de las anomalías de la temperatura del aire en superficie (en relación con el período 1986-2005) obtenidas de experimentos determinados por la concentración. Las proyecciones se muestran para cada RCP para la media multimodelos (líneas continuas) y ± 1.64 desviaciones típicas (5% al 95%) para la distribución de modelos individuales (sombreado) de acuerdo con las medias anuales. El intervalo de 1.64 desviaciones típicas, basado en promedios de 20 años desde 2081 a 2100 en relación con el período 1986-2005, se interpreta como cambios probables para finales del siglo XXI. Los números del mismo color que las líneas indican el número de modelos diferentes que contribuyen en los distintos períodos de tiempo.

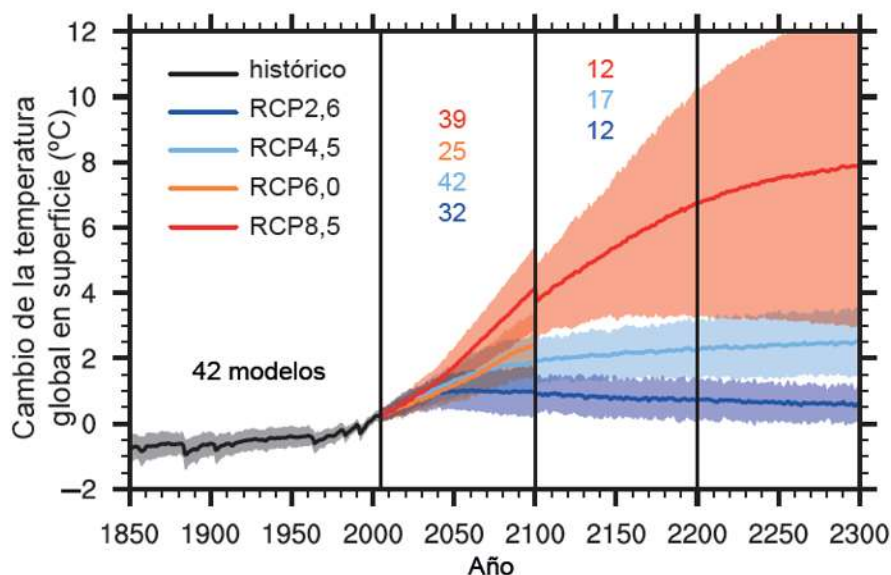


Figura 8. Cambios en la temperatura global en superficie. (Stocker, et al., 2013)

Por otro lado, los cambios en el promedio de precipitaciones en un mundo más cálido mostrarán una variación espacial significativa en el escenario RCP8.5. Algunas regiones experimentarán aumentos, y otras, disminuciones, e incluso habrá regiones que no experimenten cambios significativos. En la figura 9 se muestran mapas del cambio de las precipitaciones para los cuatro escenarios RCP.

Para el presente trabajo se utilizaron los escenarios que el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), pone a nuestra disposición en su página oficial. Estos se obtuvieron de acuerdo al experimento multimodelos de la CMIP5 (coordinado a través del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas).

De acuerdo al INECC 2013, se usaron simulaciones de 15 MCG del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés), mostrados en la tabla 2. Los cuales se recortaron a una malla de 0 a 40°N, y de 140W a 60W y se interpolaron en los puntos de malla de las observaciones (CRU), de 0.5° * 0.5°. Las variables en superficie utilizadas son precipitación, temperatura máxima, mínima y promedio.

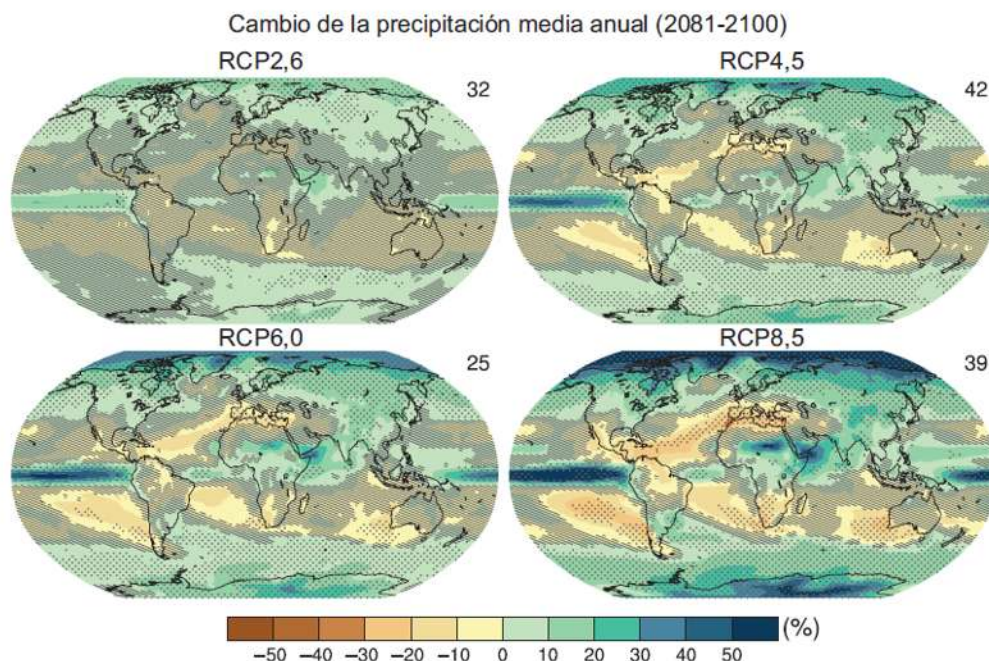


Figura 9. Cambio en la precipitación media anual. (Stocker, et al., 2013).

Tabla 2. Modelos de circulación general usados para el ensamble. (INECC, 2013)

Modelos de Circulación General (MCG)		
1.-Max Plank Institute (MPI-ESM-LR)	6.-Beijing Climate Center (BCC-CSM1-1)	12.-Met Office Hadley (MOHC)
2.-Institute for Numerical Mathematics (INM)	7.-Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL-cm5a-lr)	13.-Meteorological Research Institute (MRI-CGCM3)
3.-Norwegian Climate Center (NorESM1)	8.-NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS-E2-R)	14.-Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL-CM3)
4.-Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CanESM2)	9 y 10.-Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC.-esm-chem y MIROC-esm)	15.-Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO-MK3-6)
5.-Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM-CM5)	11.-Atmosphere and Ocean Research Institute (MIROC5)	



3. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para la realización de este trabajo se necesitó diversa información, así como también software para llevar a cabo las modelaciones necesarias; primero la modelación de hidrología de superficie y después los modelos con el efecto del cambio climático.

3.1. Materiales

3.1.1. Materiales para la modelación de hidrología superficial.

El modelo SWAT necesita como información de entrada para la modelación, una serie de datos diarios de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima. Así como las características de los suelos y usos de suelo presentes en la zona, y el modelo digital de elevaciones para generar la cuenca correspondiente.

Los datos de suelos y el modelo digital de elevaciones se obtuvieron de la base de mapas que proporciona el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en sus instalaciones. En las figuras 9, 10 y 11 se pueden observar los mapas adaptados para su uso en la modelación.

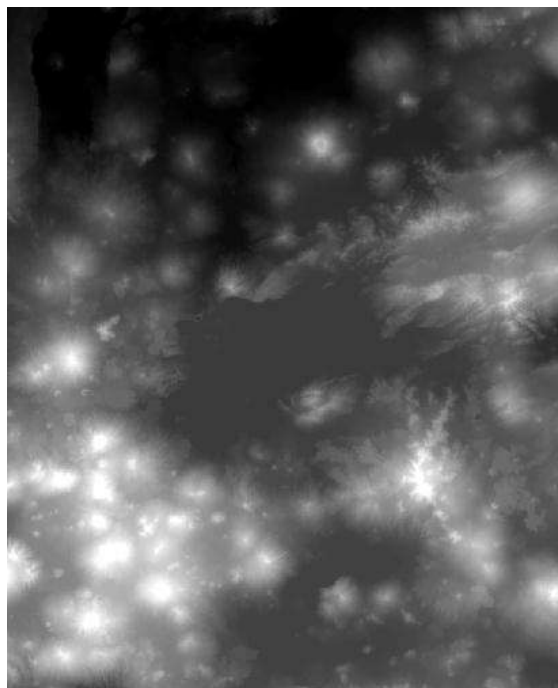


Figura 9. Modelo Digital de Elevaciones para la cuenca en estudio.



El INEGI, describe un modelo digital de elevación como una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos.

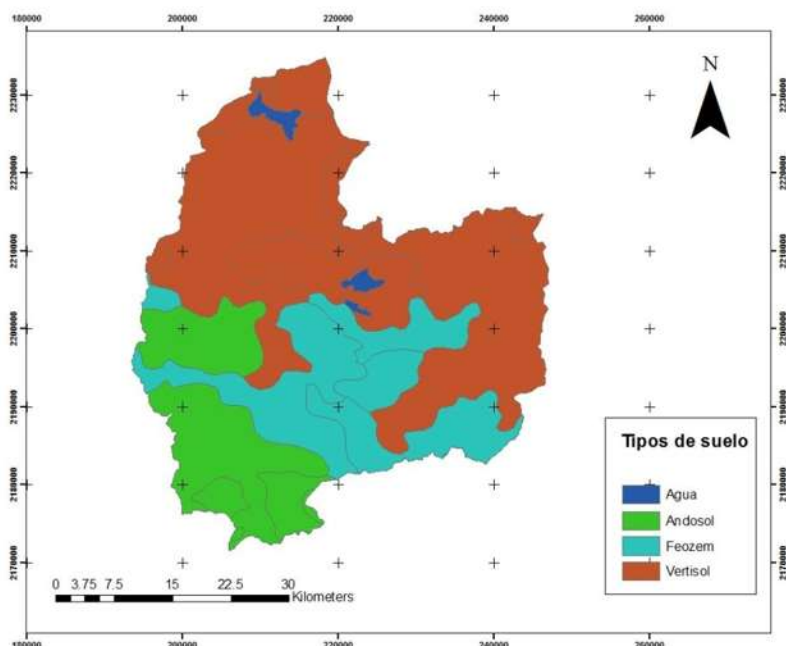


Figura 10. Tipos de suelo presentes en la cuenca de estudio.

El suelo es el medio en donde las plantas obtienen los nutrientes que requieren para su desarrollo; por tanto, el conocimiento que se tenga de las características morfológicas, físicas y químicas de este elemento es de capital importancia para planear su uso más racional. En el caso de la escorrentía superficial, influyen en la infiltración que habrá en cada zona; dependiendo de sus características, podrá haber más o menos flujo a la salida de la cuenca o en sus ramificaciones.



Los suelos tienen procesos de desarrollo diferentes, dependiendo del medio físico en el que se encuentran ubicados, y esos procesos determinan una serie de características que los hacen más o menos fértiles desde el punto de vista agrícola o pecuario. Asimismo, el suelo tiene algunas propiedades físicas que permiten un mejor o peor drenaje interno; este aspecto es necesario conocerlo al decidir el tipo de prácticas que habrán de llevarse a cabo, si se quiere aprovechar este elemento de manera racional.

Al igual que las rocas, el suelo también constituye parte del sustrato en el que se construyen las obras. De su conocimiento deriva la información para elegir el tipo de maquinaria que habrá de usarse, las características que deben tener las cimentaciones o basamentos de las construcciones y la localización de los lugares de donde puedan extraerse los materiales complementarios a los otros elementos usados en la construcción.

Para la utilización en el modelo SWAT fue necesario reclasificar los suelos. Esto se hizo en base al nombre del suelo; quedaron de esta manera 4 tipos de suelo: agua, andosol, feozem y vertisol, siendo el vertisol el predominante, como se observa en la figura 10. Las características de cada suelo se introdujeron en la base de datos de SWAT.

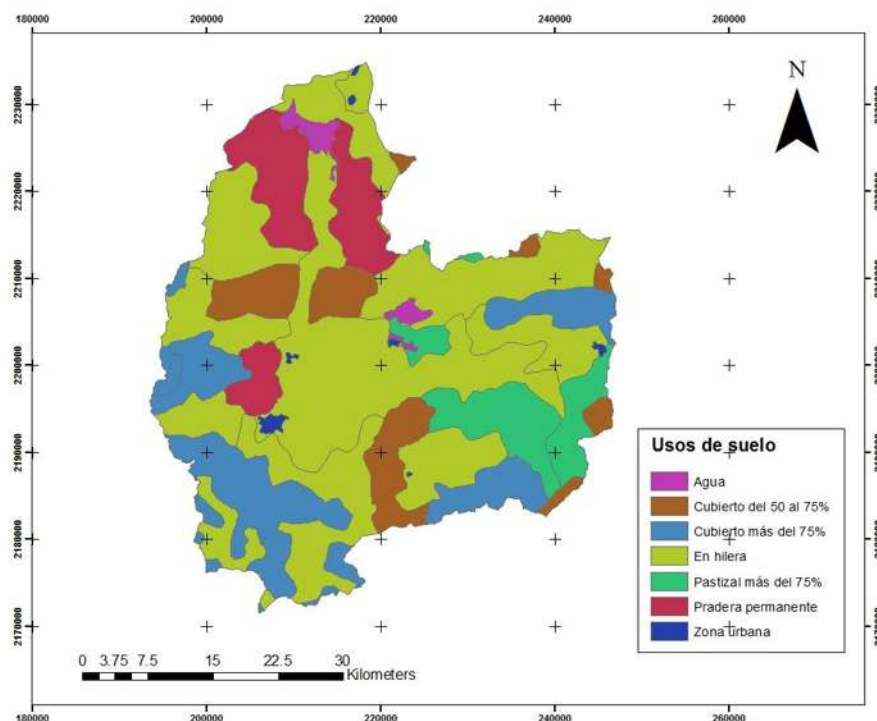


Figura 11. Usos de suelo presentes en la cuenca del río Angulo.



En el caso de la clasificación de uso de suelo, ésta se hizo en primer lugar de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, como se muestra en la figura 11. Pero para la reclasificación de SWAT fue necesario encontrar el uso de suelo correspondiente (de acuerdo a la base de datos de SWAT), a cada uno de los suelos de la norma.

Los datos climatológicos diarios (precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima), fueron extraídos de la base de datos contenida en el programa SIHIMAX, el cual proporciona la opción de llenado de datos faltantes, pero debido a que SWAT llena datos al momento de modelar, no fue necesaria la utilización de esta característica. Sólo se revisó que las estaciones descargadas fueran independientes entre ellas, para una mejor caracterización de la zona. Cabe mencionar que SIHIMAX contiene los datos de CLICOM, la base de datos de estaciones climatológicas superficiales de México.

CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLimate COMputing project. Las observaciones diarias del CLICOM representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM. Cada una de las diferentes estaciones del país contiene diferentes periodos de información, pero se pueden encontrar datos de 1920 a 2010.

Después de descargar las estaciones que rodeaban la cuenca, se descartaron aquellas que no cumplieron con la consistencia de los datos evaluadas por el método de helmet y el método de secuencias, además, se discernió entre las que quedaron haciendo los polígonos de Thiessen. En la figura 12 se muestra el mapa de las estaciones climatológicas seleccionadas., y en la tabla 3 la lista de las estaciones climatológicas que fueron seleccionadas para el análisis.

Tabla 3. Lista de estaciones climatológicas para la cuenca del río Angulo.

Código	Nombre	X	Y	Z	% Datos llenos	Años con datos
16050	HUANIQUEO	-101.502833	19.8928333	2040	94.11	44
16084	PANINDICUARO	-101.755667	19.9716667	1852	87.51	45
16104	PURUANDIRO	-101.5095	20.0861667	2012	85.88	46
16225	VILLA JIMENEZ II	-101.7415	19.9205	2000	90.2	27
16234	GALEANA	-101.571667	20.0366667	1935	78.27	21
16243	ZIQUITARO	-101.886667	20.0566667	1831	67.34	19



La altura de la lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores, aunque sea en sitios cercanos. Los pluviómetros registran la lluvia puntual, es decir, la que se produce en el punto en el que está instalado el aparato y, para los cálculos ingenieriles, es necesario conocer la lluvia media en una zona dada. Existen tres métodos de uso generalizado: el método aritmético, los polígonos de Thiessen y el método de las isoyetas. (Aparicio M. F. J., 2011).

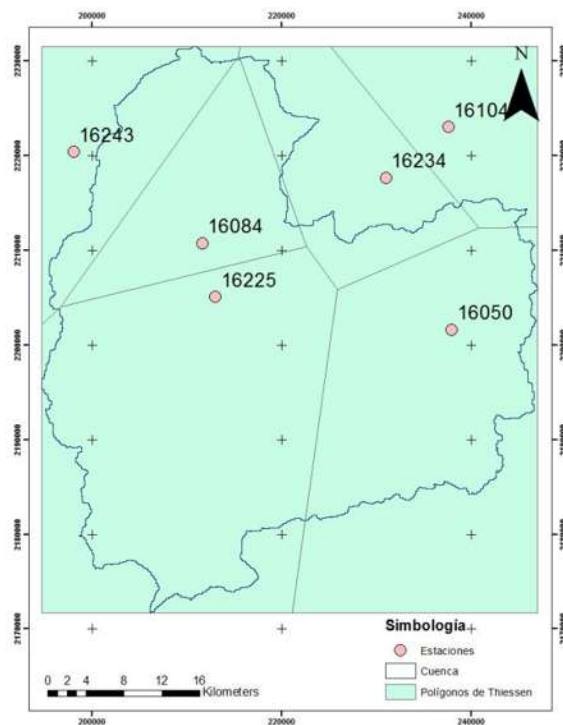


Figura 12. Mapa de Polígonos de Thiessen, usado para seleccionar estaciones.

Se eligieron los polígonos de Thiessen para hacer esta selección ya que toman en cuenta la distribución de las estaciones en el área de la cuenca y no cambian a menos de que se agreguen o se eliminen estaciones. Así se tiene la seguridad de que las estaciones seleccionadas, influyen en el escurrimiento de la cuenca.

Otros datos necesarios son las precipitaciones con cambio climático, éstas fueron obtenidas de la página web del INECC; para ubicar cuáles estaciones eran las indicadas, se descargaron de acuerdo a las coordenadas de las esquinas del cuadrante que rodea a la cuenca. En la figura 13 se muestra la ubicación de las estaciones de cambio climático descargadas.

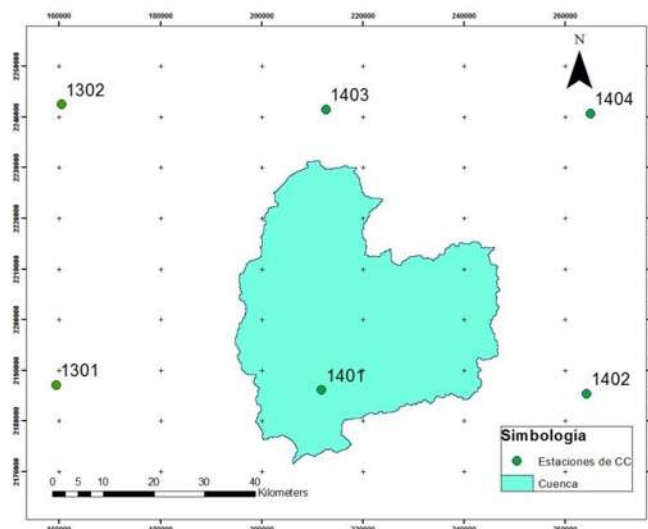


Figura 13. Estaciones con datos de cambio climático. La nomenclatura fue dada por la autora para facilitar su identificación.

3.1.2. ArcSWAT como material para la modelación.

SWAT son las siglas para Soil and Water Assessment Tool (Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua). El modelo a escala fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el USDA, el Servicio Agrícola de Investigación (ARS). SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo de suelo en el agua, el sedimento y la producción de sustancias agrícolas químicas en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado. (Neitsch S. L., et al., 2005).

Para satisfacer este objetivo, el modelo está basado físicamente. Antes que solo integrar ecuaciones de regresión para describir la relación entre variables de entrada y salida, SWAT requiere información específica sobre el clima y tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra que acontecen en las cuencas. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento de sedimento, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, etc. son modelados directamente por SWAT. (Neitsch S. L., et al., 2005).

Uno de los beneficios de utilizar SWAT es que maneja la interface gráfica ArcGIS, la cual hace más sencillo su manejo y utilización. Otro beneficio es que la simulación es “dirigida” pues no habilita las ventanas hasta que hayas cumplido con la información necesaria.



Además se puede acceder a los datos de las tablas con facilidad, una vez que sean introducidos a la base de datos de SWAT.

SWAT integra características de varios modelos ARS y es una consecuencia directa del modelo SWRRB1 (Simulador para Recursos de Agua en Cuencas Hidrográficas Rurales). Los modelos específicos que contribuyeron significativamente al desarrollo del SWAT fueron CREAMS2 (Sustancias Químicas, Escorrentías, y la Erosión de Sistemas de Gestión Agrícola), y EPIC4 (Calculadora del Impacto de la Erosión-Productividad). (Neitsch S. L., et al., 2005).

En la figura 14 se muestra la cronología de los modelos mencionados, hasta llegar a la creación de SWAT.

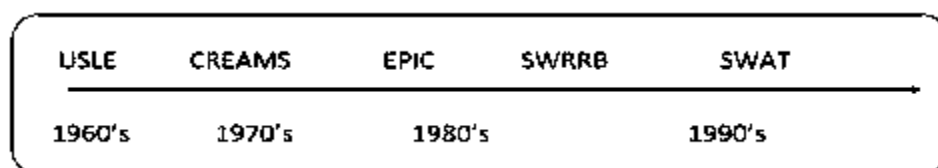


Figura 14. Cronología de modelos que sirvieron de precedente para SWAT.

Mientras SWRRB fue utilizado fácilmente para cuencas de hasta unos escasos cientos de kilómetros cuadrados de tamaño, se buscaba simular el flujo de corriente para las cuencas que se extendían a más de varios kilómetros cuadrados. Para un área tan extensa las cuencas bajo el estudio debían ser divididas en cientos de sub-cuencas. La división de las cuencas en el SWRRB era limitada a 10 subcuencas y el modelo dirigía el agua y sedimentos fuera de la subcuenca directamente a la salida de la cuenca. Estas limitaciones llevaron al desarrollo de un modelo llamado ROTO (dirigiendo las salidas al vertedero), que tomó las salidas de múltiples recorridos de SWRRB, redirigió los flujos por canales y reservas (depósitos). (Neitsch S. L., et al., 2005).

Para vencer la dificultad de manejar los dos modelos, fueron fusionados en uno solo, el SWAT. Que permite simulaciones de áreas muy extensas y retuvo todas las características que hicieron SWRRB un modelo de simulación tan valioso.

Desde que SWAT fue creado a principios de los años noventa, ha experimentado revisión y expansión continua de sus capacidades. Las mejoras más significativas del modelo incluyen, de acuerdo a Neitsch S. L., et al., 2005:



- SWAT 94.2: Múltiples unidades de respuesta hidrológicas (HRUs, integrados).
- SWAT 96.2: La auto-fertilización y la auto-irrigación agregados como opciones de gestión; almacenamiento de agua de dosel incorporada; un componente CO_2 agregado para el modelo de desarrollo de cosechas, estudios de cambio climáticos; agregada la ecuación potencial de evapotranspiración Penman-Monteith; incorporado el flujo de agua lateral en el suelo, basada en el modelo cinemático de almacenamiento; integradas las ecuaciones de calidad de agua y nutrientes de QUAL2E; enrutamiento de pesticidas en corrientes.
- SWAT 98.1: rutinas mejoradas de derretimiento de nieve; mejorada la calidad de agua en-corriente; rutinas expandidas de ciclo de nutrientes; efecto rasante, aplicaciones de abono, y drenaje de flujo agregado como opciones de gestión; modificación del modelo para el uso en el hemisferio sur.
- SWAT 99.2: rutinas mejoradas de ciclo de nutrientes, depósito/estanque/eliminación de nutrientes de humedales por asentamiento; agregándose almacenamiento de bancos de agua al alcance; enrutamiento de metales al alcance; construcción urbana/ecuaciones de deslave de SWMM agregadas junto con ecuaciones de regresión de USGS.
- SWAT 2000: rutinas de transporte de bacterias; infiltración de Green & Ampt; generador del tiempo mejorado; permite radiación solar diaria, humedad relativa, y velocidad de viento para ser leído o generado; permite valores de ET (evapotranspiración) para ser leídos o calculados; todos los métodos potenciales ET revisados; los procesos de banda de elevación mejorados; simulación permitida de un número ilimitado de depósitos; método de enrutamiento de Muskingum agregado; cálculos modificados del estado latente para la simulación apropiada en áreas tropicales.
- SWAT 2005: se agregaron y mejoraron rutinas mejoradas de transporte de bacterias; escenarios de pronóstico del tiempo agregados; generador de precipitación sub-diaria; el parámetro de retención utilizado en el cálculo diario de



CN (Método de Curva) puede ser una función del contenido de agua del suelo o evapotranspiración de planta.

Además de los cambios mencionados anteriormente, las interfaces para el modelo han sido desarrolladas en Windows (Visual Basic), GRASS, ArcView y ArcGIS. SWAT también ha experimentado una implementación del modelo a nivel mundial.

3.1.3. Materiales para la calibración y validación de la modelación.

Un modelo matemático está mejor aplicado, si se demuestra que concuerda, o por lo menos se acerca, a la realidad. Es por ello que para poder usar el modelo que se hizo en SWAT para la proyección de los escenarios de cambio climático, se hizo la calibración y validación de los escurrimientos modelados con los históricos.

Esto se realizó con los datos históricos de las estaciones hidrométricas que proporciona la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).

Dentro de la cuenca se encuentran 7 estaciones, según el mapa de estaciones hidrométricas de CONAGUA, sin embargo sólo 2 de ellas pueden usarse para la comparación de escurrimientos ya que las otras no cuentan con datos precisos. Las estaciones aptas para la calibración fueron la 12014 en Villa Jiménez y la 12415 en Puente San Isidro.

Sin embargo, las aportaciones registradas directamente en el río no suelen corresponder al régimen natural de la cuenca. El régimen natural de una cuenca puede verse alterado por diversos tipos de acciones, tanto en superficie como sobre las aguas subterráneas. Las alteraciones más frecuentes pueden ser las siguientes:

- Detracción de caudal en los ríos a través de tomas en presas, bombeos, etc.
- Vertido de caudales al río, generalmente procedentes del sobrante de los usos del agua.
- Almacenamiento y desembalse de agua de las presas de regulación.



- Aumento de las pérdidas naturales por evaporación directa del espejo de agua generado en los embalses.
- Detracción o aportación de aguas subterráneas debido a bombeos, recarga artificial, o como consecuencia de alteraciones en el sistema superficial como aumento de la recarga por infiltración desde embalses o por excedentes de riego.

Los datos de aportaciones en régimen natural constituyen la información más relevante para un trabajo de análisis de gestión de un sistema de recursos hídricos. Para la restitución de datos hidrológicos a régimen natural, se pueden adoptar varios métodos, y la determinación de cuál sería el más adecuado dependerá de la información y de los medios disponibles. (Solera A., et al., n. d.)

Los datos de las estaciones hidrométricas 12014 y 12415, restituidos a régimen natural, fueron obtenidos del trabajo de (Madrigal B. J. J., et al., 2015) también relacionado con la cuenca del río Angulo. Con los valores de régimen natural, se procedió a calibrar el modelo simulado con SWAT y posteriormente validarlo y continuar con la simulación de los escenarios de cambio climático.

3.2. Métodos.

3.2.1. Metodología para la simulación con SWAT.

Como se mencionó anteriormente SWAT permite varios procesos físicos diferentes para ser simulados en una cuenca hidrográfica.

Para propósitos de la simulación, una cuenca hidrográfica es dividida en cierto número de subcuencas. El uso de subcuencas en la simulación es muy útil, particularmente, cuando hay diversas áreas de la misma cuenca, que se ven afectadas por el uso de suelos o suelos bastantes desiguales de tal forma, que impactan grandemente la hidrología del sector. Al dividir la cuenca hidrográfica en sub-cuencas, el usuario puede referirse a diversas áreas de la vertiente de acuerdo al espacio. (Neitsch S. L., et al., 2005). En la figura 15 se muestran la delineación de subcuencas para la cuenca hidrológica en estudio.



La información de entrada para cada subcuenca es agrupada u organizada en las categorías siguientes: clima; unidades hidrológicas de respuesta o HRUs; estanques/humedales; agua subterránea; y canal principal, o alcance, drenando la subcuenca. Las unidades hidrológicas de respuesta son agrupadas en áreas de tierra dentro de la sub-cuenca que son comprendidas de cobertura de tierra única, suelo, y combinaciones de gestión (manejo).

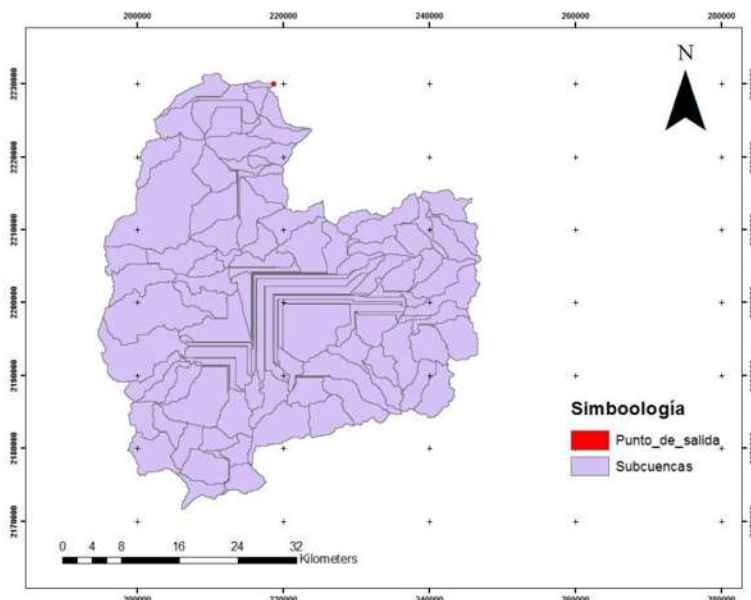


Figura 15. Delineación de subcuencas (113) en la cuenca hidrológica del río Angulo.

La simulación de la hidrología de la cuenca puede ser separada en dos divisiones mayores. La primera división es la fase de tierra del ciclo hidrológico, la cual controla la calidad de agua, el sedimento, las cargas de alimento nutritivo y pesticida al principal canal en cada sub-cuenca. La segunda división es el agua o fase de enrutamiento del ciclo hidrológico, el que puede ser definido como el movimiento del agua, sedimentos, etc. a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia el vertedero.

El ciclo hidrológico es simulado por SWAT basado en la ecuación del equilibrio de agua:

$$SW_t = SW_0 + \Sigma(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Dónde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm H_2O), SW_0 es el contenido inicial de agua en el suelo en un día i (mm H_2O), t es el tiempo (días), R_{day} es la cantidad de



precipitación en un día i ($\text{mm H}_2\text{O}$), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día i ($\text{mm H}_2\text{O}$), E_a es la cantidad de evapotranspiración en un día i ($\text{mm H}_2\text{O}$), W_{seep} es la cantidad de agua que entra en la zona vadosa del perfil del suelo en un día i ($\text{mm H}_2\text{O}$), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día i ($\text{mm H}_2\text{O}$).

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Las escorrentías son predichas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener las escorrentías totales para las cuencas. Esto aumenta la certeza y da una mejor descripción física del equilibrio del agua.

Para ejemplificar lo antes mencionado, en la figura 16 se muestra la secuencia general de procesos utilizados por SWAT.

Una vez que el agua se introduce al sistema como precipitación, la energía disponible, específicamente la radiación solar, ejerce un mayor control en el movimiento del agua en la fase terrenal del ciclo hidrológico. Los procesos que son grandemente afectados por la temperatura y la radiación solar incluyen la caída de nieve, el derretimiento de la nieve y la evaporación. Ya que la evaporación es el mecanismo primario de eliminación en la cuenca, las entradas de energía se tornan importantes en reproducir o simular un balance preciso del agua.

Cuando la radiación solar ingresa a la atmósfera terrestre, una porción de energía es eliminada por la dispersión y la absorción. Debido a la complejidad del proceso y del detalle de la información que se requiere para predecir de forma precisa la cantidad de energía perdida mientras pasa por la atmósfera, SWAT hace una suposición en la que aproximadamente un 20% de la radiación extraterrestre se pierde en el paso de la atmósfera hacia debajo de cielos despejados. Además de esto, SWAT simplifica el cálculo de la radiación de la hora solar al asumir que el mediodía solar sucede a las 12:00 p.m. tiempo local estándar.

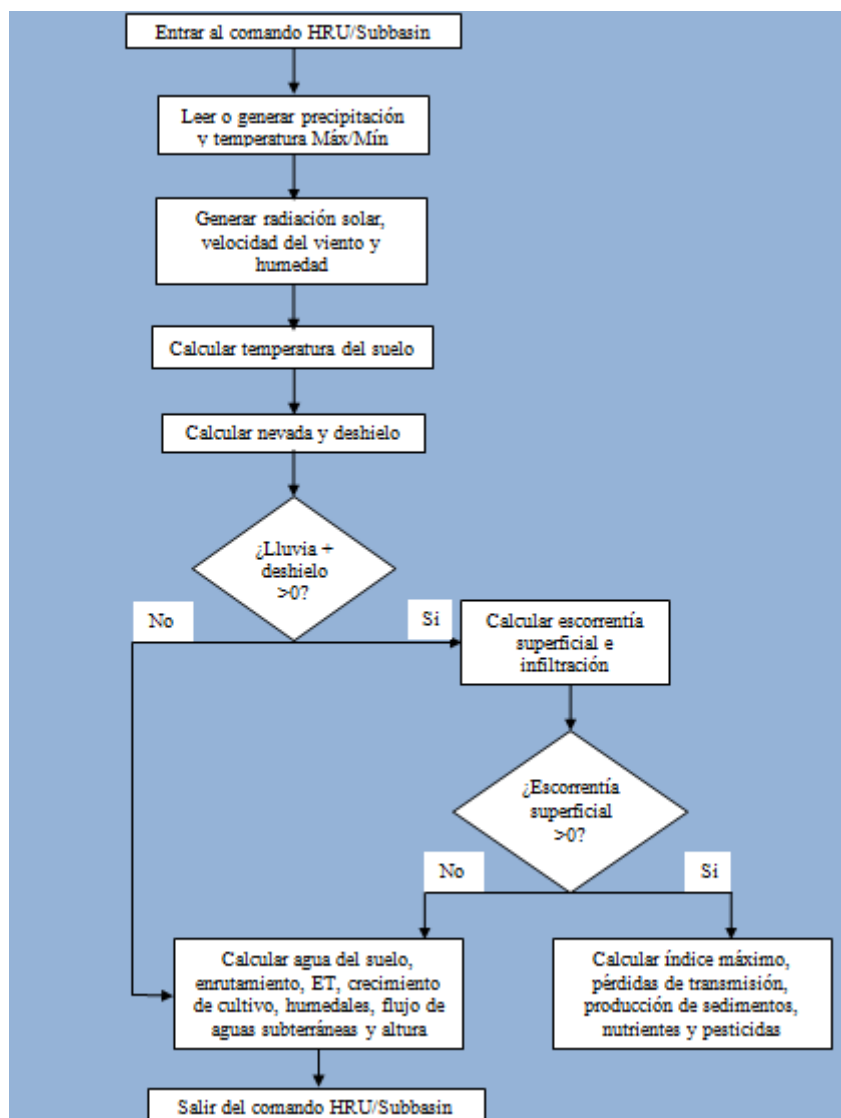


Figura 16. Procesos utilizados por SWAT para modelar la fase terrestre del ciclo hidrológico. (Neitsch, S. L., et al., 2005).

SWAT requiere de un mínimo y máximo diario de la temperatura del aire. Estos datos pueden ser leídos de archivo de entrada (como fue el caso para este trabajo), o ser generados por el modelo. El hecho de tener los datos medios reales de temperaturas, mejora la precisión de los resultados del modelo significativamente.

El cálculo de la temperatura del aire por hora lo hace SWAT de acuerdo a una aproximación que suma una función de interpolación sinusoidal entre las temperaturas mínimas y máximas diarias. Se asume que la temperatura máxima diaria sucede a las 1500 horas y la temperatura mínima diaria a las 300 horas. Entonces se calcula con la ecuación:



$$T_{hr} = T_{av} + \frac{(T_{mx} - T_{mn})}{2} \cdot \cos(0.2618(hr - 15))$$

Donde T_{hr} es la temperatura del aire durante la hora hr del día (°C), T_{av} es la temperatura promedio en el día (°C), T_{mx} es la temperatura máxima diaria (°C), y T_{mn} es la temperatura mínima diaria (°C).

Para la temperatura del suelo, SWAT adopta una ecuación que la calcula como una función de la temperatura del suelo del día anterior, la temperatura del aire anual promedio, la temperatura de la superficie del suelo del día corriente y la profundidad en el perfil. La ecuación utilizada para calcular la temperatura promedio del suelo en el centro de cada capa es:

$$T_{soil}(z, d_n) = \lambda \cdot T_{soil}(z, d_n - 1) + [1.0 - \lambda] \cdot [df \cdot [T_{AAair} - T_{ssurf}] + T_{ssurf}]$$

Donde $T_{soil}(z, d_n)$ es la temperatura del suelo (°C) en la profundidad z (mm) y día del año d_n , λ es el coeficiente de retraso (que va de 0.0 a 1.0) la cual controla la influencia de la temperatura del día anterior sobre la temperatura del día actual, $T_{soil}(z, d_n - 1)$ es la temperatura del suelo (°C) en la capa del día anterior, df es el factor de profundidad que cuantifica la influencia de la profundidad debajo de la superficie en la temperatura del suelo, T_{AAair} es la temperatura promedio anual del aire (°C), y T_{ssurf} es la temperatura de la superficie del suelo en el día. SWAT establece λ como 0.80. Se sabe la temperatura del día anterior del suelo y se calcula la temperatura promedio anual del aire de las temperaturas máxima y mínima de largo plazo reportadas en el archivo de entrada del generador de clima. El cálculo del factor de profundidad puede consultarse en el documento de teoría de SWAT si se requiere de más información.

La velocidad del viento es requerida por SWAT si se utiliza la ecuación de Penman-Monteith para estimar el potencial de evapotranspiración y transpiración. Para este trabajo se eligió la ecuación de Hargreaves ya que es más sencilla y no necesita tantos datos como la de Penman-Monteith.

La capacidad de SWAT para reproducir corrientes hidrográficas observadas se mejora cuando los datos medios de precipitación son introducidos por el usuario. Para este caso,



como se mencionó anteriormente, los datos de precipitación diaria ingresados, son los medidos en las estaciones climatológicas correspondientes. En la figura 17 se muestran las corrientes que SWAT generó para la cuenca en estudio.

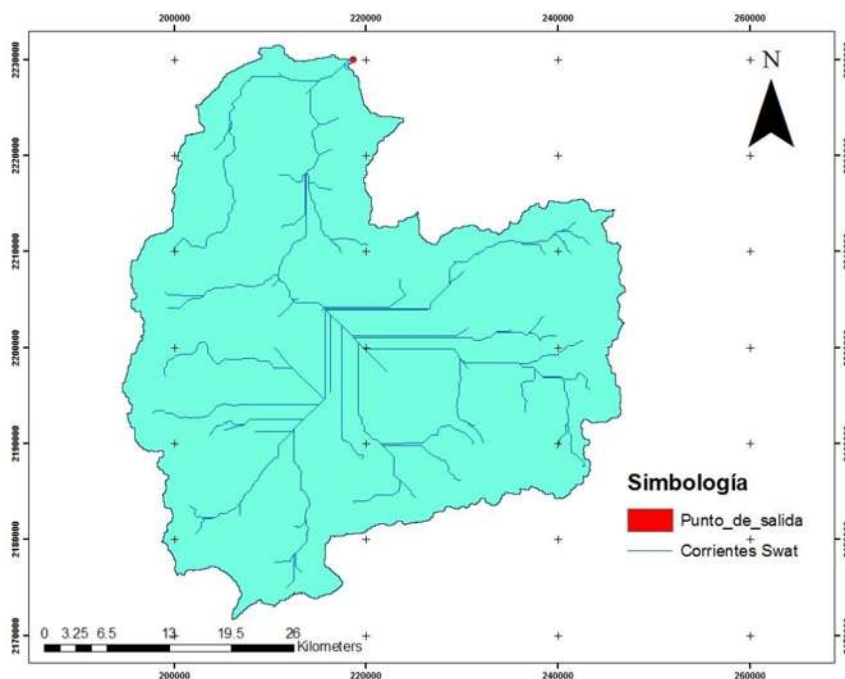


Figura 17. Corrientes hidrográficas generadas por SWAT para la cuenca del río Angulo.

Los datos de radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento fueron generados por el programa SWAT ya que no se cuentan con esos datos diarios medidos.

SWAT incluye el modelo de generador de clima WXGEN para generar datos climáticos o para llenar espacios en registros medidos. Sin embargo, este generador de clima fue desarrollado para los Estados Unidos, así que los valores diarios de entrada para diferentes parámetros de clima fueron generados con un modelo alternativo, ingresando datos estadísticos específicos de cada estación en la base de datos de SWAT.

La ocurrencia de lluvia en un día cualquiera tiene un gran impacto en la humedad relativa, la temperatura y la radiación solar del día. Cuando se deja que SWAT calcule por su cuenta todas las variables, el generador de clima primero genera independientemente la precipitación del día. Una vez que se genera la cantidad total de lluvia del día, se computa la distribución de la lluvia dentro del día si se utiliza el método Green y Ampt para la infiltración. La temperatura máxima, temperatura mínima, radiación solar y la humedad



relativa son después generadas basadas en la presencia o ausencia de lluvia del día. Finalmente, la velocidad del viento se genera independientemente, cuando se utiliza la ecuación de Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración potencial.

En lo referente a la escorrentía superficial, ésta ocurre cuando el agua que cae a la tierra excede la cantidad de agua infiltrada. Cuando el agua es inicialmente aplicada a un suelo seco, el índice de infiltración es muy alto; sin embargo, hará que el suelo se vuelva más húmedo. SWAT provee dos métodos para poder estimar la escorrentía superficial, el elegido para el presente trabajo fue el procedimiento de distribución de número de curva SCS.

La ecuación de escorrentía SCS es un modelo empírico que se volvió de uso común en los años 50. El modelo fue desarrollado para proveer una base consistente para estimar las cantidades de escorrentía bajo tierra de uso variado y tipos de suelo. La ecuación de la distribución del número de curva es:

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

Donde Q_{surf} es la escorrentía acumulada o el exceso de lluvia (mm H₂O), R_{day} es la profundidad de la lluvia por el día (mm H₂O), I_a es la abstracción inicial que incluye almacenaje de la superficie, intercepción e infiltración antes de la escorrentía (mm H₂O), y S es el parámetro de retención (mm H₂O). El parámetro de retención varía espacialmente debido a cambios en el contenido del agua del suelo. Se define como:

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

Donde CN son las curvas numéricas (adimensionales). Las abstracciones iniciales, I_a , son comúnmente aproximadas a $0.2S$.

Las curvas numéricas son similares al coeficiente de escurrimiento y fueron obtenidas por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) basados en la observación de hidrogramas procedentes de varias tormentas en diferentes cuencas de los Estados Unidos. Estas curvas dependen del tipo de suelo, condición hidrológica de la cuenca, uso del suelo y



manejo y la condición de humedad antecedente. (SAGARPA, 2002). En tabla 4 se muestran los valores CN para diferentes condiciones hidrológicas y tipos de suelo.

Tabla 4. Curva numérica (CN) para estimar el escurrimiento bajo diferentes complejos suelo-cobertura y manejo. (Condición de humedad II, $I_a = 0.2S$). (SAGARPA, 2002).

Cobertura			Grupo de suelos			
Uso del suelo	Tratamiento o práctica	Condición hidrológica	A	B	C	D
			Curva numérica			
Suelo en descanso	Surcos rectos		77	86	91	94
Cultivo de escarda	Surcos rectos	Mala	71	81	88	91
	Surcos rectos	Buena	67	78	85	89
	Curva a nivel	Mala	70	79	84	88
	Curva a nivel	Buena	65	75	82	86
	Terraza y curva a nivel	Mala	66	74	80	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	62	71	78	81
Cultivos tupidos	Surcos rectos	Mala	65	76	84	88
	Surcos rectos	Buena	63	75	83	87
	Curva a nivel	Mala	63	74	82	85
	Curva a nivel	Buena	61	73	81	84
	Terraza y curva a nivel	Mala	61	72	79	82
	Terraza y curva a nivel	Buena	59	70	70	81
Leguminosas en hilera o forraje en rotación	Surcos rectos	Mala	66	77	85	85
	Surcos rectos	Buena	58	72	81	85
	Curva a nivel	Mala	64	75	83	85
	Curva a nivel	Buena	55	69	78	83
	Terraza y curva a nivel	Mala	63	73	80	83
	Terraza y curva a nivel	Buena	51	67	76	80
Pastizales	Sin tratamiento mecánico	Mala	68	79	86	89
	Sin tratamiento mecánico	Regular	49	69	79	84
	Sin tratamiento mecánico	Buena	39	61	74	80
	Curva a nivel	Mala	47	67	81	88
	Curva a nivel	Regular	25	59	75	83
	Curva a nivel	Buena	6	35	70	79
Pasto de corte		Buena	30	58	71	78
Bosque		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79



		Buena	25	55	70	77
Caminos de tierra		Buena	72	82	87	89
Caminos pavimentados		Buena	74	84	90	92

Un factor importante al momento de introducir los valores de las características de los suelos, en la base de datos de SWAT, es el grupo de suelo hidrológico. El grupo de suelo hidrológico puede definirse como un grupo de suelos que poseen potencial de escorrentía bajo condiciones similares de cubierta y de tormenta. El suelo puede ser clasificado en uno de cuatro grupos, A, B, C y D.

Las definiciones de los grupos son:

- A: Suelo con bajo potencial de escurrimiento, incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla; también suelo permeable con grava en el perfil. Infiltración básica 8-12 mm/h
- B: Suelos con moderadamente bajo potencial de escurrimiento. Son suelos arenosos menos profundos y más agregados que el grupo A. Este grupo tiene una infiltración mayor que el promedio cuando está húmedo. Ejemplos: suelos migajones, arenosos ligeros y migajones limosos. Infiltración básica 4-8 mm/h
- C: Suelos con moderadamente alto potencial de escurrimiento. Comprende suelos someros y suelos con considerable contenido de arcilla, pero menos que el grupo D. Este grupo tiene una infiltración menor que la promedio después de saturación. Ejemplo: suelos migajones arcillosos. Infiltración básica 1-4 mm/h
- D: Suelos con alto potencial de escurrimiento. Por ejemplo, suelos pesados, con alto contenido de arcillas expandibles y suelos someros con materiales fuertemente cementados. Infiltración básica menor 1 mm/h

En cuanto a la condición de humedad del suelo, el SCS define tres condiciones:

- I: Condición seca (punto de marchitez); 0 – 12.7 mm de precipitación acumulada de los cinco días previos al evento.



- II: Humedad promedio; de 12.7 a 38.1 mm de precipitación acumulada en cinco días previos.
- III: Húmedo (capacidad de campo); más de 38.1 mm de precipitación acumulada en cinco días previos al evento.

El índice pico de escorrentía es el índice máximo de flujo que ocurre en un evento de lluvia dado. SWAT lo calcula con un método racional modificado.

El método racional es de uso común en el diseño de fosas, canales y sistemas de control de agua de tormenta. Se basa en asumir que la intensidad de lluvia inicia al tiempo $t = 0$ y continúa indefinidamente, el índice de escorrentía incrementará hasta el tiempo de concentración, cuando el área completa de la subcuenca está contribuyendo a fluir a la salida.

El tiempo de concentración se calcula sumando el tiempo de flujo superficial y el tiempo de flujo del canal. En el modelo SWAT estos cálculos se hacen al nivel de HRU. Se hacen dos modificaciones para adaptar las ecuaciones a los HRUs. Primero se reemplaza el área de la subcuenca por el área del HRU; después el término de longitud de canal utilizado en el cálculo del tiempo de concentración del flujo del canal se multiplica por la fracción del área de la subcuenca con el HRU de interés.

3.2.2. Metodología de los modelos de cambio climático.

México desarrolla escenarios climáticos regionales: el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM) en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología (INE) ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), financiado por el fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), llevaron a cabo el estudio “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”. En dicho estudio se realizó un análisis regional del periodo histórico y de las proyecciones de 15 modelos de circulación global (MCG) a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano



(2075-2099) para el caso de México, que serán utilizados en el 5º Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de cambio Climático (IPCC). (Cavazos T., et al., 2013).

Estos escenarios se encuentran a disposición del usuario en el portal de escenarios del INECC, donde se describe de manera general cómo se adaptaron los Modelos de Circulación General para obtener las proyecciones para México. Parte de ello se enunciará a continuación.

La estrategia de CMIP5 (modelos acoplados fase 5) incluye dos tipos de experimentos de modelación del clima: 1) integraciones de larga duración (escala de tiempo de siglos) y 2) integraciones a corto plazo (10-30 años, experimentos decenales), en ambos experimentos se utilizan modelos climáticos (AOGCM, por sus siglas en inglés). Para las simulaciones de largo plazo algunos de los modelos son acoplados con componentes biogeoquímicas que toman en cuenta los flujos de carbón entre la atmosfera, océano y las reservas de carbón en la biosfera terrestre, “cerrando” de este modo el ciclo de carbono en el modelo. Estos modelos son llamados modelos del Sistema Tierra (ESMs, por sus siglas en inglés), (Taylor, et al. 2012).

Para el estudio “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional” se utilizaron las integraciones de larga duración para dos periodos de tiempo: Futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). A su vez se consideró un escenario base (1961-2000) y para las proyecciones futuras se seleccionaron los escenarios RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5.

El desempeño de los modelos durante el período histórico 1961-2000 brinda elementos para establecer las ventajas o limitaciones de los nuevos MCG del CMIP5 para reproducir procesos atmosféricos de importancia para México. Esta evaluación de los MCG se aplicó en las variables: precipitación, temperatura (mínima, máxima y promedio) mediante 4 métricas estadísticas.

Las métricas aplicadas brindan elementos de evaluación de los MCG con respecto a la base de datos del CRU para el período de 1961 a 2000. En todos los casos, X representa los n datos mensuales (40 años) de las variables de los modelos e Y las mismas



variables, pero de las observaciones de la base de datos CRU. A continuación se presentan la forma de calcularlos y su significado:

- Raíz del error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=0}^N \frac{(X_i - Y_i)^2}{N}}$$

El error cuadrático medio (RMSE o root mean square error en inglés) es una forma de evaluar la diferencia entre un modelo y observaciones de la variable que se pretende calcular. El RMSE mide el promedio del cuadrado del "error" o diferencia y es un criterio para seleccionar el mejor modelo.

El RMSE es utilizado para determinar la medida en la que el modelo no se ajusta a las observaciones, un RMSE mínimo indica una diferencia mínima respecto a las observaciones, y por lo tanto es un buen modelo. Al calcular la raíz cuadrada en el RMSE se obtiene una medida de precisión.

Un error cuadrático medio de cero (0) es deseable pero no posible, ello significaría que el modelo en cuestión reproduce las observaciones con una precisión perfecta. El RMSE resalta más los errores grandes que los pequeños (como resultado de elevar al cuadrado cada término), y por lo tanto enfatiza datos disparados.

- Error absoluto medio (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |X_i - Y_i|$$

El error medio absoluto (MAE o mean absolute error en inglés) es la diferencia entre las estimaciones realizadas con los modelos y las observaciones. Es positivo siempre ya que implica el cálculo del valor absoluto, esto indica que los modelos



pueden sobreestimar o subestimar la cantidad calculada manteniendo el mismo número de MAE y brinda la sensibilidad del modelo.

- Desviación estándar (std):

$$std = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}}$$

La desviación estándar (std o standard deviation en inglés) se utiliza para conocer las variaciones tanto de las observaciones como de los modelos respecto a su media, ello a través de la diferencia que poseen los datos respecto de la media aritmética. La desviación estándar es una medida de dispersión (o cuánto tienden a alejarse los valores de su promedio) y es la raíz cuadrada de la varianza, expresada en las mismas unidades que la variable.

Por ejemplo, las siguientes tres series (0, 0, 14, 14), (0, 6, 8, 14) y (6, 6, 8, 8) poseen una media de 7. Sus desviaciones estándar son 8.08, 5.77 y 1.15 respectivamente. La tercera serie tiene una desviación mucho menor que las otras dos porque sus valores están más cerca de 7. Que los modelos posean una desviación estándar similar a las observaciones indica que reproducen adecuadamente las variaciones naturales de la atmósfera.

- Correlación (r):

$$r = \frac{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=0}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

La correlación (r) determina la semejanza que existe entre las observaciones y el modelo a evaluar. El signo de la correlación es el mismo que el de la covarianza, si la covarianza es positiva, la correlación es directa, si la covarianza es negativa, la correlación es inversa, si la covarianza es nula, no existe correlación. La correlación r es un número real entre -1 y 1, si adquiere valores cercanos a -1 la



correlación es alta e inversa, si posee valores cercanos a 1 la correlación es alta y directa y si adquiere valores cercanos a 0, la correlación es débil o inexistente.

Estas métricas estadísticas fueron la base para la posterior adaptación de los datos de los escenarios RCP para México. En cuanto a la regionalización, por la ubicación geográfica y la abrupta orografía de México, las regiones Centro/Sur y Sureste de México son afectadas principalmente por fenómenos atmosféricos tropicales durante el verano y el otoño; el Noroeste de México recibe la influencia del monzón y los ciclones tropicales del Pacífico Oriental en verano y frentes fríos en invierno, mientras que el Noreste de México se ve influenciado por los ciclones tropicales del Golfo de México y el Caribe en verano y los Nortes durante otoño e invierno. Considerando lo anterior, la evaluación del desempeño de los modelos se dividió en 4 zonas geográficas: Noroeste, Noreste, Centro/Sur y Sureste, como se muestra en la figura 18.

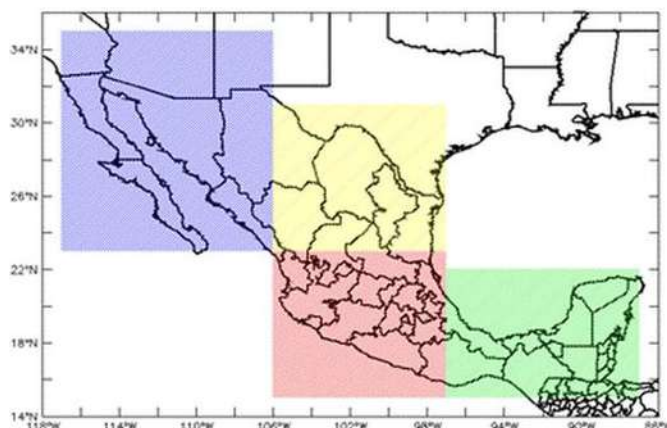


Figura 18. Regiones consideradas: Noroeste (azul), Noreste (amarillo), Sur (rojo) y Sureste (verde). Los límites de las regiones son: Noroeste (23 a 35°N; 106 a 117°W), Noreste (23 a 31°N; 97 a 106°W), Centro/Sur (15 a 23°N; 97 a 106°W) y Sureste (15 a 22°N; 87 a 97°W). (INECC, 2013).

La cuenca en estudio se encuentra en la zona Centro/Sur, en el mismo sitio se pueden observar las métricas para esta zona expresadas en un diagrama de Taylor (gráfica que permite comparar los valores de dos métricas anuales); el ciclo anual (gráficas de línea de los modelos y las bases de datos REA y CRU, que permiten estimar visualmente la dispersión estacional de los modelos); y los errores (gráficos de barras que muestran el error cuadrático medio (rms), el error absoluto (mae), correlación (r) y la desviación estándar (std) de los 15 modelos, el CRU y el REA. Facilita la comparación entre los modelos y las observaciones).



La mencionada base de datos CRU fue generada por la Unidad de Investigación Climática (CRU por sus siglas en inglés), que pertenece a la Escuela de Ciencias Ambientales en la Universidad del Anglia Oriental, Inglaterra (UEA).

Los datos de CRU utilizados provienen de la versión TS 3.1, tienen una resolución temporal mensual para el periodo de 1901-2009 y resolución espacial de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ para todo el mundo. Para el estudio de México, recortaron a la región 0° a 40°N , y de 140°W a 60°W para las variables temperatura media, mínima, máxima, precipitación. Esta base de datos se generó a partir de estaciones meteorológicas distribuidas en todo el mundo, más de 8000 para la temperatura y de 6000 para precipitación. Por ello CRU tiene datos solo sobre continente.

El método REA (Fiabilidad del Ensamble Ponderado), fue propuesto y desarrollado por Giorgi y Mearns (2001) con el objetivo de dar mayor peso a los MCG que contengan los errores y sesgos más pequeños en comparación con las variables observadas en un punto de malla dado. Este ensamble ponderado REA se calculó para las proyecciones de cambio y las simulaciones históricas de los 15 MCG empleados.

Con todo esto, INECC, en colaboración con otras instituciones, nos ofrecen la descarga de los datos de histórico REA, histórico CRU y las proyecciones de cambio climático para los escenarios RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5; para los parámetros de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación (medios mensuales).



4. MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL PERIODO HISTÓRICO.

4.1. Modelación inicial

Para iniciar la modelación de hidrología superficial con SWAT es necesario tener a mano todos los materiales que se enlistaron en el apartado 3.1.1. En el caso del periodo histórico, las precipitaciones, temperatura máxima y mínima, son las que nos proporciona CLICOM. Estos datos deben ser diarios; la precipitación utilizada fue la total diaria.

Como se había mencionado, el SWAT nos facilita la simulación habilitando las ventanas hasta que se haya cumplido con la entrada de datos necesarios. La primera ventana, después de guardar el proyecto, e indicarle la base de datos en Access que tomará, es la que se muestra en la figura 19. Para habilitar la siguiente ventana, hay que introducir la ubicación del MDE; si se quiere cortar la cuenca de acuerdo a una “máscara”, se introduce el shape de la misma, para el caso de la cuenca del río Angulo, se utilizó el shape que proporciona INEGI de la cuenca de dicho río; el punto de salida se marca y se obtiene la cuenca. SWAT proporciona otras opciones, como introducir lagos, pero para este caso se utilizó sólo la información básica.

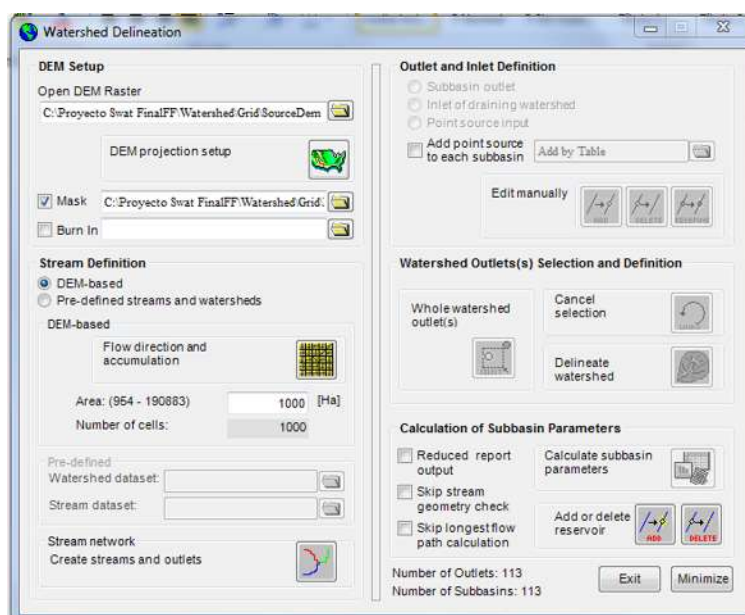


Figura 19. Ventana para delinear la cuenca en SWAT

La siguiente ventana es la análisis de HRU, en ella se deben introducir los mapas de uso de suelo (figura 11), tipo de suelo (figura 10), con sus correspondientes “tablas del



usuario” en las que se les da una clasificación a los suelos regionales de manera que SWAT pueda interpretarlas con su base de datos. Para el tipo de suelo, la base de datos fue modificada y las características de los suelos fueron introducidas en la ventana de usersoil en Access.

A continuación se muestra la tabla 5, la cual se usó para la reclasificación del uso de suelo; y la figura 20, en la que se muestra la modificación a la base de datos Access para el mapa de tipo de suelo, su tabla de usuario no tiene ninguna complicación pues son los mismos que el mapa original.

Tabla 5. Reclasificación de los usos de suelo en la cuenca del río Angulo, para su uso en SWAT.

ORIGINAL	VALUE	LANDUSE
Agricultura en hilera	1	AGRR
Bosque de encino	2	OAK
Zona urbana	3	URBN
Agua	4	WATR
Pradera permanente	5	BROM
Pastizal	6	PAST
Bosque de pino-encino	7	FRST

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	SSID	CMPPT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXC	SOL_CRK	TEXTUR
203			Vertisol			1	D	127	0	0	0
204			Feozem			1	B	127	0	0	0
205			Andosol			1	B	127	0	0	0
206			Agua			1	D	127	0	0	0
180	VT091	6	CHARLTON	CT0002		6	3	B	1651	0.5	0.5 L-FSL-GR
128	VT078	5	STOCKBRIDGE	CT0011		8	4	C	1651	0.5	0.5 L-SIL-SIL-
76	VT007	17	SACO	CT0013		3	4	D	1524	0.5	0.5 SIL-VFSL-
16	VT025	8	WINDSOR	CT0014		3	3	A	1651	0.5	0.5 LS-LS-S
85	VT015	15	WALPOLE	CT0015		4	3	C	1651	0.5	0.5 FSL-SL-G
107	VT059	4	NINIGRET	CT0018		6	3	B	1524	0.5	0.5 FSL-FSL-
62	VT002	4	GROTON	CT0046		6	4	A	1828.8000488	0.5	0.5 GR--SL-G
66	VT002	21	HERO	CT0047		1	3	B	1524	0.5	0.5 L-GR--FS
74	VT007	11	TISBURY	CT0053		4	3	B	1524	0.5	0.5 SIL-VFSL-
79	VT008	20	PAXTON	CT0061		3	3	C	1651	0.5	0.5 STV-FSL-
61	VT002	3	POOTATUCK	CT0064		13	3	B	1651	0.5	0.5 FSL-FSL-
77	VT007	19	RIPPOWAM	CT0065		3	3	C	1651	0.5	0.5 FSL-FSL-
169	VT087	11	BEACHES	DC0002		2	2	D	1524	0.5	0.5 S-COS
199	VT096	9	ROCK OUTCRO	DC0015		5	1	D	1524	0.5	0.5 UWB
179	VT091	4	URBAN LAND	DC0035		8	1	D	152.3999939	0.5	0.5 VAR
201	VTW	7	WATER	DC0038		3	1	D	25.399999619	0.5	0.5
162	VT086	17	FLUVAQUENTS	DE0202		2	1	D	25.399999619	0.5	0.5
178	VT090	11	UDIFLUVENTS	DE0209		2	1	D	25.399999619	0.5	0.5
89	VT016	6	UDIPSAMMEN	DE0211		4	1	D	25.399999619	0.5	0.5

Figura 20. Modificación de la base de datos de tipos de suelo para su lectura en SWAT.

Después de los mapas de suelos, se encuentra la pestaña para la reducción de las pendientes a cierto número de clases. En ella se eligieron los datos recomendados por el manual de SWAT. Después de esto se crean los mapas de cubierta de la cuenca con el



botón “Overlay”; lo que hace es combinar los tres mapas para crear un solo mapa de HRU's. En la figura 21 se observa el mapa de pendientes de la cuenca del río Angulo.

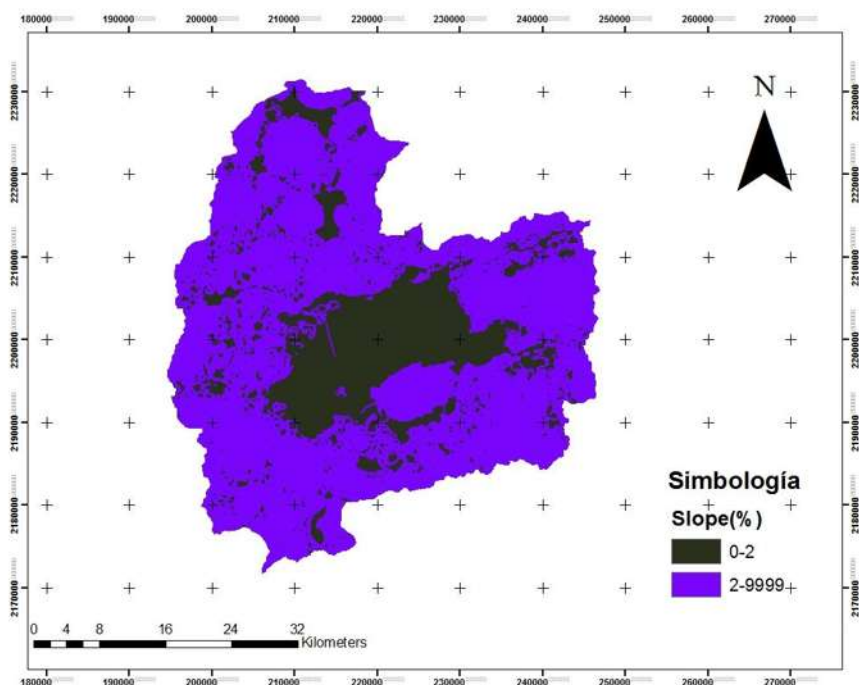


Figura 21. Mapa de pendientes para la cuenca en estudio, creado en SWAT.

La siguiente ventana a llenar, muestra la definición de los HRU, en ella se eligió que el reporte de los HRU se hiciera de acuerdo a múltiples HRU's, descartando los de menor porcentaje de cobertura al indicado. Los valores porcentuales se eligieron de acuerdo a las recomendaciones del manual tutorial de SWAT.

A continuación, el programa está listo para que sean cargados los datos de precipitación y temperaturas en la ventana de Weather Stations (figura 22). Aquí SWAT genera el clima, calculando radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa, precipitación y temperatura; en caso de que no existan las mediciones o se requiera llenar datos faltantes dentro de los registros existentes. SWAT cuenta con una base de datos para Estados Unidos, sin embargo se pueden ingresar los datos personalizados en la base de datos de Access correspondiente al proyecto (como se hizo para este trabajo).

Ya que, como se mencionó, se contaba con los datos de precipitación y temperatura, estos fueron ingresados para la definición de los datos del clima, dejando que el modelo calculara los demás parámetros.

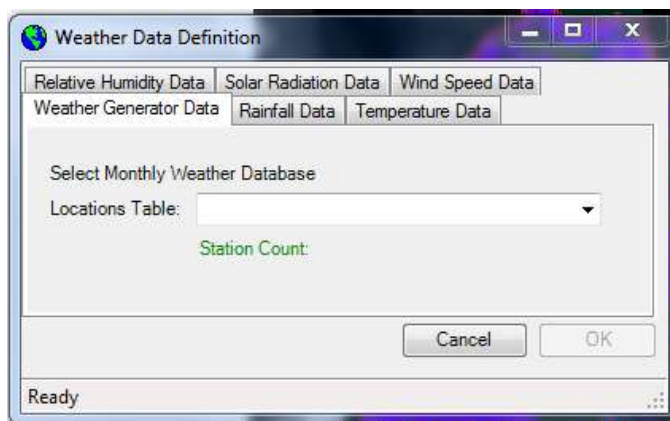


Figura 22. Ventana para la introducción de los datos climáticos en el modelo SWAT.

Las estaciones deben ingresarse en dos formas. La primera es una lista de los datos diarios en un archivo de texto, así como una lista de la clave de las estaciones con sus respectivas coordenadas (figura 23), también en archivo de texto; estas listas con las claves y coordenadas, son las leídas por el programa en las pestañas de Rainfall Data y Temperature Data. Los datos vacíos de las estaciones se indican con el valor -99.0, SWAT llenó estos vacíos.

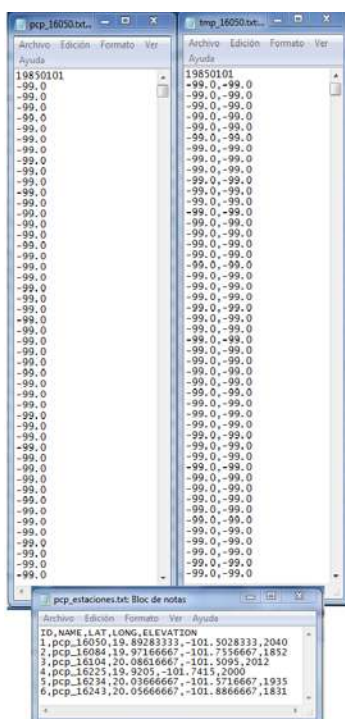


Figura 23. Listas de una de las estaciones climatológicas, en archivo de texto. A la derecha se muestra la lista de precipitación; a la izquierda los datos de temperatura máxima y mínima, respectivamente; y en la parte inferior la lista de estaciones de precipitación, ésta es la que se ingresa en la pestaña rainfall data.



La otra forma que se requiere es la que se carga en la pestaña del generador de clima “Weather Generator Data”, con los datos de las estaciones de la zona en estudio. Esta tabla se encuentra en la base de datos Access correspondiente al proyecto; la hoja llamada WGEN_user (figura 24) se modificó de acuerdo a una serie de valores estadísticos de cada una de las estaciones climatológicas utilizadas. Los parámetros necesarios se pueden observar en la lista de estaciones para Estados Unidos, y sus descripciones así como las fórmulas para calcularlos, en el manual de datos de entrada y salida para SWAT (SWAT-IO Documentation).

STATION	WLATITUDE	WLONGITUDE	WELEV	RAIN_YRS	TMPMX1	TMPMX2	TMPMX3	TMPMX4	TMPMX5	TMPMX6	TMPMX7
16050	19.89283	-101.5028	2040	0	22.59481	24.15536	27.2439	28.85283	29.16872	26.16471	24.22314
16084	19.97167	-101.7557	1852	0	22.86034	24.15755	27.64655	29.23197	29.9022	28.19113	25.61085
16225	19.9205	-101.7415	2000	0	23.4453	25.43603	27.48415	29.45696	30.22697	27.97362	25.59691
16234	20.03667	-101.5717	1935	0	22.81452	24.66406	26.36189	28.97292	29.23689	25.75208	23.16129
16243	20.05667	-101.8867	1831	0	24.16569	25.20455	26.58358	29.19879	29.81848	28.06667	25.94868
16104	20.08617	-101.5095	2012	0	24.66604	26.40109	29.09671	30.95343	31.58844	29.42287	26.98737

Figura 24. Tabla WGEN_user para el generador de clima en SWAT.

En la tabla 6 se muestran los parámetros estadísticos de precipitación, temperatura máxima y mínima para unas de las estaciones climatológicas que fueron usadas en la modelación.

Tabla 6. Parámetros estadísticos requeridos para el generador de clima. Estación climatológica 16050.

16050	TMPMX	TMPMN	TMPSTDMX	TMPSTD MN	PCPMM	PCPSTD	PCPSKW	PR_W1 (W/D)	PR_W2 (W/W)	PCPD
Enero	22.595	7.996	2.312	1.967	18.113	1.844	4.188	0.046	0.413	2.370
Febrero	24.155	9.123	2.485	1.873	8.374	1.130	4.439	0.039	0.258	1.435
Marzo	27.244	11.604	2.602	1.886	6.500	0.865	4.794	0.029	0.241	1.174
Abril	28.853	14.716	2.535	1.430	16.478	2.027	4.448	0.068	0.279	2.652
Mayo	29.169	16.805	2.366	1.482	47.193	3.835	3.294	0.137	0.434	6.109
Junio	26.165	17.064	3.006	1.245	155.635	8.612	2.329	0.360	0.614	15.043
Julio	24.223	15.911	1.824	0.993	201.841	9.194	2.058	0.560	0.661	20.087
Agosto	24.303	15.698	1.702	0.936	179.448	8.164	1.957	0.490	0.665	19.196
Septiembre	24.155	15.169	1.841	1.169	158.574	8.371	2.206	0.326	0.622	15.065
Octubre	24.236	13.193	1.922	1.916	61.200	4.488	3.024	0.174	0.455	8.130
Noviembre	24.047	10.594	1.803	2.147	17.176	2.149	4.688	0.060	0.273	2.391
Diciembre	22.725	8.782	1.911	1.925	12.476	1.548	4.747	0.046	0.241	1.891

En la tabla anterior: TMPMX es el promedio mensual de la temperatura máxima diaria (°C); TMPMN es el promedio mensual de la temperatura mínima diaria (°C); TMPSTDMX es la desviación estándar mensual de la temperatura máxima diaria; TMPSTD MN es la



desviación estándar mensual de la temperatura mínima diaria; PCPMM es el promedio mensual de la precipitación diaria (mm); PCPSTD es la desviación estándar mensual de la precipitación diaria; PCPSKW es el coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria; PR_W1 es la probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco (días); PR_W2 es la probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo (días); y PCPD es el promedio mensual del número de días de lluvia.

Posteriormente a la generación del clima y sus respectivas tablas, lo que se hizo fue elegir el método de cálculo de evapotranspiración potencial y el método de lluvia-escurrimiento, en la ventana de Edit Swat Input, Watershed Data, General Data (figura 25). Para el caso de este trabajo, se eligió el método de Hargreaves para la evapotranspiración ya que no necesita estadísticos de humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento; así el error se reduce pues estos datos no se toman de los calculados por SWAT automáticamente. En cuanto al método de lluvia-escurrimiento, el elegido fue el de Número de Curva (CN) pues es lo más parecido al número de escurrimiento usado en México comúnmente.

Figura 25. Ventana de edición de parámetros de la cuenca en SWAT.

Al correr el modelo, se eligió que los resultados fueran expresados mensualmente; las fechas de inicio y final se eligen automáticamente de acuerdo a las listas de precipitación



diaria en archivo de texto, para el presente trabajo se hicieron 26 años de modelación (figura 26). De esta manera los escurrimientos, expresados en m^3/s al mes, pudieron ser comparados con las estaciones hidrométricas para la calibración y validación del modelo.

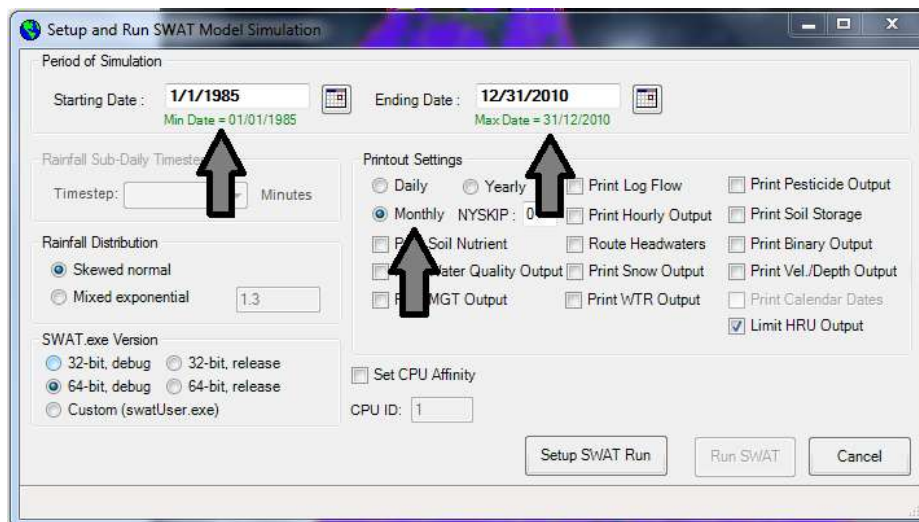


Figura 26. Ventana para correr el modelo SWAT

4.2. Calibración y validación del modelo.

Al exportar los datos, después de correr el modelo, SWAT crea una base de datos llamada SWATOutput.mdb (figura 27) en la que se presenta, además de otros parámetros, los valores de escurrimiento medio mensual por cada año de simulación y por cada subcuenca creada (para la cuenca en estudio SWAT creó 113 subcuencas).

SUB	YEAR	MON	AREAkm2	FLOW_Incr	FLOW_OUT	EVAPcms	TLOSScms	SED_In tons	SED_OUT ton	SEDCONcm	ORGN
1	1985	1	1909	2.575E-08	0	2.575E-08	0	5.736E-08	0	0	0.0
2	1985	1	11.44	1.303E-07	0	1.303E-07	0	3.051E-08	0	0	0
3	1985	1	17.05	1.953E-07	0	1.953E-07	0	9.139E-08	0	0	0.1
4	1985	1	181.5	8.082E-08	0	8.082E-08	0	2.89E-08	0	0	0.1
5	1985	1	1895	8.377E-08	0	8.377E-08	0	8.867E-08	0	0	0.1
6	1985	1	1706	2.241E-07	0	2.241E-07	0	3.06E-08	0	0	0.1
7	1985	1	16.21	4.017E-07	0	4.017E-07	0	6.196E-08	0	0	0.1
8	1985	1	156.9	2.528E-07	0	2.528E-07	0	3.023E-08	0	0	0.1
9	1985	1	1670	7.193E-08	0	7.193E-08	0	9.202E-08	0	0	0.0
10	1985	1	15.76	1.816E-07	0	1.816E-07	0	6.173E-08	0	0	0.1
11	1985	1	19.61	0.000001158	0	0.000001158	0	3.067E-08	0	0	0.1
12	1985	1	1651	5.773E-07	0	5.773E-07	0	6.187E-08	0	0	0.1
13	1985	1	11.56	2.646E-07	0	2.646E-07	0	6.186E-08	0	0	0.1
14	1985	1	1615	1.351E-07	0	1.351E-07	0	9.121E-08	0	0	0
15	1985	1	49.73	6.758E-10	0	6.758E-10	0	2.586E-08	0	0	0.0
16	1985	1	0.24	4.433E-09	0	4.433E-09	0	5.859E-08	0	0	7
17	1985	1	21.76	5.177E-07	0	5.177E-07	0	9.154E-08	0	0	0.1
18	1985	1	86.8	0.000000143	0	0.000000143	0	5.864E-08	0	0	0.1
19	1985	1	16.48	4.226E-07	0	4.226E-07	0	3.084E-08	0	0	0.1
20	1985	1	27.9	6.651E-07	0	6.651E-07	0	0.000000121	0	0	0.1
21	1985	1	17.37	0.000001905	0	0.000001905	0	3.094E-08	0	0	0.1
22	1985	1	30.95	1.101E-08	0	1.101E-08	0	5.827E-08	0	0	0.1
23	1985	1	63.61	0.000004707	0	0.000004707	0	1.195E-07	0	0	0.1
24	1985	1	59.01	7.655E-07	0	7.655E-07	0	9.095E-08	0	0	0.1

Figura 27. Base de datos en Access creada por SWAT para la lectura de los resultados. La columna marcada es la que corresponde a los escurrimientos.



Pero estos valores no pueden ser tomados como reales; para acercarse más a la realidad y que las posteriores simulaciones con cambio climático puedan ser aún mejores prediciendo los eventos futuros, se necesita llevar a cabo una calibración del modelo. Después de calibrar, y para tener cierta seguridad, también se validó el modelo.

La calibración y validación se realizaron por medio de 8 parámetros estadísticos para evaluar la relación entre el caudal medido y predicho, los cuales fueron sesgo (BIAS), coeficiente de correlación (R^2), el índice de eficiencia de Nash- Sutcliffe (E), raíz error cuadrático medio (RMSE), RMSE - observaciones estándar relación de desviación (RSR), porcentaje de restricción (PBIAS) y criterio de Schultz (D).

El valor R^2 indica la consistencia con que los valores medidos, frente a los valores predichos, siguen la mejor línea de ajuste. Si los valores de R^2 son menos de 0 o muy cerca de cero, la correlación de los valores es prácticamente nula; por lo que la correlación del modelo será pobre. Si los valores son cercanos a uno, entonces la predicción del modelo es perfecta.

E es un medio para medir el ajuste entre el valor estimado y el valor medido. El cálculo de E, esencialmente, es la suma de las desviaciones de las observaciones para una regresión lineal cuya pendiente es igual a 1. Si el valor medido es el mismo que el estimado, E es igual a 1. Si E está entre 0-1, indica desviaciones entre el valor medido y el estimado. Si es negativo, las estimaciones son muy pobres, y el valor medio de los valores observados es el mejor estimador que el estimado por el modelo. E ha sido ampliamente utilizado para evaluar el rendimiento de los modelos hidrológicos (B. Parajul, 2009). La ecuación para determinar este valor, es la siguiente:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}$$

Dónde O_i es el valor observado, P_i es el valor modelado y O_m es la media de los valores observados.

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados. El 0 corresponde a un ajuste perfecto mientras que valores más grandes indican un menor ajuste. Se determina con la fórmula:



$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - Q_{oi})^2}{n}}$$

Dónde RMSE= raíz del error medio cuadrado, Q_{pi} = valor modelado para el evento i , Q_{oi} = valor observado para el evento i y n = es el número de eventos.

RSR se estima como la relación de la RMSE y desviación estándar de los datos medidos; varía desde el valor óptimo de 0, que indica cero RMSE o variación residual y por lo tanto perfecto modelo de simulación, a un valor positivo grande. Cuanto más bajo RSR, menor el RMSE, y mejor el modelo de rendimiento de simulación. Su ecuación se presenta a continuación:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}}$$

Dónde RSR = RMSE- desviación estándar observada, RMSE = raíz del error cuadrado medio y $STDEV_{obs}$ = desviación estándar observada.

PBIAS mide la tendencia media de la predicción del modelo a presentar valores grandes o valores pequeños, con la correspondencia de sus valores observados. El valor óptimo de PBIAS es 0; los valores de baja magnitud indican simulación de modelo exacto. Los valores positivos indican la subestimación del sesgo del modelo y negativos indican la sobreestimación del sesgo de modelo.

El criterio de Schultz representa la desviación de los caudales simulados respecto de los observados. Se calcula como:

$$D = 200 \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_i| Q_i}{n(Q_{max})^2}$$

Dónde $Q_{sim,i}$ = gasto simulado en el evento i , Q_i = gasto observado en el evento i , n = es el número de eventos y Q_{max} = descarga máxima observada en el periodo en estudio.

De acuerdo a todos estos criterios, se evaluó dos estaciones hidrométricas. Estas estaciones, como se mencionó en el apartado 3.1.3 fueron primero restituidas a su



régimen natural. En la figura 28 se muestra el mapa de subcuencas con las estaciones hidrométricas que se usaron.

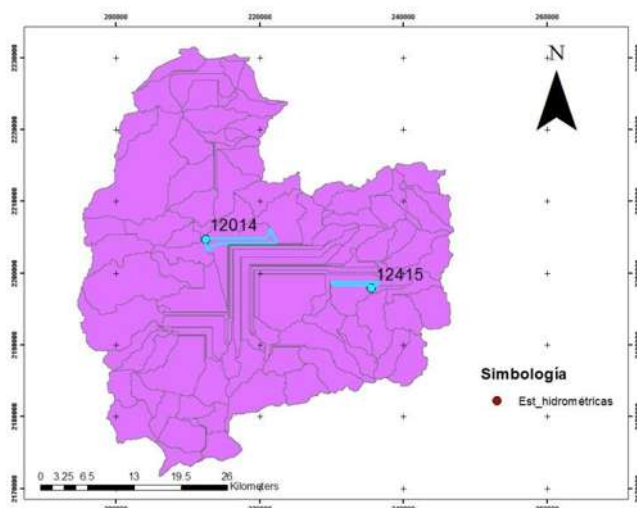


Figura 28. Mapa de subcuencas y estaciones hidrométricas. La subcuenca 43 corresponde a la estación 12014 y la subcuenca 66 a la estación 12415.

Para modificar los escurrimientos de la modelación se requirió conocer los tipos de suelo predominantes en las subcuencas analizadas. En la subcuenca 43 predominan el vertisol y el feozem, en la subcuenca 66 predomina el feozem.

Después de identificar los suelos, se procedió a modificar la base de datos de tipos de suelos en SWAT (figura 29) en la ventana “Edit SWAT Input”, la cual es de fácil acceso en la interfaz del programa precisamente para agilizar la calibración del modelo.

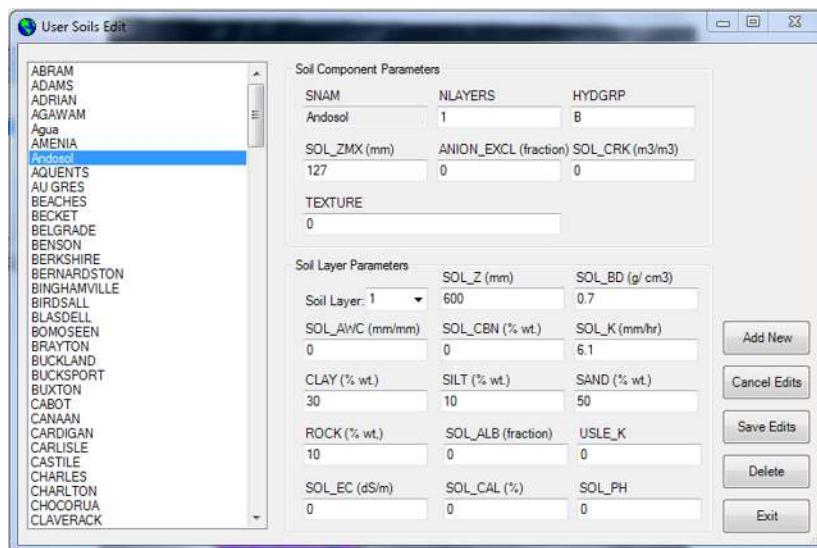


Figura 29. Ventana de edición de los suelos en SWAT.



Los parámetros modificados fueron la conductividad hidráulica saturada (sol_k); la profundidad de la capa de suelo (sol_z); y la capacidad de agua disponible de la capa de suelo (sol_awc). Estos fueron cambiados de manera iterativa hasta que los resultados de la corrida del modelo fueron satisfactorios.

La calibración y validación se realizaron en ambas estaciones, dividiendo la cantidad de años de datos por la mitad. Se calibró con un lapso y se validó con el tiempo restante. En las figuras 30 y 31 se muestran las gráficas de las calibraciones y validaciones.

Se puede observar que las tendencias se siguen, aunque los gastos no son iguales. Se aceptaron como buenas ya que la restitución a régimen natural provoca una disparidad en los datos.

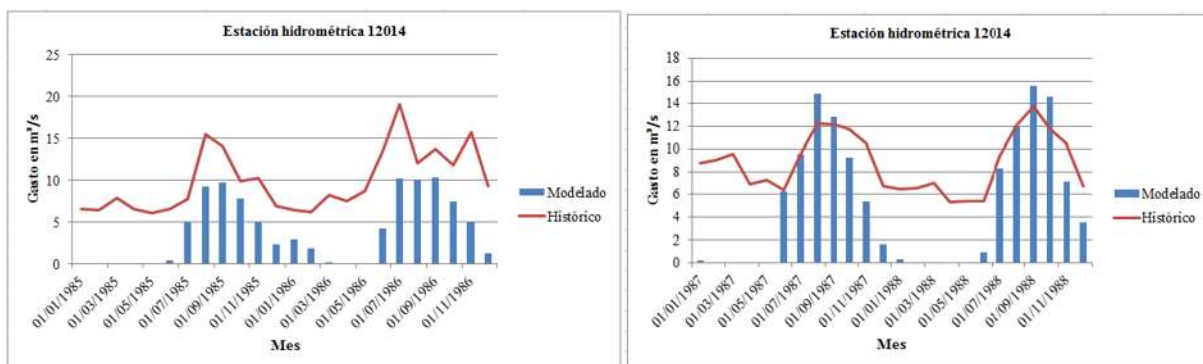


Figura 30. Gráficas de calibración y validación de la estación hidrométrica 12014 restituida a régimen natural. A la izquierda se muestra la calibración y a la derecha la validación.

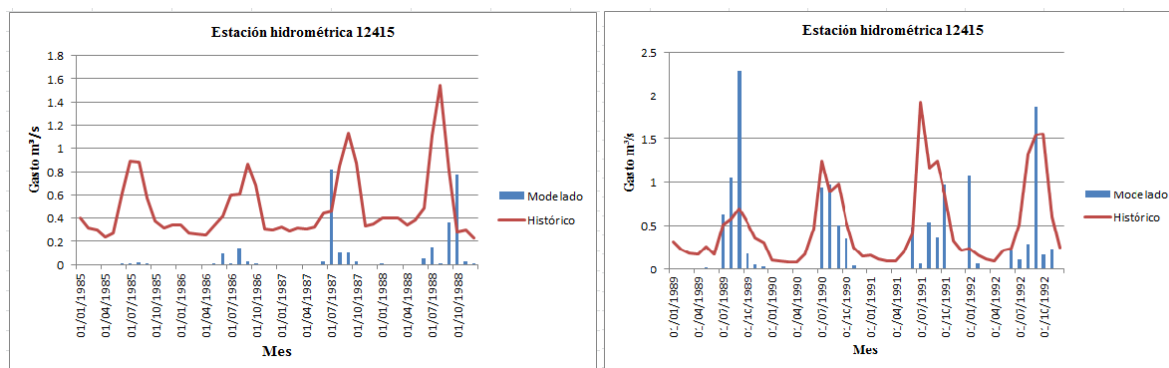


Figura 31. Gráficas de calibración y validación de la estación 12415, restituida a régimen natural. En la izquierda la calibración y en la derecha la validación.



En las tablas 7 y 8 se presentan los resultados de los parámetros estadísticos en cada estación, los datos totales se refieren la evaluación de todos los años de información de la estación, evaluados por los estadísticos. La tabla 8 muestra los criterios de evaluación de dichos parámetros.

Tabla 7. Parámetros estadísticos de la estación 12014.

Estación 12014, calibración									
Periodo	Media Modelado (m³/s)	Media Histórico (m³/s)	Bias	RMSE	R²	E	D	RSR	PBIAS
Total	4.478	9.33	-4.852	5.853	0.739	-2.43	26.388	1.833	-52.008
1985-1986	3.856	9.853	-5.996	6.43	0.81	-2.142	33.408	1.735	-60.859
Estación 12014, validación									
Total	4.478	9.33	-4.852	5.853	0.739	-2.43	26.388	1.833	-52.008
1987-1988	5.099	8.807	-3.709	5.214	0.849	-3.331	37.303	2.037	-42.107

Tabla 8. Parámetros estadísticos de la estación 12415.

Estación 12415, calibración									
Periodo	Media Modelado (m³/s)	Media Histórico (m³/s)	Bias	RMSE	R²	E	D	RSR	PBIAS
Total	0.169	0.483	-0.314	0.529	0.379	-0.934	16.001	1.383	-64.919
1985-1986	0.057	0.488	-0.431	0.533	0.079	-2.61	24.972	1.88	-88.28
Estación 12415, validación									
Total	0.169	0.483	-0.314	0.529	0.379	-0.934	16.001	1.383	-64.919
1987-1988	0.282	0.478	-0.196	0.525	0.479	-0.307	15.883	1.131	-41.065

Tabla 9. Consideraciones para la evaluación de los estadísticos.

	R²	E	RSR	PBIAS	Valores referenciales del criterio de Shultz	
Excelente	<0.9	<0.9	0-0.25	<10	D	Ajuste
Muy bien	0.75-0.89	0.75-0.89	0.26-0.5	11--15	0 a 3	Muy bueno
Bien	0.5-0.74	0.5-0.74	0.51-0.6	16--25	3 a 10	Bueno
Decente	0.25-0.49	0.25-0.49	0.61-0.7	26--30	10 a 18	Suficiente
Pobre	0.00-0.24	0.00-0.24	0.71-0.89	31--35	> 18	Insuficiente
Insatisfactorio	<0	<0	>0.9	>=36	(Molmar, 2011).	



De acuerdo a la tabla 9 se puede ver que los criterios que cumplieron la calibración y validación en la estación 12014 fueron el coeficiente de correlación (R^2) con evaluación buena y muy buena y el porcentaje de restricción (PBIAS) de manera excelente; en la estación 12415 se cumplió en la calibración total de manera decente con el R^2 , fue suficiente el criterio de Shultz y excelente el PBIAS en calibración y validación.



5. SIMULACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO ANGULO CON CAMBIO CLIMÁTICO.

Para ubicar las estaciones necesarias para la exportación de los datos de cambio climático (figura 13), se hizo uso de la interfaz en internet de los escenarios de cambio climático proyectados para México (figura 32), seleccionando en el mapa el recuadro aproximado en el que se encuentra la cuenca del río Angulo. Esto nos dio como resultado una lista de varias estaciones ubicadas en la zona. Para descartar cuáles de ellas eran las indicadas, se graficaron en un mapa en ArcGis junto con la cuenca; aquí se tuvo que tener cuidado pues algunas estaciones se encontraban en una zona diferente así que se tenían que cambiar de proyección para que se ubicaran en el lugar correcto. Se seleccionaron 6 estaciones alrededor de la cuenca.



Figura 32. Pantalla para la descarga de escenarios de cambio climático en la página de internet del INECC. El rectángulo señala las ventanas donde se seleccionan los escenarios RCP a descargar, así como el período; el círculo muestra las variables que se pueden descargar (medios mensuales), y; el recuadro marca las ventanas de ingreso para las coordenadas buscadas.

Los escenarios seleccionados fueron el RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 ya que los municipios más grandes dentro de la cuenca del río Angulo, además de dedicarse a la agricultura, cuentan con actividad industrial. Los municipios de Jiménez y Coeneo, aunque no muy poblados, cuentan con molinos de trigo y fábricas de materiales de construcción, como tabique, adoquín, entre otros; el municipio con mayor importancia



dentro de la cuenca, de acuerdo a la actividad y población, es Zacapu, éste cuenta con industrias que manejan polipropileno, otras dedicadas a la envoltura de cigarros, de hules y plásticos, también fábricas de muebles, una envasadora de leche, una procesadora de derivados de alcohol, aserraderos y un parque industrial en proceso de ampliación.

Una vez importados los datos de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima para las estaciones seleccionadas, se procedió a darles el acomodo necesario para la transformación de los valores. Se decidió trasladar los datos a las coordenadas de las estaciones climatológicas, ya ubicadas en el análisis del escurrimiento superficial (figura 12), por medio del inverso de la distancia al cuadrado. De este modo, los datos de precipitación y temperatura son afectados de acuerdo a la distancia a la que se encuentran las estaciones, a mayor distancia, menos peso tienen los valores de dicha estación sobre el lugar al que se pretende trasladar el dato.

Los valores con cambio climático de las estaciones climatológicas 16084, 16243 y 16225 fueron creados a partir de las estaciones 1301, 1302, 1401 y 1403 de cambio climático; los valores en las estaciones climatológicas 16050, 16104 y 16234 se obtuvieron con las estaciones 1401, 1403, 1402 y 1404 de cambio climático. Esto para cada uno de los escenarios de cambio climático, generándose así 18 estaciones nuevas.

Las estaciones obtenidas se sometieron al acomodo y cálculo de los estadísticos correspondientes, para poder proceder a modelar en SWAT.

Debido a que los datos de la proyección de cambio climático no son tan detallados, se usaron los medios mensuales como datos diarios, el efecto que tuvo esto en los estadísticos se puede observar en la tabla 10.

El proceso de modelación en SWAT es prácticamente el mismo que en la hidrología superficial histórica; como se mencionó antes el único cambio se presenta en los datos de precipitación y temperaturas. La base de datos, en la pestaña del generador de clima (WGEN_user), debe ser modificada de acuerdo a los nuevos datos, así como el listado de las estaciones en archivo de texto (.txt). En lo que respecta a los datos de tipo de suelo, con los que se calibró el modelo, de inicio se dejan las variables de la primera modelación



y posterior a la obtención de los resultados de escurrimiento, se modifica la base de datos cambiando a los valores con los que se obtuvo la calibración.

Tabla 10. Parámetros estadísticos para el generador de clima en SWAT en una de las estaciones de cambio climático, escenario 4.5.

16050_4.5	TMPMX	TMPMN	TMPSTDMX	TMPSTDMN	PCPMM	PCPSTD	PCPSKW	PR_W1 (W/D)	PR_W2 (W/W)	PCPD
Enero	22.420	6.734	7.2229E-15	3.0336E-15	1.546	0.119	2.927	0.055	0.429	2.800
Febrero	24.440	7.979	7.9594E-15	3.1476E-15	1.051	0.128	3.859	0.045	0.225	1.600
Marzo	27.626	9.555	1.3001E-14	2.8892E-15	0.484	0.059	4.499	0.030	0.233	1.200
Abril	30.376	11.836	1.2575E-14	3.6134E-15	1.835	0.165	3.156	0.075	0.246	2.760
Mayo	30.672	13.552	1.3868E-14	6.5006E-15	7.196	0.426	1.774	0.144	0.434	6.360
Junio	28.117	14.889	1.0118E-14	5.2756E-15	85.545	2.666	-0.034	0.373	0.616	15.320
Julio	25.991	14.380	1.2568E-14	6.2839E-15	121.918	2.860	-0.714	0.581	0.653	20.200
Agosto	26.282	14.925	1.0979E-14	6.645E-15	117.559	2.952	-0.550	0.493	0.656	19.080
Septiembre	25.497	13.759	6.6487E-15	5.3479E-15	79.273	2.525	-0.009	0.316	0.630	15.040
Octubre	24.981	12.748	1.2857E-14	6.4284E-15	16.425	0.881	1.284	0.174	0.418	7.760
Noviembre	23.687	9.944	7.9496E-15	2.8185E-15	2.209	0.213	3.875	0.058	0.295	2.440
Diciembre	22.494	7.618	7.8007E-15	2.7086E-15	1.428	0.149	3.792	0.043	0.277	1.880

El periodo de modelación fue del 1 de enero de 2015 al 31 de diciembre del 2039, siendo así que se evaluó el efecto de cambio climático a corto plazo en la cuenca del río Angulo.



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

6.1. Usos del agua en la cuenca del río Angulo.

Las grandes demandas del uso del agua superficial en la cuenca del río Angulo están en el uso urbano, y el uso por el distrito de riego.

La población más grande se encuentra en el municipio de Zacapu; por lo tanto la demanda urbana se calculó para esta zona. Considerando que es la cabecera municipal, la dotación fue de 205 litros/habitante/día. La proyección de la población se hizo en base a los censos del INEGI; en la tabla 11 se presenta la población y la demanda proyectada del año 2015 al 2039.

Tabla 11. Proyección de demanda urbana en Zacapu.

Año	Población	Qm (m³/s)	Año	Población	Qm (m³/s)
2015	76381	0.181	2028	83294.92	0.198
2016	76912.84	0.182	2029	83826.76	0.199
2017	77444.68	0.184	2030	84358.6	0.200
2018	77976.52	0.185	2031	84890.44	0.201
2019	78508.36	0.186	2032	85422.28	0.203
2020	79040.2	0.188	2033	85954.12	0.204
2021	79572.04	0.189	2034	86485.96	0.205
2022	80103.88	0.190	2035	87017.8	0.206
2023	80635.72	0.191	2036	87549.64	0.208
2024	81167.56	0.193	2037	88081.48	0.209
2025	81699.4	0.194	2038	88613.32	0.210
2026	82231.24	0.195	2039	89145.16	0.212
2027	82763.08	0.196			

En lo que respecta al uso en el riego de zonas agrícolas, en la cuenca del río Angulo podemos encontrar el distrito de riego 087 “Rosario-Mezquite”, cuya área de influencia se encuentra en los municipios de Degollado, Ayotlán, La Barca y Atotonilco, en el Estado de Jalisco; Yurécuaro, Tanhuato, Vista Hermosa, Angamacutiro, Puruándiro, Numarán, La Piedad, Penjamillo, Sixto Verduzco, Huaniqueo, Coeneo, Villa Jiménez y Zacapu, pertenecientes a Michoacán; Pénjamo y Abasolo en Guanajuato. En la figura 33 se observa la ubicación de este distrito.

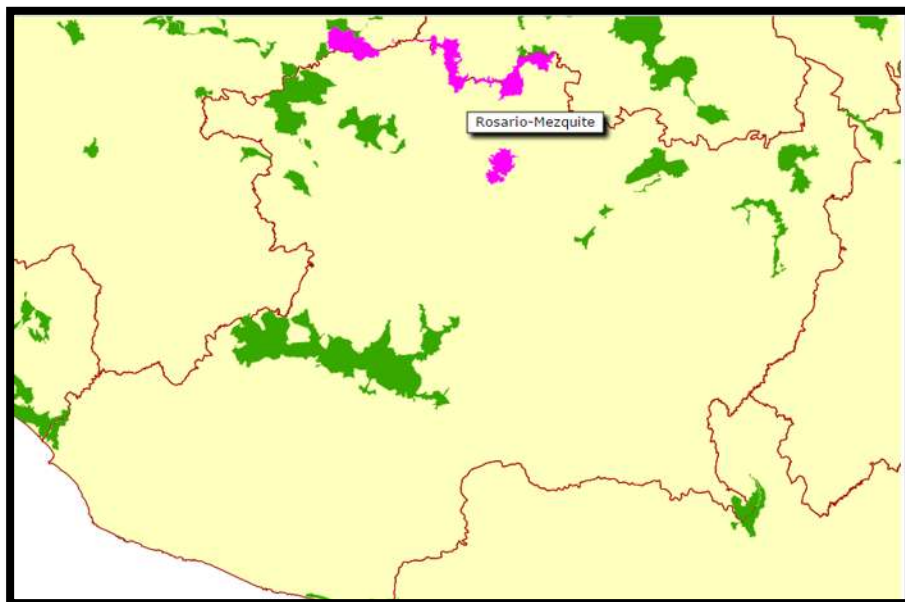


Figura 33. Macro localización del sistema de riego Rosario-Mezquite. (CONAGUA, 2013).

El distrito tiene una superficie de riego de 63,217.45 hectáreas, distribuidas entre 16,202 usuarios, de las cuáles, 38,582.5 hectáreas son regadas por aguas superficiales. El abastecimiento de agua se hace mediante tres sistemas hidráulicos independientes: Zacapu, rosario–mezquite y Pastor Ortiz. El sistema Zacapu abarca el módulo VII, se encuentra en la parte alta de la cuenca del río Angulo, donde el riego es principalmente por subirrigación alimentado por los manantiales; cuenta con una parte de riego por gravedad alimentada por las presas Copándaro y Aristeo Mercado. (CONAGUA, 2013).

El sistema rosario-mezquite es el más grande, abarca los módulos I, II, III, IV, y V y se abastece principalmente de la presa Melchor Ocampo, complementándose con la presa Gonzalo que se utiliza como regulador para el módulo de Vista Hermosa. La conducción y la distribución principal entre los módulos es el cauce del río Angulo y del río Lerma que en tiempos de lluvia se utiliza también como dren; la longitud desde el Rosario hasta el Mezquite es de 110 km. (CONAGUA, 2013). En la figura 34 se muestra la micro localización del distrito, se puede observar los municipios que se encuentran en la cuenca del río Angulo.

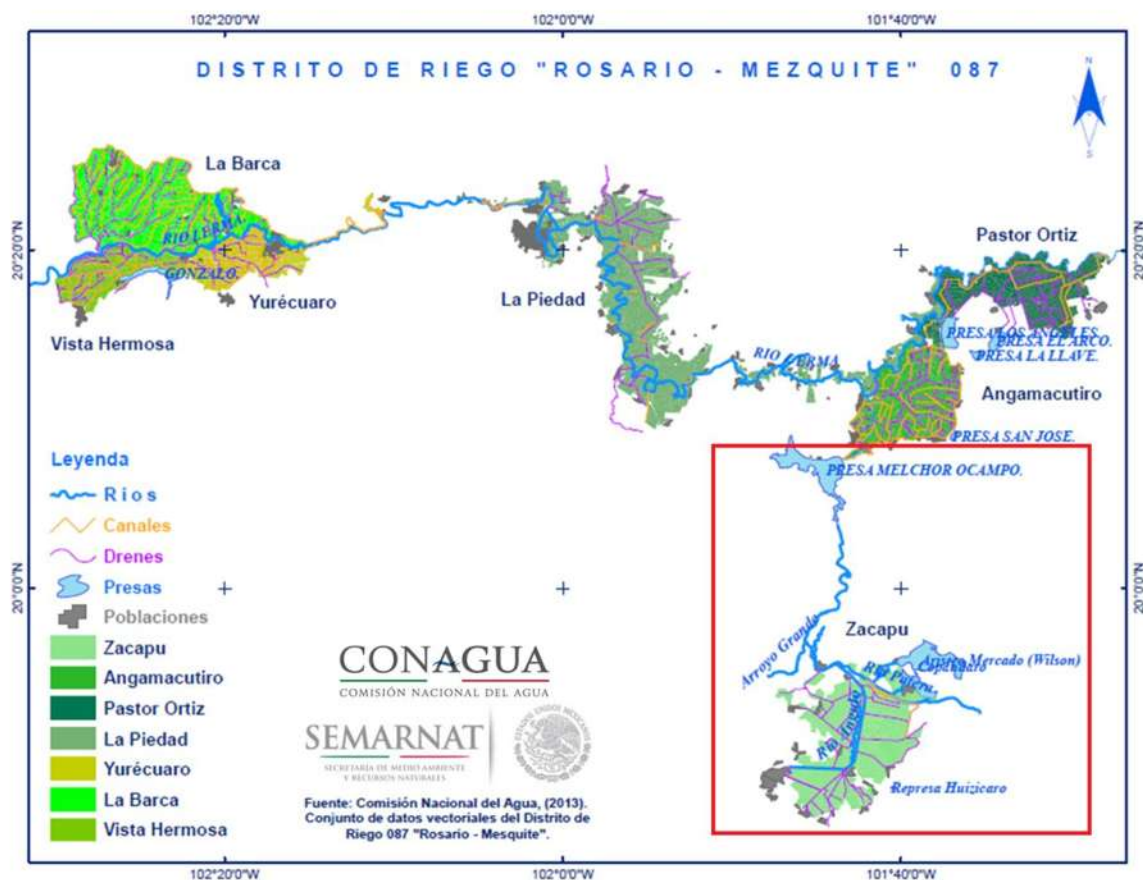


Figura 34. Micro localización del distrito de riego 087. (CONAGUA, 2013). El recuadro rojo representa la zona dentro de la cuenca del río Angulo.

La demanda de agua superficial se centra en la presa de Copándaro, en Zacapu y la presa Melchor Ocampo en Angamacutiro. La tendencia de los gastos anuales de demanda en cada uno de estos sectores es de disminución, sin embargo para este proyecto se mantuvo constante después del año 2012. En la tabla 12 se muestra la cantidad de agua demandada de acuerdo a los datos de CONAGUA.

Tabla 12. Demanda de agua superficial por sector, en el distrito de riego 087. CONAGUA.

Sector	Demanda de agua superficial en el distrito de riego 087		
Zacapu	4000.4	Miles de m ³	Año 2012
Melchor Ocampo	104520		
Total	108520.4		

6.2. Escurrimiento en la cuenca del río Angulo.

Parte del objetivo de este trabajo es presentar los caudales históricos modelados de la cuenca del río Angulo, pero sobre todo los escurrimientos afectados por el cambio



climático, en los diversos escenarios RCP analizados. A continuación se presentan los resultados obtenidos, en una de las subcuencas en las que se encuentra la estación hidrométrica 12014 usada para calibración y validación, así como en la subcuenca 1, que representa la salida de la cuenca.

Tabla 13. Esgurrimientos medios anuales en la cuenca del río Angulo, subcuenca 43, correspondiente a la estación hidrométrica 12014.

Gasto medio en m ³ /s				
Año	Escenario 4.5	Escenario 6.0	Escenario 8.5	Histórico
1	3.656	2.718	3.422	3.286
2	2.725	3.136	2.713	4.426
3	2.794	3.531	3.360	4.995
4	2.589	2.476	3.525	5.202
5	2.841	3.679	3.348	8.084
6	3.301	3.109	3.259	6.572
7	2.477	2.862	2.805	7.389
8	3.256	2.693	2.408	10.090
9	3.528	2.160	3.215	8.250
10	3.433	2.875	2.829	4.453
11	3.020	3.640	12.680	4.969
12	2.567	3.105	4.621	3.905
13	2.938	2.953	2.967	5.144
14	3.074	3.176	3.267	10.776
15	3.122	3.777	3.161	5.157
16	2.927	3.061	3.169	4.654
17	2.966	2.664	3.197	8.916
18	3.442	3.536	3.211	7.712
19	3.017	3.197	3.415	9.664
20	3.135	2.435	2.752	12.624
21	3.119	3.261	3.542	6.435
22	2.878	2.806	3.188	4.041
23	2.930	3.262	3.515	7.400
24	2.810	3.291	3.122	7.816
25	3.034	3.032	2.940	3.765
26				3.030
Promedio	3.023	3.057	3.585	6.491

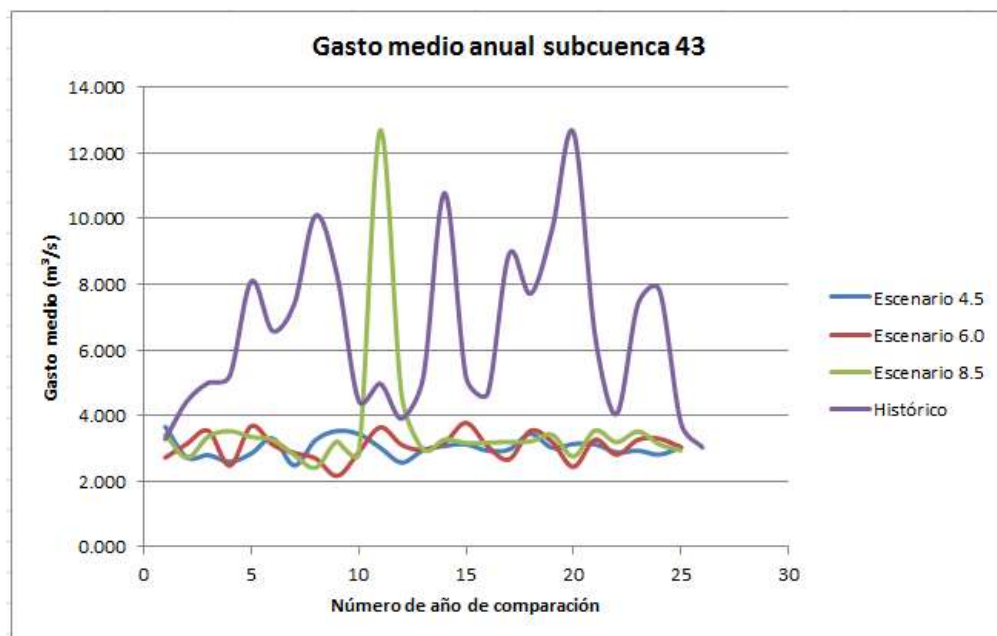


Figura 35. Gráfica del gasto medio anual en la cuenca del río Angulo, subcuenca 43.

Tabla 14. Gasto medio mensual en la subcuenca 43 del río Angulo.

Gasto en m³/s				
Mes	Escenario 4.5	Escenario 6.0	Escenario 8.5	Histórico
Enero	0.200	0.220	0.509	1.231
Febrero	0.044	0.049	0.295	0.587
Marzo	0.001	0.003	0.194	0.214
Abril	0.000	0.000	0.092	0.137
Mayo	0.000	0.000	0.125	0.337
Junio	0.100	0.053	0.391	4.075
Julio	3.085	2.824	3.733	10.767
Agosto	7.859	7.946	8.984	15.834
Septiembre	9.953	10.125	11.380	22.569
Octubre	8.697	8.813	9.657	12.291
Noviembre	4.953	5.095	5.699	6.779
Diciembre	1.385	1.561	1.965	3.069
Promedio	3.023	3.057	3.585	6.491

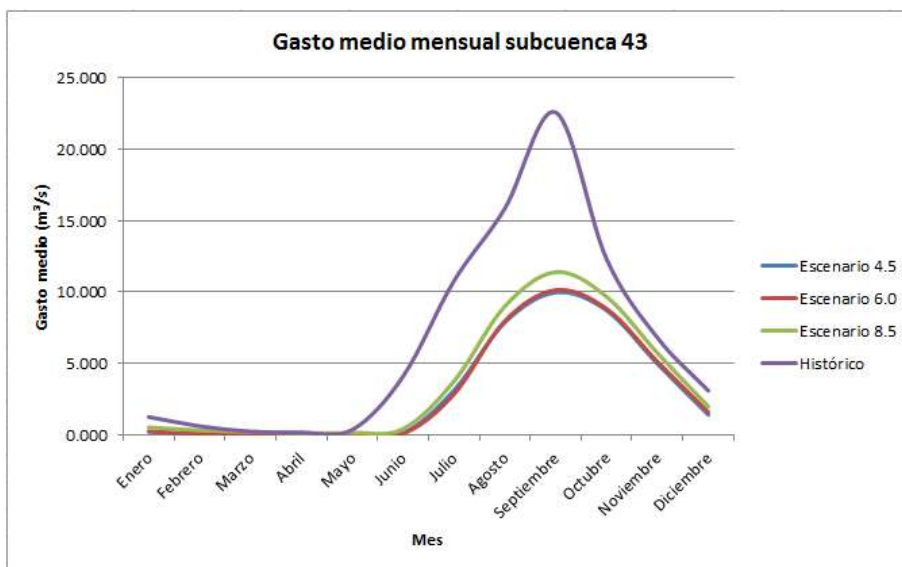


Figura 36. Gráfica de escurrimiento medio mensual, subcuenca 43.

Tabla 15. Escurrimientos medios anuales en la salida de la cuenca del río Angulo.

Gasto medio en m³/s				
Año	Escenario 4.5	Escenario 6.0	Escenario 8.5	Histórico
1	3.729	2.757	3.487	3.377
2	2.746	3.175	2.734	4.851
3	2.821	3.586	3.413	5.333
4	2.612	2.490	3.575	5.555
5	2.871	3.743	3.385	8.876
6	3.342	3.143	3.304	7.753
7	2.491	2.890	2.824	7.966
8	3.300	2.713	2.420	11.066
9	3.573	2.165	3.262	9.718
10	3.472	2.911	2.856	5.037
11	3.045	3.696	14.170	6.117
12	2.586	3.142	4.750	5.622
13	2.969	2.983	3.004	5.870
14	3.105	3.218	3.317	11.855
15	3.158	3.834	3.195	5.557
16	2.948	3.087	3.211	5.227
17	2.998	2.689	3.234	10.690
18	3.490	3.595	3.253	8.186
19	3.044	3.237	3.464	10.778
20	3.175	2.440	2.770	15.322
21	3.151	3.308	3.593	6.789
22	2.908	2.828	3.220	4.152
23	2.964	3.297	3.570	7.983
24	2.832	3.336	3.148	8.425
25	3.061	3.068	2.969	4.214
26				5.244
Promedio	3.056	3.093	3.685	7.368

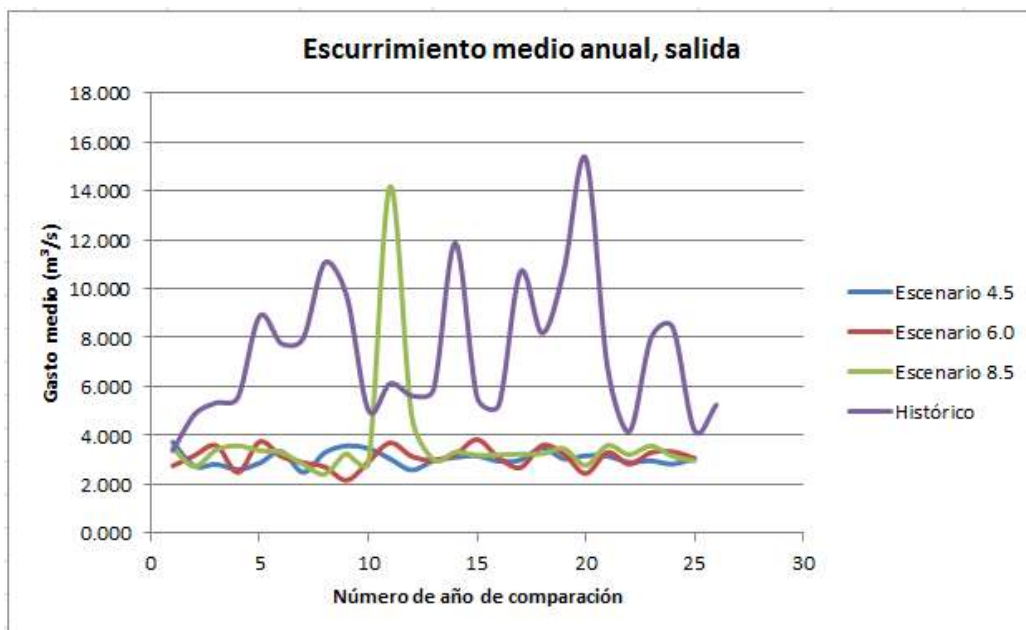


Figura 37. Gasto escurrimiento medio anual a la salida de la cuenca.

Tabla 16. Gasto medio mensual a la salida de la cuenca del río Angulo.

Gasto en m³/s				
Mes	Escenario 4.5	Escenario 6.0	Escenario 8.5	Histórico
Enero	0.104	0.125	0.430	1.209
Febrero	0.000	0.000	0.259	0.533
Marzo	0.000	0.000	0.191	0.199
Abril	0.000	0.000	0.085	0.118
Mayo	0.000	0.000	0.118	0.374
Junio	0.049	0.022	0.356	4.611
Julio	3.052	2.785	3.810	12.366
Agosto	8.016	8.109	9.391	19.810
Septiembre	10.192	10.370	11.880	25.881
Octubre	8.898	9.019	9.933	13.072
Noviembre	5.026	5.174	5.815	7.106
Diciembre	1.331	1.514	1.954	3.136
Promedio	3.056	3.093	3.685	7.368

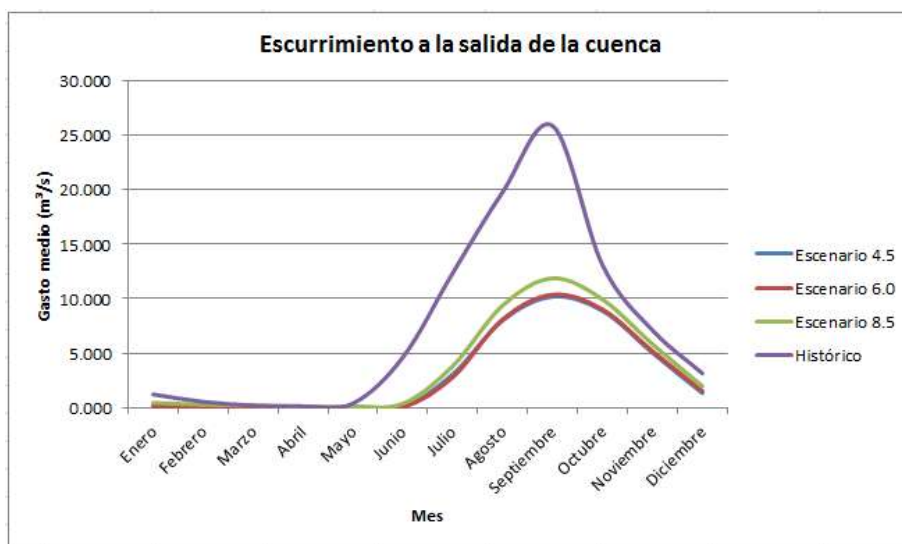


Figura 38. Escurreimiento medio mensual a la salida de la cuenca del río Angulo.



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

7.1. Conclusiones generales.

En cuanto a la metodología para la obtención de la cantidad de agua superficial en la cuenca, se debe seguir trabajando en la restitución a régimen natural de la cuenca, ya que esto se ve reflejado en la modelación del caudal histórico. Sin embargo, no se puede dejar de lado el hecho de que contar con más datos históricos mejoraría la calibración del modelo, pues la gran cantidad de vacíos genera mayor incertidumbre en la modelación.

La calibración también debe ser trabajada ya que la sensibilidad del modelo SWAT a los cambios en el suelo se mantuvo hasta cierto punto, después, las modificaciones en el caudal no eran lo suficientemente notables para que se llegara a la calibración óptima. Cabe mencionar que el intento de calibrar un modelo es ya de por sí bueno, pues no se deja a criterio de software todo el escurrimiento histórico, sino que se procura acercarse a la realidad lo más que se pueda. Ningún modelo puede ser la realidad, eso es claro.

De los escenarios de cambio climático se puede concluir que, debido a que son proyecciones solamente, no se puede tener certeza de lo que se espera a futuro, sin embargo nos ayudan a prever los acontecimientos y así establecer medidas para que el efecto se disminuya o se mitigue. La mayor desventaja que se tuvo para esta modelación es la cantidad de datos que SWAT necesita, pues los datos no pueden tenerse de forma diaria; habría que corroborar con otro modelo los escurrimientos aquí obtenidos, o esperar a que las autoridades encargadas de la proyección del cambio climático contemplen el proyectar estos escenarios de manera diaria.

7.2. Conclusiones a nivel de cuenca.

Los usos del agua superficial, en la cuenca del río Angulo, analizados, fueron dos, el uso urbano y el uso para riego de zonas agrícolas. La demanda proyectada de estos usos, de acuerdo a lo presentado en el trabajo, es de 3.65 m³/s en el año 2039.

Analizando los resultados en la modelación de la cuenca, una subcuenca intermedia en la zona, puede cubrir ahora esa demanda en la actualidad, sin embargo, en ninguno de los escenarios proyectados alcanza a cubrirla para el año 2039; suponiendo que el uso del



agua se diera a partir de la salida de la cuenca, también cubre la demanda actualmente, en el escenario RCP 8.5 alcanzaría a penas a cubrirla, mientras que en los escenarios RCP 4.5 y 6.0, no se cubre la demanda por aproximadamente 0.6 m³/s.

Esto es muestra de que el cambio climático proyectado para México, tiene un efecto notable en el escurrimiento medio de la cuenca, lo que llevaría a un desabasto de agua superficial provocando tal vez, el aumento en la explotación de los acuíferos para poder cubrir la demanda, lo cual es un problema grave puesto que ya existen pozos sobre explotados en el país; otra consecuencia sería que si no se cubre la demanda para la agricultura, nos veríamos frente a una escasez de alimentos cultivados, con el inevitable aumento de los precios y por supuesto, las repercusiones sociales.

Es imperativo que se comiencen las acciones para la mitigación del efecto del cambio climático, antes de tener que usar las medidas de adaptación. Ya que la mitigación del cambio climático tiene sus bases en las políticas destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, así como de potenciar los sumideros de carbono, es de esperarse que la solución esté en manos de las autoridades.

La mejor de las soluciones es implementar la economía baja en carbono, sobre todo en la zona donde se ubica la cuenca del río Angulo pues en su mayoría, tiene poblaciones aún pequeñas dedicadas más que nada a la agricultura. Zacapu es el municipio con mayor crecimiento, y en el que se puede comenzar con esta medida, evitando el crecimiento excesivo de la aún reciente zona industrial (hablando en el sentido de la ubicación de fábricas con excesiva emisión de gases de efecto invernadero), además de cuidar el crecimiento urbano motivando la construcción de casas autosustentables y la actualización del transporte público; todo en conjunto reduciría las emisiones, mitigando el posible efecto del cambio climático en la zona.

Cabe mencionar también, las acciones internacionales en las que participa México, las cuáles, de aplicarse, mitigarían también el efecto del cambio climático en la cuenca del río Angulo, tan solo por el hecho de pertenecer a una de las cuencas de mayor importancia en el centro del país. Estas medidas incluyen la generación de electricidad mediante energías limpias, acciones de manejo de residuos sólidos urbanos, tratamiento de aguas,



optimización del transporte, reducción de la deforestación y aumento de las áreas protegidas; estos últimos dos para maximizar los sumideros de carbono naturales.

Sin embargo, para que todo esto se cumpla, México deberá contar con un sistema de monitoreo que permita evaluar los cambios en la deforestación, incremento en los acervos de carbono, así como para identificar el movimiento en las emisiones producto de la implementación de actividades de mitigación.



8. REFERENCIAS

- Martínez, J., Fernández, A., Osnaya, P. (2004). Cambio Climático: Una visión desde México. Primera Edición. . Mexico D.F. México.
- Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan y S.-P. Xie, 2013: Resumen técnico. En: Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Álvarez, J. Andreu., Salas, J. D. (1989). La modelación en planificación hidráulica. Modelos de simulación y síntesis de hidrología superficial. Universidad Politécnica de Valencia.
- SEMARNAT (2013). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y su Protocolo de Kioto. Recuperado de: <http://www.semarnat.mx/temas/internacional/Paginas/CMNUCC.aspx>
- INECC (2015). Cambio climático en México. Recuperado de: <http://iecc.inecc.gob.mx/marco-normativo-nacional.php>
- Magaña Rueda Víctor Orlando (2010). "Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones." Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM.
- IPCC (2001). Cambio climático 2001: La base científica. Resúmenes del Grupo de Trabajo I.



- Magaña, V., Caetano, E., 2007. “Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector.” Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM.
- IPCC (2000). Informe especial del IPCC: Escenarios de emisiones. Resumen para responsables políticas.
- Moss, R.H., J.A. Edmons, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant y T. J. Wilbanks (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Recuperado de: <http://escenarios.inecc.gob.mx/>
- INECC. 2013. Información General. Escenarios. Recuperado de: <http://escenarios.inecc.gob.mx/>
- Aparicio, M. F. J. (2011). Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. México, D. F.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R. (2005). Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua. Documentación Teórica. Texas. Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
- Solera A., Paredes J., Andreu J. (n. d.) “Datos hidrológicos” en “Modelo de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas”. Instituto Geológico y Minero de España.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) (2002). “Escurrecimientos superficiales”. Recuperado de: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/CursoTaller%20Desarrollo%20de%20capacidades%20orientadas%20a/Attachments/24/02.pdf>



- Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto González, A. C. Conde Álvarez, A. Quintanar Isaías, J. S. Santana Sepúlveda, R. Romero Centeno, M. E. Maya Magaña, J. G. Rosario de La Cruz, Ma. del R. Ayala Enríquez, H. Carrillo Tlazazanatz, O. Santiesteban y M. E. Bravo. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional. Informe Final del Proyecto al INECC.
- UK Met Office (2011). Climate: Observations, projections and impacts. Summary factsheet Mexico. Devon, UK, Met Office. Pp. 149.
- DOF. Diario Oficial de la Federación. (2015). Ley General de Cambio Climático. Recuperado de: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_130515.pdf
- DOF. Diario Oficial de la Federación. (2015). Ley General del Equilibrio y la Protección al Ambiente. Recuperado de: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_090115.pdf
- DOF. Diario Oficial de la Federación. (2013). Estrategia Nacional de Cambio Climático. Recuperado de: <http://www.cefp.gob.mx/indicadores/gaceta/2013/iescefp0252013.pdf>
- Gobierno de la República. (2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013 – 2018. Recuperado de: <http://pnd.gob.mx/wp-content/uploads/2013/05/PND.pdf>
- DOF. Diario Oficial de la Federación. (2014). Programa Especial de Cambio Climático. Recuperado de: <file:///C:/Users/NADIA/Downloads/PECC-2014-2018.pdf>



9. ANEXOS.

Ley General de Cambio Climático. (Últimas reformas publicadas DOF 13-05-2015).

Artículo 2o. Esta ley tiene por objeto: I. Garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades de la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. II. Regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático. V. Fomentar la educación, investigación, desarrollo y transferencia de tecnología e innovación y difusión en materia de adaptación y mitigación al cambio climático.

Artículo 5o. La federación, las entidades federativas, el Distrito Federal y los municipios ejercerán sus atribuciones para la mitigación y adaptación al cambio climático, de conformidad con la distribución de competencias prevista en esta ley y en los demás ordenamientos legales aplicables.

Artículo 21. El Estatuto Orgánico del INECC determinará las unidades administrativas, las bases de la organización, así como las facultades y funciones que correspondan a sus unidades administrativas, debiendo incluir una coordinación general de evaluación de las políticas de mitigación y adaptación al cambio climático conforme a lo establecido en el capítulo segundo del presente título.

Artículo 31. La política nacional de mitigación de Cambio Climático deberá incluir, a través de los instrumentos de planeación, política y los instrumentos económicos previstos en la presente ley, un diagnóstico, planificación, medición, monitoreo, reporte, verificación y evaluación de las emisiones nacionales.

Esta política deberá establecer planes, programas, acciones, instrumentos económicos, de política y regulatorios para el logro gradual de metas de reducción de emisiones específicas, por sectores y actividades tomando como referencia los escenarios de línea base y líneas de base por sector que se establezcan en los instrumentos previstos por la presente ley, y considerando los tratados internacionales suscritos por el Estado Mexicano en materia de cambio climático.



Artículo 32. La política nacional de mitigación se instrumentará con base en un principio de gradualidad, promoviendo el fortalecimiento de capacidades nacionales para la mitigación de emisiones y la adaptación a los efectos adversos del cambio climático, priorizando en los sectores de mayor potencial de reducción hasta culminar en los que representan los costos más elevados, además de atender los compromisos internacionales de los Estados Unidos Mexicanos en la materia.

Artículo 34. Para reducir las emisiones, las dependencias y entidades de la administración pública federal, las Entidades Federativas y los Municipios, en el ámbito de su competencia, promoverán el diseño y la elaboración de políticas y acciones de mitigación asociadas a los sectores correspondientes, considerando las disposiciones siguientes:

- I. Reducción de emisiones en la generación y uso de energía.
- II. Reducción de emisiones en el Sector Transporte.
- III. Reducción de emisiones y captura de carbono en el sector de agricultura, bosques y otros usos del suelo y preservación de los ecosistemas y la biodiversidad.
- IV. Reducción de emisiones en el sector residuos.
- V. Reducción de emisiones en el Sector de Procesos Industriales.
- VI. Educación y cambios de patrones de conducta, consumo y producción.

Artículo 37. Para los efectos de esta Ley serán reconocidos los programas y demás instrumentos de mitigación que se han desarrollado a partir del Protocolo de Kioto y cualquier otro que se encuentre debidamente certificado por alguna organización con reconocimiento internacional.

Las disposiciones reglamentarias de la presente Ley establecerán los requisitos que deberán cumplirse para el reconocimiento y registro de los programas e instrumentos referidos en el presente artículo.



Artículo 61. La Secretaría con la participación de la Comisión deberá revisar la Estrategia Nacional, por lo menos cada diez años en materia de mitigación y cada seis años en materia de adaptación, debiendo explicarse las desviaciones que, en su caso, se adviertan entre las estimaciones proyectadas y los resultados evaluados. Asimismo, se actualizarán los escenarios, proyecciones, objetivos y las metas correspondientes.

Artículo 89. Las personas físicas o morales que lleven a cabo proyectos o actividades que tengan como resultado la mitigación o reducción de emisiones, podrán inscribir dicha información en el Registro, conforme a las disposiciones reglamentarias que al efecto se expidan.

Artículo 96. La Secretaría, por sí misma, y en su caso, con la participación de otras dependencias de la administración pública federal expedirá normas oficiales mexicanas que tengan por objeto establecer lineamientos, criterios, especificaciones técnicas y procedimientos para garantizar las medidas de adaptación y mitigación al cambio climático.

Artículo 102. En materia de mitigación al cambio climático la evaluación se realizará respecto de los objetivos siguientes:

- I. Garantizar la salud y la seguridad de la población a través del control y reducción de la contaminación atmosférica;
- II. Reducir las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, y mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero mediante el fomento de patrones de producción y consumo sustentables en los sectores público, social y privado fundamentalmente en áreas como: la generación y consumo de energía, el transporte y la gestión integral de los residuos;
- III. Sustituir de manera gradual el uso y consumo de los combustibles fósiles por fuentes renovables de energía;
- IV. La medición de la eficiencia energética, el desarrollo y uso de fuentes renovables de energía y la transferencia y desarrollo de tecnologías bajas en carbono, particularmente



en bienes inmuebles de dependencias y entidades de la Administración Pública Federal centralizada y paraestatal, de las Entidades Federativas y de los Municipios;

V. Elevar los estándares de eficiencia energética de los automotores a través de la creación de normas de eficiencia para vehículos nuevos y de control de emisiones para los vehículos importados;

VI. Alinear los programas federales y políticas para revertir la deforestación y la degradación;

VII. La conservación, protección, creación y funcionamiento de sumideros;

VIII. La conservación, protección y aprovechamiento sustentable de la biodiversidad;

IX. El establecimiento de metodologías que permitan medir, reportar y verificar las emisiones;

X. El desarrollo y uso de transporte público, masivo y con altos estándares de eficiencia, privilegiando la sustitución de combustibles fósiles y el desarrollo de sistemas de transporte sustentable urbano y suburbano, público y privado;

XI. Reducir la quema y venteo de gas para disminuir las pérdidas en los procesos de extracción y en los sistemas de distribución y garantizar al máximo el aprovechamiento del gas en Instalaciones industriales, petroleras, gaseras y de refinación;

XII. Promover el aprovechamiento del gas asociado a la explotación de los yacimientos minerales de carbón;

XIII. El aprovechamiento energético de los residuos en proyectos de generación de energía;

XIV. Desarrollar incentivos económicos y fiscales para impulsar el desarrollo y consolidación de industrias y empresas socialmente responsables con el medio ambiente, y



XV. Los demás que determine la Comisión.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (Última reforma publicada DOF 09-01-2015).

Artículo 10.- La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.

Artículo 15.- IV.- Quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos que dicha afectación implique. Asimismo, debe incentivarse a quien proteja el ambiente, promueva o realice acciones de mitigación y adaptación a los efectos del cambio climático y aproveche de manera sustentable los recursos naturales.

Artículo 28.- La evaluación del impacto ambiental es el procedimiento a través del cual la Secretaría establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el medio ambiente. Para ello, en los casos en que determine el Reglamento que al efecto se expida, quienes pretendan llevar a cabo alguna de las siguientes obras o actividades, requerirán previamente la autorización en materia de impacto ambiental de la Secretaría:

I.- Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, oleoductos, gasoductos, carboductos y poliductos;

II.- Industria del petróleo, petroquímica, química, siderúrgica, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica;

III.- Exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la Federación en los términos de las Leyes Minera y Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear;



IV.- Instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, así como residuos radiactivos;

V.- Aprovechamientos forestales en selvas tropicales y especies de difícil regeneración;

VI. Se deroga.

VII.- Cambios de uso del suelo de áreas forestales, así como en selvas y zonas áridas;

VIII.- Parques industriales donde se prevea la realización de actividades altamente riesgosas;

IX.- Desarrollos inmobiliarios que afecten los ecosistemas costeros;

X.- Obras y actividades en humedales, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados con el mar, así como en sus litorales o zonas federales;

XI. Obras y actividades en áreas naturales protegidas de competencia de la Federación;

XII.- Actividades pesqueras, acuícolas o agropecuarias que puedan poner en peligro la preservación de una o más especies o causar daños a los ecosistemas, y

XIII.- Obras o actividades que correspondan a asuntos de competencia federal, que puedan causar desequilibrios ecológicos graves e irreparables, daños a la salud pública o a los ecosistemas, o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas relativas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección del ambiente.

Artículo 30.- Para obtener la autorización a que se refiere el artículo 28 de esta Ley, los interesados deberán presentar a la Secretaría una manifestación de impacto ambiental, la cual deberá contener, por lo menos, una descripción de los posibles efectos en el o los ecosistemas que pudieran ser afectados por la obra o actividad de que se trate, considerando el conjunto de los elementos que conforman dichos ecosistemas, así como las medidas preventivas, de mitigación y las demás necesarias para evitar y reducir al mínimo los efectos negativos sobre el ambiente.



Estrategia Nacional de Cambio Climático. (DOF, 2013)

Objetivo General. Contribuir a enfrentar los efectos del cambio climático (Adaptación al Cambio Climático) y a que el país transite hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono (Mitigación del Cambio Climático).

Estructura General. Los bloques conceptuales principales que conforman la estructura de la ENCC son tres:

- 1) Pilares de la Política Nacional de Cambio Climático,
- 2) Ejes Estratégicos para la Adaptación y la Mitigación al Cambio Climático y
- 3) Líneas de Acción correspondientes a los Pilares y Ejes estratégicos.

Ejes Estratégicos sobre la Mitigación del Cambio Climático. M1. Acelerar la transición energética hacia fuentes de energía limpia. México tiene un gran potencial de generación de energía a través de fuentes renovables, y si bien se han abierto posibilidades de aprovechamiento para la participación del sector privado, los mecanismos no han sido suficientes. Las siguientes líneas de acción buscan enfocar esfuerzos en superar las barreras principales que han impedido la completa inmersión de las energías renovables en el sistema energético nacional.

M2. Reducir la intensidad energética mediante esquemas de eficiencia y consumo responsable. La eficiencia energética, además de derivar en ahorro, contribuye a la reducción de emisiones de GEI al mismo tiempo que apoya las metas de crecimiento y competitividad del país. En este eje se pretende potenciar las medidas que acompañan a un consumo responsable de energía, que resultan de los cambios en los hábitos de consumo así como de mejoras tecnológicas.

M3. Transitar a modelos de ciudades sustentables con sistemas de movilidad, gestión integral de residuos y edificaciones de baja huella de carbono. En el marco de este eje, una ciudad sustentable parte de un modelo de desarrollo urbano capaz de regular el territorio, orientando su uso hacia sistemas eficientes de movilidad, edificaciones de baja



huella de carbono y una gestión integral del agua y de los residuos. El enfoque de aplicación de política es primordialmente de ámbito local.

M4. Impulsar mejores prácticas agropecuarias y forestales para incrementar y preservar los sumideros naturales de carbono. Los bosques son reservorios importantes de carbono, cuya destrucción y degradación constituye una de las fuentes más importantes de emisiones a nivel global. Al mismo tiempo, su conservación y manejo sustentable pueden contribuir a aumentar la cantidad de carbono almacenada en ellos. Las actividades agropecuarias, por su parte, son clave para la seguridad alimentaria, pero muchas de éstas contribuyen a la emisión de GEI. Este eje plantea líneas de acción clave a desarrollarse dentro del sector agropecuario y forestal con la finalidad de impulsar mejores prácticas agropecuarias y forestales que reduzcan las emisiones y eviten políticas contrarias que pudieran mermar su alcance de mitigación. Es clave en este eje la aplicación de políticas con enfoque de paisaje, que busca actuar sobre grandes áreas compactas, tales como corredores biológicos o cuencas, para considerar más plenamente la condición de sus recursos naturales, tendencias, la influencia de la acción humana y las oportunidades para la conservación, restauración y el desarrollo.

M5. Reducir emisiones de contaminantes climáticos de vida corta y propiciar co-beneficios de salud y bienestar. En este eje se plantean líneas de acción para reducir las emisiones de contaminantes climáticos de vida corta, y de esta forma contribuir a la reducción de impactos de cambio climático a nivel regional y a disminuir las tendencias de calentamiento global en el corto plazo. Paralelamente, con las líneas de acción se fomentarán múltiples beneficios que incluyen la mejora de calidad del aire, protección a la salud y de cultivos.

Es importante mencionar que la Estrategia Nacional de Cambio Climático presenta una Visión de Largo Plazo (10, 20 y 40 años), misma que está planteada en términos generales de la siguiente manera: “México crece de manera sostenible con la promoción del manejo sustentable, eficiente y equitativo de sus recursos naturales así como del uso de energías limpias y renovables que le permiten un desarrollo con bajas emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. México es un país próspero, competitivo, socialmente incluyente y con responsabilidad global que genera empleos suficientes y bien remunerados para toda su población, en particular para la más vulnerable. México es



una nación con una economía verde, con ecosistemas y poblaciones resilientes al cambio climático y con ciudades sustentables”.

Plan Nacional de Desarrollo 2013 - 2018. (Gobierno de la República, 2013).

El Plan Nacional de Desarrollo considera que la tarea del desarrollo y del crecimiento corresponde a todos los actores, todos los sectores y todas las personas del país. El desarrollo no es deber de un solo actor, ni siquiera de uno tan central como lo es el Estado.

Estrategia 4.4.3. Fortalecer la política nacional de cambio climático y cuidado al medio ambiente para transitar hacia una economía competitiva, sustentable, resiliente y de bajo carbono. Líneas de acción: 1) Ampliar la cobertura de infraestructura y programas ambientales que protejan la salud pública y garanticen la conservación de los ecosistemas y recursos naturales; 2) Desarrollar las instituciones e instrumentos de política del Sistema Nacional de Cambio Climático; 3) Acelerar el tránsito hacia un desarrollo bajo en carbono en los sectores productivos primarios, industriales y de la construcción, así como en los servicios urbanos, turísticos y de transporte; 4) Promover el uso de sistemas y tecnologías avanzados, de alta eficiencia energética y de baja o nula generación de contaminantes o compuestos de efecto invernadero; 5) Impulsar y fortalecer la cooperación regional e internacional en materia de cambio climático, biodiversidad y medio ambiente; 6) Lograr un manejo integral de residuos sólidos, de manejo especial y peligrosos, que incluya el aprovechamiento de los materiales que resulten y minimice los riesgos a la población y al medio ambiente; 7) Realizar investigación científica y tecnológica, generar información y desarrollar sistemas de información para diseñar políticas ambientales y de mitigación y adaptación al cambio climático; 8) Lograr el ordenamiento ecológico del territorio en las regiones y circunscripciones políticas prioritarias y estratégicas, en especial en las zonas de mayor vulnerabilidad climática; 9) Continuar con la incorporación de criterios de sustentabilidad y educación ambiental en el Sistema Educativo Nacional, y fortalecer la formación ambiental en sectores estratégicos; 10) Contribuir a mejorar la calidad del aire, y reducir emisiones de compuestos de efecto invernadero mediante combustibles más eficientes, programas de movilidad sustentable y la eliminación de los apoyos ineficientes a los usuarios de los combustibles fósiles; y 11) Lograr un mejor monitoreo de la calidad



del aire mediante una mayor calidad de los sistemas de monitoreo existentes y una mejor cobertura de ciudades.

Programa Especial de Cambio Climático. (DOF, 2014)

Casi un año después, en septiembre de 2013, en su Quinto Reporte de Evaluación, el IPCC concluyó que el calentamiento del planeta es inequívoco. En este Reporte se afirma que los fenómenos, como el calentamiento de la atmósfera y los océanos, la reducción de las superficies cubiertas con hielo y nieve y, el aumento del nivel del mar, observados desde la década de los cincuenta a la fecha, no se habían presentado en varios miles de años. La principal causa de los mismos, de acuerdo al Reporte, está relacionada con las actividades humanas.

Para hacer frente a este reto y actuar con responsabilidad global ante sus compromisos con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) e instrumentar el nuevo marco normativo a nivel nacional, el Gobierno de la República, a través de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), ha elaborado este PECC que representa únicamente la contribución de la Administración Pública Federal a las metas nacionales.

Las evaluaciones de vulnerabilidad de diversos sectores bajo escenarios de cambio climático, han sido desarrolladas durante las dos últimas décadas en México, y se han ido perfeccionando a la par de los escenarios de cambio climático, contando con mejor información para la toma de decisiones. La figura 39 que se presenta a continuación, es un resumen de los resultados de investigaciones sobre el impacto del cambio climático en sectores prioritarios para México.

1.3. Las emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero en México. Para el reto que plantea la mitigación de emisiones de compuestos y gases de efecto invernadero, México se comprometió a reducir un 30% con respecto a la línea base en 2020, así como un 50% al 2050 en relación con las emisiones del año 2000, mediante objetivos indicativos y metas aspiracionales contenidas en la LGCC. Este programa, además de incluir las líneas de acción vinculadas al Presupuesto de Egresos de la Federación,



incluye otras sujetas a la obtención de apoyos financieros y tecnológicos, nacionales o internacionales, tanto públicos como privados.

Sistemas y Sectores	Escenario	Nivel de Confianza
	Aumento en temperatura entre +2.5° C a 4.5° C; y disminución en la precipitación entre -5 y 10% ¹¹	
	Impactos proyectados	
Agricultura	Disminución de la productividad del maíz para la década de 2050, lo que se suma al problema actual del 25% de las unidades de producción con pérdida en la fertilidad de suelos. Existe cierta evidencia de que la mayoría de los cultivos resultarán menos adecuados para la producción en México hacia 2030, empeorando esta situación para finales del presente siglo.	*
Hídrico	La mayor parte del país se volverá más seca y las sequías más frecuentes, con el consecuente aumento de demanda de agua particularmente en el norte del país y en zonas urbanas.	**
	Por otro lado, habrá regiones donde la precipitación podría ser más intensa y frecuente incrementando el riesgo de inundaciones para alrededor de 2 millones de personas que actualmente se encuentran en situación de moderada a alta vulnerabilidad, ante las inundaciones, y quienes residen en localidades menores a 5,000 habitantes, ubicadas principalmente en la parte baja de las cuencas, sumado al riesgo de deslizamientos de laderas por lluvia.	***
Costero	El aumento del nivel del mar constituye un peligro para los sectores residencial y de infraestructura asentados en zonas costeras. Por otro lado, los sectores hídrico y agrícola podrían verse afectados por efecto de la intrusión salina.	**
Tormentas y clima severo	Hay consenso sobre la intensidad de los ciclones en el Noroeste del Pacífico y en el Atlántico Norte. Sin embargo, las incertidumbres en cuanto a los cambios y la intensidad complican estimar sus impactos para el país, se prevé que a mayor número e intensidad de tormentas, los impactos podrían tener mayores consecuencias sociales y económicas importantes.	**
Ecosistemas y biodiversidad	En ecosistemas terrestres un ejemplo es la posible reducción del área cubierta de bosques de coníferas, especies de zonas áridas, semiáridas y especies forestales de zonas templadas. En el caso de los océanos, un aumento en la temperatura puede ocasionar un colapso demográfico en las poblaciones marinas, ocasionando baja productividad para las pesquerías. Para el caso de mamíferos terrestres y voladores se proyecta al 2050, una reducción de cerca de la mitad de las especies estudiadas perdiendo más del 80% de su rango de distribución histórica.	**
Infraestructura estratégica	Es importante fortalecer la investigación sobre el impacto del cambio climático en infraestructura turística, portuaria, de energía, comunicaciones y transportes, la cual puede verse afectada por el aumento en número e intensidad de ciclones tropicales y mareas de tormenta más intensas.	
Simbología por grado de impacto. Es una medida subjetiva basada en el juicio experto que considera la magnitud del impacto proyectado, la vulnerabilidad y la capacidad para hacerle frente.		
 Nivel 1: impacto bajo Nivel 2: impacto medio Nivel 3: impacto alto		
Nivel de confianza. Se le dio una clasificación de una a cinco estrellas, siendo cinco el nivel de mayor confiabilidad. También es una medida subjetiva basada en el juicio de expertos. Se considera que los trabajos arbitrados más actuales tienen un nivel de confianza mayor. Los factores que se consideran son el acuerdo entre los modelos climáticos, la calidad de datos e información utilizada para la investigación y el consenso entre los estudios sólidos disponibles para esta región.		

Figura 39. Impactos del cambio climático en sectores prioritarios para México.

Por las condiciones sociales y económicas de México, la LGCC mandata priorizar las acciones de mitigación con mayor potencial de reducción al menor costo que conlleven beneficios ambientales, económicos y sociales para mejorar la calidad de vida de los mexicanos. Bajo este enfoque, este programa contiene líneas de acción encaminadas a reducir GEI en los siguientes sectores emisores: transporte, petróleo y gas, industria, agropecuario, residuos, generación eléctrica, forestal y residencial; así como líneas de



acción que buscan reducir las emisiones de contaminantes climáticos de vida corta (CCVC).

Objetivo 2. Conservar, restaurar y manejar sustentablemente los ecosistemas garantizando sus servicios ambientales para la mitigación y adaptación al cambio climático.

Estrategia 2.1. Promover esquemas y acciones de protección, conservación y restauración de ecosistemas terrestres, costeros y marinos y su biodiversidad;

Estrategia 2.2. Incrementar y fortalecer la conectividad de ecosistemas;

Estrategia 2.3. Implementar prácticas agropecuarias, forestales y pesqueras sustentables que reduzcan emisiones y disminuyan la vulnerabilidad de ecosistemas;

Estrategia 2.4. Desarrollar instrumentos que promuevan sustentabilidad y reducción de emisiones de actividades agropecuarias, forestales y pesqueras y disminuyan la vulnerabilidad ecosistémica;

Estrategia 2.5. Reducir las amenazas ambientales exacerbadas por el cambio climático.

Líneas de acción: 1) Establecer acuerdos con productores y sociedad civil organizada para la erradicación del fuego agropecuario en territorios prioritarios del CBMM; 2) Implementar planes de acción para el control de plagas en las comunidades más afectadas; 3) Evaluar la vulnerabilidad ante el cambio climático de especies prioritarias y proponer estrategias para su manejo y conservación; 4) Fortalecer la investigación sobre las interacciones y sinergias de las especies invasoras ante el cambio climático; 5) Generar información satelital para la alerta temprana de incendios forestales; y 6) Elaborar la Estrategia Nacional Fitosanitaria Forestal.

Estrategia 2.6. Restauración y gestión integral de cuencas hidrológicas. *Líneas de acción:*

1) Establecer reservas de aguas nacionales superficiales para la protección ecológica; 2) Realizar acciones para incrementar la recarga de acuíferos; 3) Focalizar los esquemas de pago por servicios ambientales en zonas estratégicas para la conservación de cuencas y ecosistemas; 4) Fomentar acciones para restablecer el balance del ciclo del agua en los



destinos turísticos prioritarios; y 5) Elaborar la línea de base del cálculo de emisiones y absorciones por sumideros en el sector agrícola y USCUS.

Objetivo 3. Reducir emisiones de gases de efecto invernadero para transitar a una economía competitiva y a un desarrollo bajo en emisiones.

Estrategia 3.1. *Ejecutar proyectos y acciones de eficiencia energética.* Líneas de acción:

1) Implementar proyectos de reducción de GEI en operaciones de PEMEX mediante eficiencia energética, eficiencia operativa, quema, venteo y aprovechamiento de gas; 2) Promover eficiencia energética mediante: Normas Oficiales Mexicanas, alumbrado público e inmuebles, instalaciones y vehículos de la APF; 3) Instrumentar prácticas agrícolas sustentables, aprovechamiento, generación y uso de energías renovables, eficiencia energética, y generación y aprovechamiento de biomasa; 4) Diseñar la ruta crítica de CCUS e implementar proyectos piloto en CFE y para recuperación mejorada de petróleo en PEMEX; 5) Apoyar la sustitución de motores de embarcaciones pesqueras por motores más eficientes; 6) Establecer programas que incrementen la eficiencia energética de los procesos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica; 7) Promover el uso de esquemas de generación distribuida en pequeña y gran escala; 8) Fomentar la inversión en redes inteligentes que faciliten la incorporación de energías renovables variables y reducción de pérdidas; y 9) Publicar metodologías de cogeneración eficiente con el aprovechamiento de bioenergéticos.

Estrategia 3.2. *Acelerar la transición energética a fuentes de energía menos intensivas en carbono.* Líneas de acción:

1) Impulsar la diversificación de la matriz energética con inversión pública y privada en la generación mediante energías limpias; 2) Desplazar el uso de diesel y combustóleo en la matriz energética, por fuentes menos intensivas en carbono; 3) Impulsar el aprovechamiento geotérmico de media y baja entalpía para uso térmico; 4) Implementar proyectos piloto o demostrativos de aprovechamiento de residuos e insumos no alimentarios para producción de biocombustibles; 5) Desarrollar programas de aprovechamiento de biocombustibles, y en su caso de mezclas, para generación de energía eléctrica y térmica, y para el sector transporte; 6) Implementar pruebas de concepto de introducción de biocombustibles bajo esquemas de producción, transporte y comercialización regionalizados; 7) Impulsar el desarrollo de generación termosolar para la generación de electricidad; 8) Desarrollar políticas y medidas para asegurar la



suficiencia en el abasto de gas natural; 9) Facilitar la inclusión social de la población alejada de centros urbanos, mediante la electrificación rural con energías renovables.

Estrategia 3.3. Desarrollar herramientas e instrumentos que faciliten la transición energética.

Estrategia 3.4. Promover y facilitar acciones de reducción de emisiones del sector privado.

Estrategia 3.5. Desarrollar esquemas de transporte y movilidad sustentable. Líneas de acción: 1) Diseñar e instrumentar una política de movilidad sustentable para ciudades de 500 mil o más habitantes; 2) Desarrollar proyectos de convivencia urbana que incrementen la velocidad del traslado de carga y fortalezcan la seguridad vial; 3) Promover el uso eficiente del ferrocarril en el traslado de carga, para disminuir costos de transporte y emisión de contaminantes; 4) Promover la modernización del transporte de carga, para reducir costos de operación y emisiones e incrementar su competitividad y seguridad; 5) Reducir GEI y contaminantes criterio derivado la operación del Programa Transporte Limpio; 6) Construir ferrocarriles interurbanos de pasajeros con una visión integral que considere el desarrollo regional y las proyecciones demográficas; 7) Impulsar proyectos clave de transporte masivo con criterios de reducción de tiempos de recorrido, rentabilidad socioeconómica e impacto ambiental; 8) Fomentar el cabotaje y el transporte marítimo de corta distancia, para impulsarlo como vía alterna para el tránsito de mercancías; y 9) Avanzar hacia prácticas de logística de ahorro de combustibles.

Estrategia 3.6. Promover el desarrollo de Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMA).

Objetivo 4. Reducir las emisiones de contaminantes climáticos de vida corta, propiciando co-beneficios de salud y bienestar.

Estrategia 4.1 Utilizar tecnologías y combustibles que reduzcan la emisión de carbono negro, mejorando la calidad del aire y la salud pública.

Estrategia 4.2 Reducir emisiones de metano en plantas de tratamiento de agua residual, rellenos sanitarios y en los sectores petrolero y agropecuario.



Estrategia 4.3 *Controlar emisiones de refrigerantes con alto Potencial de Calentamiento Global.*

Estrategia 4.4. *Desarrollar instrumentos normativos y de fomento para regular la emisión de contaminantes climáticos de vida corta.*

Estrategia 4.5. *Promover el desarrollo de Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMA) que reducen contaminantes climáticos de vida corta.*

