



Generación de Insumos y Herramientas para la Toma de Decisiones en la Estrategia Integral para la Recuperación del Río Santiago

5

Balance Hídrico, Modelo Hidrológico





CONTENIDO E ÍNDICES

5.1	ACRÓNIMOS.....	5-4
5.2	ALCANCES DEL BALANCE HÍDRICO Y EL MODELO HIDROLÓGICO.....	5-5
5.2.1	<i>Balance Hídrico.....</i>	5-5
5.2.2	<i>Modelo Hidrológico.....</i>	5-5
5.3	SELECCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO	5-6
5.4	ANTECEDENTES	5-8
5.5	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO DE MODELACIÓN	5-8
5.5.1	<i>Localización Geográfica.....</i>	5-10
5.6	METODOLOGÍA PARA LA MODELACION HIDROLOGICA.....	5-11
5.7	DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	5-17
5.7.1	<i>Hidrología.....</i>	5-17
5.7.2	<i>Clima.....</i>	5-24
5.7.3	<i>Sedimentación.....</i>	5-25
5.7.4	<i>Temperatura del Terreno.....</i>	5-26
5.7.5	<i>Modelo de Crecimiento Vegetal.....</i>	5-26
5.7.6	<i>Nutrientes.....</i>	5-28
5.7.7	<i>Pesticidas.....</i>	5-30
5.7.8	<i>Prácticas de Manejo</i>	5-31
5.8	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	5-36
5.9	ARMADO DEL MODELO HIDROLÓGICO.....	5-38
5.9.1	<i>Información de elevación utilizada</i>	5-40
5.9.2	<i>Información de Usos de Suelo en la Cuenca.....</i>	5-41
5.9.3	<i>Información edafológica utilizada.....</i>	5-42
5.9.4	<i>Información meteorológica utilizada</i>	5-42
5.9.5	<i>Pre-Procesamiento.....</i>	5-46
5.9.6	<i>Proceso de alimentación al modelo.....</i>	5-47
5.10	CORRIDA INICIAL DEL MODELO	5-77
5.10.1	<i>Resultados iniciales.....</i>	5-77
5.11	CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO.....	5-80
5.11.1	<i>Calibración y validación hidrológica</i>	5-83
5.12	RESULTADOS	5-91
5.12.1	<i>Estimación del caudal ecológico basado en 7Q10.....</i>	5-99
5.12.2	<i>Efectos del Cambio Climático en el Área de Estudio.....</i>	5-102
5.13	REFERENCIAS	5-112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5-1	Requerimientos y fuentes de información consultadas.....	5-36
Tabla 5-2	Estaciones Climatológicas Utilizadas.....	5-43
Tabla 5-3	Resumen de estaciones climatológicas utilizadas – precipitación (mm).....	5-44
Tabla 5-4	Resumen de estaciones climatológicas utilizadas – temperatura máxima (°C).....	5-45





Tabla 5-5 Resumen de estaciones climatológicas utilizadas – temperatura mínima (°C).....	5-46
Tabla 5-6 Transformación entre sistemas de proyección.....	5-47
Tabla 5-7 Clasificaciones INEGI y equivalencias en base de datos de SWAT.....	5-53
Tabla 5-8 Definición de pendientes utilizadas en el SWAT.....	5-56
Tabla 5-9 Balance de agua para agua residual en fuentes puntuales (m ³ /d).....	5-59
Tabla 5-10 Volúmenes Promedio a Distrito de Riego y Canal de Atequiza (m ³ /s).....	5-64
Tabla 5-11 Medidas ajustadas de los cauces principales en el modelo.....	5-65
Tabla 5-12 Medidas ajustadas de los cauces tributarios en el modelo.....	5-66
Tabla 5-13 Uso consuntivo urbano	5-68
Tabla 5-14 Valores típicos consumo de agua actividades pecuarias	5-69
Tabla 5-15 Consumo de agua bovinos y porcinos.....	5-69
Tabla 5-16 Modificaciones a las prácticas de manejo en el modelo.....	5-71
Tabla 5-17 Características de las presas contempladas en el Modelo Hidrológico.....	5-73
Tabla 5-18 Distribución mensual del agua dentro del Ciclo Hidrológico (mm).....	5-78
Tabla 5-19 Caudales de salida promedio.....	5-79
Tabla 5-20 Estadísticos para evaluación de Modelos Hidrológicos.....	5-83
Tabla 5-21 Variables utilizadas en la calibración	5-85
Tabla 5-22 Variables modificadas en la calibración hídrica	5-87
Tabla 5-23 Caudal promedio mensual* en m ³ /s.....	5-92
Tabla 5-24 Resumen de caudales – obtenidos del caudal promedio mensual (en m ³ /s).....	5-94
Tabla 5-25 Caudal Promedio Anual* en m ³ /s.....	5-96
Tabla 5-26 Resumen de Caudales – Obtenidos del Caudal Promedio Anual	5-98
Tabla 5-27 Caudal 7Q10 en la cuenca 26 del Modelo SWAT.....	5-101
Tabla 5-28 Resumen de los Escenarios de Cambio Climático en la Zona de Estudio.....	5-105
Tabla 5-29 Impacto sobre el Caudal de Salida de la Cuenca 33* en m ³ /s.....	5-107
Tabla 5-30 Impacto en la Evapotranspiración Normal y Potencial (en mm).....	5-108
Tabla 5-31 Impacto en la Precipitación (en mm).....	5-110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5-1 Subcuencas que conforman la Cuenca Río Santiago - Guadalajara	5-9
Figura 5-2 Área de estudio para modelación hidrológica.....	5-10
Figura 5-3 Componentes del Modelo SWAT.....	5-11
Figura 5-4 Esquema de Elaboración de una Modelación con SWAT.....	5-12
Figura 5-5 Diagrama de Flujo de la Operación del Modelo SWAT.....	5-14
Figura 5-6 Diagrama de Flujo Hidrológica del Modelo SWAT.....	5-15
Figura 5-7 Tipos de Nitrógeno y su Simulación en SWAT.....	5-29
Figura 5-8 Tipos de Fósforo y su Simulación en SWAT.....	5-30
Figura 5-9 Simulación de pesticidas en SWAT.....	5-31
Figura 5-10 Diagrama de Flujo de una Modelación SWAT.....	5-39
Figura 5-11 Elevaciones en el Área de estudio de acuerdo con el CEM 3.0 INEGI.....	5-40





Figura 5-12 Usos de Suelo en el Área de Estudio	5-41
Figura 5-13 Tipos de suelo de acuerdo al Mapa Mundial de Suelos (FAO)	5-42
Figura 5-14 Estaciones climatológicas utilizadas en el área de estudio.....	5-44
Figura 5-15 Trazado de cauces por medio del SIG/SWAT.....	5-49
Figura 5-16 Caudales y subcuencas en el área de estudio.....	5-50
Figura 5-17 Cuenca de estudio con entradas/salidas y presas.....	5-51
Figura 5-18 Uso de Suelo según la clasificación SWAT.....	5-55
Figura 5-19 Unidades de Respuesta Hidrológica.....	5-57
Figura 5-20 Resumen de las Unidades de Respuesta Hidrológica Creadas.....	5-58
Figura 5-21 Precipitación anual en la cuenca del río Verde 1910-2009.....	5-61
Figura 5-22 Operación Río Santiago en Ocotlán Q es Menor a 5m ³ /s.....	5-63
Figura 5-23 Operación Río Santiago en Ocotlán Q es Mayor a 5m ³ /s.....	5-63
Figura 5-24 Porcentaje de llenado anualizado por presa.....	5-75
Figura 5-25 Porcentaje de extracción anualizado por presa	5-75
Figura 5-26 Distribución global del agua dentro del ciclo hidrológico según corrida inicial (mm/año).....	5-78
Figura 5-27 Hidrograma en la salida del modelo.....	5-80
Figura 5-28 Diagrama de flujo para calibración manual del SWAT.....	5-82
Figura 5-29 Ubicación del punto de monitoreo para calibración hidrológica	5-84
Figura 5-30 Caudal en la EH San Cristóbal II del 2000-2005 (m ³ /s).....	5-84
Figura 5-31 Reducción de la incertidumbre al ajustar las variaciones en calibración.....	5-86
Figura 5-32 Resultados de la calibración hídrica del modelo.....	5-89
Figura 5-33 Caudal en la EH San Cristóbal II del 2006-2009 (m ³ /s).....	5-90
Figura 5-34 Resultados de la validación hídrica del modelo.....	5-90
Figura 5-35 Resumen de Caudales – Obtenidos del Caudal Promedio Mensual	5-95
Figura 5-36 Resumen de Caudales – Obtenidos del Caudal Promedio Anual	5-99
Figura 5-37 Ubicación del Punto de Estimación del 7Q10.....	5-100
Figura 5-38 Ejemplo de un GCM.....	5-103
Figura 5-39 Procedimiento para el escalamiento de información a partir de GCM.....	5-103
Figura 5-40 Concentración de CO ₂ en la Atmósfera según los Escenarios RCP.....	5-104
Figura 5-41 Puntos de Generación de Información por Cambio Climático.....	5-105
Figura 5-42 Impacto sobre el Caudal de Salida de la Cuenca 33.....	5-108
Figura 5-43 Impacto en la Evapotranspiración Potencial (mm).....	5-109
Figura 5-44 Impacto en la Evapotranspiración Potencial (mm).....	5-110
Figura 5-45 Impacto en la Precipitación (mm).....	5-111





Uno de los objetivos principales del presente estudio es elaborar y calibrar un modelo hidrológico que permita simular escenarios hídricos y de calidad del agua en el río Santiago, con el propósito de que sea aplicado posteriormente para la toma de decisiones y elaboración de políticas en la *Estrategia Integral para la Recuperación del Río Santiago*. En esta sección se desarrolla el proceso de integración y validación del modelo hidrológico antes mencionado.

Para facilitar la comprensión del proceso de modelación la presente sección se organizó de la siguiente manera. Primero, de manera introductoria, se establecen los alcances del balance hídrico y el modelo hidrológico a realizar, se presenta la metodología de selección del modelo y los antecedentes que llevaron a la realización del estudio. Después se presenta la delimitación del área de calibración, la metodología a seguir para la modelación hidrológica, una descripción detallada del modelo matemático empleado por el modelo hidrológico, la recopilación de la información necesaria para comenzar la modelación, el armado del modelo, la corrida inicial del modelo y sus resultados, la calibración y la validación del modelo y por último, los resultados finales obtenidos del modelo hidrológico.

5.1 ACRÓNIMOS

En este numeral se presenta un glosario de acrónimos utilizados a lo largo de la sección:

SEMADET	Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial.
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua.
CEA Jalisco	Comisión Estatal del Agua de Jalisco.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático.
GCM	Modelo Global de Circulación.
CONAPO	Consejo Nacional de Población.
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, por sus siglas en inglés (Food and Agriculture Organization).
TDR	Términos de Referencia.
SWAT	Soil and Water Assessment Tool.
BANDAS	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales.
REPDA	Registro Público de Derechos del Agua.
SIG	Sistemas de Información Geográfica.
CEM	Continuo de Elevaciones Mexicano.
DEM	Modelo Digital de Elevación, por sus siglas en inglés (Digital Elevation Model).
SMN	Sistema Meteorológico Nacional.





5.2 ALCANCES DEL BALANCE HÍDRICO Y EL MODELO HIDROLÓGICO

Los alcances del balance hídrico y el modelo hidrológico desarrollados en este estudio corresponden a los criterios definidos en los Términos de Referencia los cuales se siguieron para la integración de la información del modelo y cubrieron actividades tales como:

5.2.1 Balance Hídrico

- Recopilación, procesamiento y validación de información climatológica, hidrométrica (BANDAS), concesiones de uso de agua en el REPDA, operación y extracciones de la infraestructura hídrica existente, incluyendo el llenado de vacíos de información mediante técnicas estadísticas, geoestadísticas o con fuentes alternativas (por ejemplo, satelitales).
- Revisión de antecedentes de estudios de disponibilidad de agua superficial y subterránea, así como zonas de reservas de aguas nacionales.
- Delineación y caracterización de microcuencas (unidades hidrológicas) mediante análisis espacial SIG.
- Clasificación de la cobertura de suelo en el área de estudio: identificación de áreas de agricultura de riego, agricultura temporal y vegetación natural.
- Análisis de demandas, incluyendo escenarios de crecimiento demográfico basados en proyecciones de población de CONAPO y una distribución geográfica de la población de acuerdo a las áreas de información geoestadística básica del INEGI.
- Montaje de modelo semidistribuido de lluvia – escurrimiento con pasos de tiempo diarios, incluyendo simulación de los elementos naturales y artificiales del ciclo hidrológico (precipitación, infiltración, escurrimiento, evapotranspiración, retornos, almacenamiento, irrigación, etc.).
- Calibración y validación del modelo semidistribuido, reportando indicadores estadísticos de la calidad del modelo para representar la realidad hidrológica del área de estudio.
- Análisis de frecuencia de resultados de escurrimiento: índices de caudales de estiaje diarios bajo condiciones de estiaje extremo histórico de diez años (7Q10).
- Análisis de impactos del cambio climático sobre los caudales de estiaje.

5.2.2 Modelo Hidrológico

- Revisión de estudios antecedentes y de bases de datos de monitoreo integradas para el área.
- Evaluación y adaptación de estudios de disponibilidad de agua existentes publicados en el diario oficial de la federación.
- Selección y justificación de un modelo hidrológico.
- Construcción del modelo hidrológico, espacialmente distribuido con frecuencia temporal diaria. Se generaron imágenes raster de variables de precipitación y se integraron las variables climatológicas necesarias para el desarrollo del modelo hidrológico.
- Análisis morfológico del área de estudio utilizando para ellos las imágenes de modelos digitales de elevación y la aplicación del análisis espacial que permitió la generación de





subcuencas, corrientes de agua, dirección de flujo, acumulación de flujo y trazado de cauces.

- Caracterización y distribución de propiedades superficiales y subsuperficiales del suelo: tipo de cobertura superficial, rugosidad, textura, propiedades de infiltración, coeficientes de cultivo, coeficientes de erosión y otros parámetros dependientes del modelo hidrológico aplicado.
- Investigación e integración en el modelo de las dimensiones y las políticas de operación de las principales presas del área de estudio.
- Montaje de modelo distribuido y ejecución de simulaciones.
- Calibración y validación para lo cual se llevó a cabo la revisión de los indicadores de ajuste de los resultados en comparación con registros históricos.
- Establecimiento de escenarios de modelación y el análisis de los efectos.

5.3 SELECCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO

Los modelos son herramientas que permiten describir el comportamiento de sistemas complejos a partir de datos y a través de la simulación, permiten predecir diferentes escenarios de los impactos que se dan en una región. La modelación de la contaminación difusa forma parte de modelos de balance hidrológico en cuencas, al ser el principal medio de transporte de los contaminantes, una adecuada modelación ayuda a detectar las problemáticas, así como alternativas para atenderlos para un área determinada.

Entre los principales modelos disponibles en el mercado que son utilizados para la modelación de la contaminación difusa se encuentran:

1. AGNPS
2. AnnAGNPS
3. ANSWERS
4. ANSWERS-Continuous
5. CASC2D
6. DWSM
7. HSPF
8. KINEROS
9. MIKE SHE
10. PRMS
11. SWAT

Cada uno de ellos cuenta con ventajas y desventajas específicas, así como limitaciones, por lo que se debe escoger el modelo adecuado de acuerdo con los objetivos del estudio y el área de estudio.

Para cumplir con los objetivos del presente estudio, los términos de referencia definen las características que el modelo debe cumplir y se resumen a continuación:



- a) Escala temporal de modelación diaria o subdiaria.
- b) Delimitación de microcuencas (unidades hidrológicas) como unidad de modelación.
- c) Capacidad de representar fenómenos de transporte de agua, sedimentos y contaminantes dentro del área de estudio y sus cauces.
- d) Estimación y distribución de concentraciones de contaminantes en el agua y suelo.
- e) Reproducción aproximada aceptable del ciclo hidrológico completo dentro del área de estudio.
- f) Establecimiento de escenarios (efectos de cambios en prácticas de manejo, conservación de suelos, reducción de cargas de DBO provenientes de descargas puntuales, etc.)
- g) Licencia de uso de uso libre.
- h) Vinculación entre el cambio de uso de suelo y efectos del cambio climático con la respuesta hídrica y la calidad del agua en el área de estudio.

Para seleccionar el modelo a utilizar uno de los requisitos más importantes es la utilización de aquel modelo que sea de uso sea libre, lo que redujo el número de opciones a ser seleccionadas.

Eliminando como opción los modelos de licenciamiento de paga, se realizó una comparación entre los modelos que cumplieran los requerimientos de los términos de referencia.

En reuniones de trabajo con personal de la CEA Jalisco se ponderaron la aplicabilidad a los objetivos planteados a futuro en el uso del modelo, las ventajas y desventajas de cada uno de ellos, las facilidades que otorga para ser integrados a programas de sistemas de información geográfica, siendo los mejor evaluados: AnnAGNPS y SWAT, optándose por este último como la mejor opción para los fines de este proyecto y las acciones futuras a implementar.

Con base a las especificaciones anteriores se seleccionó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) de la Universidad de Texas A&M, el cual cumple con todas las características mencionadas, con la consideración de que el SWAT no proporciona concentración directamente, pero proporciona volúmenes máxicos a partir de los cuales se puede calcular la concentración de contaminantes en el agua o suelo.

En el presente trabajo se determinó el balance hídrico de las subcuencas que conforman el área de estudio del río Santiago mediante la herramienta de evaluación del agua y suelo SWAT (2012). Se configuró el modelo con datos de altimetría, con información del tipo de suelo y uso del suelo y vegetación, así como con las bases de datos climatológicos.



5.4 ANTECEDENTES

En la actualidad, la calidad de los recursos hídricos en el territorio nacional ha ido decreciendo, en gran parte como consecuencia de las actividades productivas que se desarrollan en las cuencas hidrográficas, ya sea de forma directa o indirecta. Las descargas directas o puntuales corresponden a las que la ubicación geográfica de la descarga de agua es identificable, mientras que las indirectas son aquellas fuentes de contaminación que su origen no es puntualmente una descarga a un cauce o cuerpo de agua, pero que por diferentes fenómenos de transporte terminan llegando a cuerpos de agua.

Las fuentes de contaminación directa son relativamente fáciles de identificar y cuantificar, por lo tanto, las acciones necesarias para atender los efectos de estas son en teoría más sencillas de llevar a cabo en comparación con las descargas indirectas dado la complejidad y no uniformidad en el comportamiento de la mismas.

Para cuencas complejas, como la cuenca de estudio, es necesario estudiar, analizar y cuantificar ambas fuentes de contaminación para determinar sus efectos en cauces y cuerpos de agua, tanto superficial como subterránea, para la correcta gestión de las mismas. Con base en lo anterior, la SEMADET ha decidido llevar a cabo el presente estudio de modelación hidrológica, sobre la cuenca del río Santiago, situado en el estado de Jalisco.

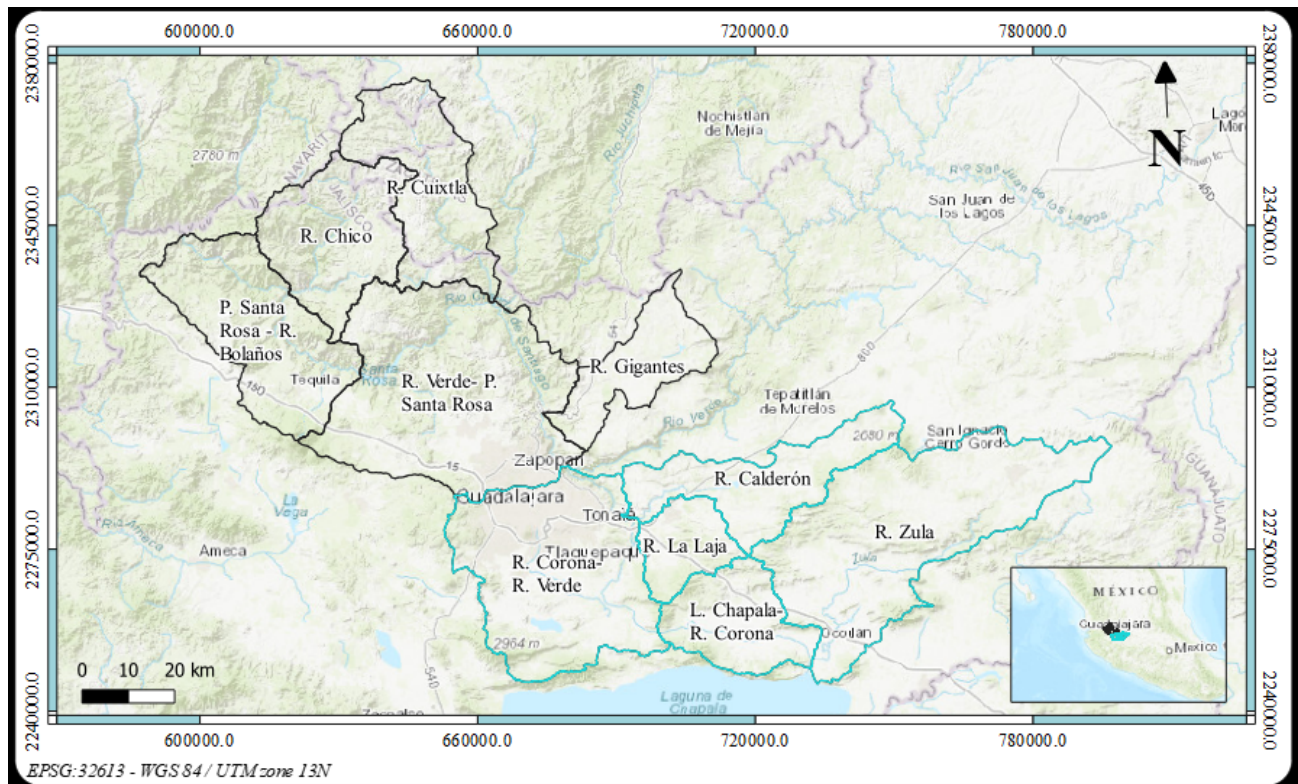
Con la finalidad de contar con un procedimiento homogéneo y replicable, que permitan a la SEMADET y diferentes organismos poder utilizar el mismo, de manera que sirva para analizar y atender de forma más eficiente los problemas que la contaminación genera en la cuenca del río Santiago-Guadalajara. El modelo de simulación considerado para este estudio consiste en el Soil and Water Assessment Tool (SWAT), utilizado ampliamente para estudios hidrológicos.

5.5 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO DE MODELACIÓN

El objetivo principal de este estudio es elaborar y calibrar un modelo hidrológico que permita simular escenarios hídricos y de calidad del agua en el río Santiago, con el propósito que sea aplicado en la planificación hidrológica en la cuenca en estudio.

De acuerdo con la Red hidrográfica la cuenca Río Santiago – Guadalajara está conformada por 10 subcuencas, las cuales son: 1) R. Zula, 2) Lago Chapala- Río Corona, 3) Río Corona- Río Verde, 4) Río La Laja, 5) Río Calderón, 6) Río Gigantes, 7) Río Cuixtla, 8) Río Chico, 9) Río Verde- Presa Santa Rosa y 10) Presa Santa Rosa – Río Bolaños (INEGI, 2010). Sin embargo, para el presente estudio fue necesario realizar ajustes dado que el área de atención prioritaria solo abarca las subcuencas del río Zula, lago Chapala – río Corona, río La Laja, río Calderón y río Corona – río Verde. Como se observa en la **Figura 5-1**.

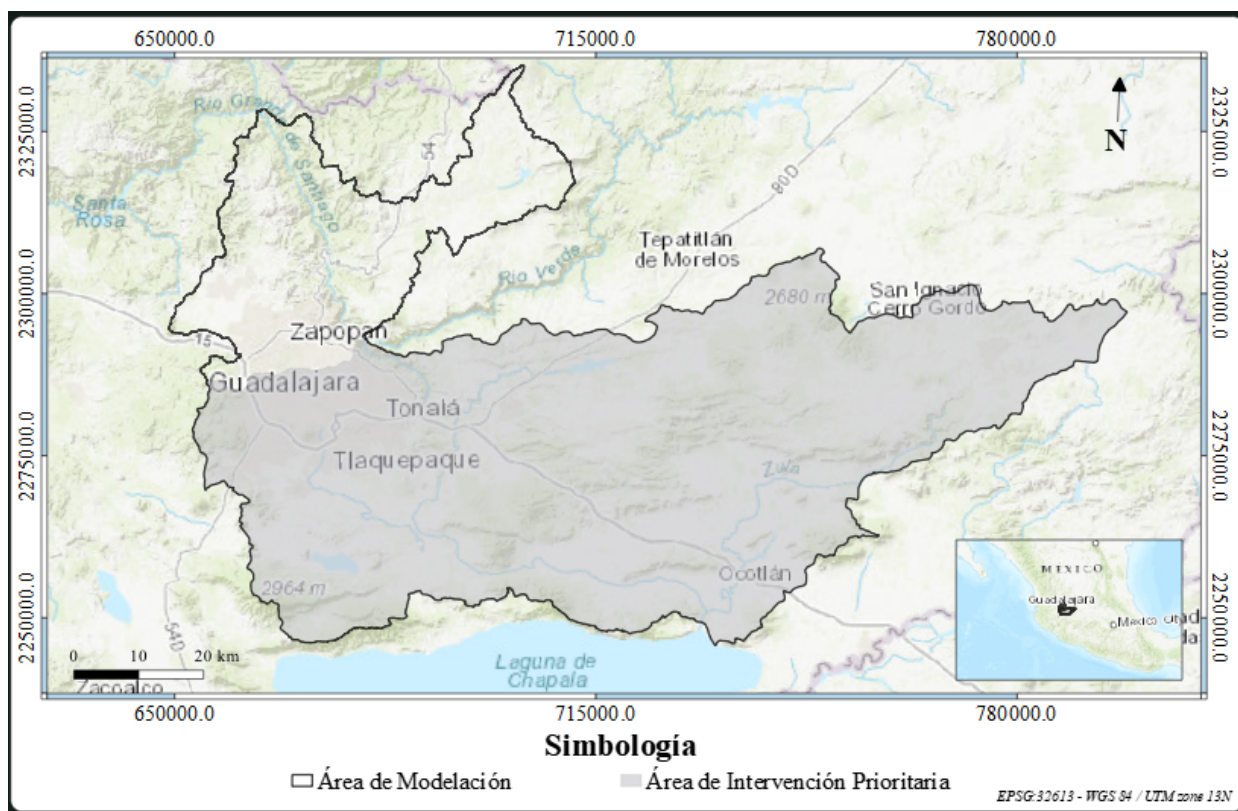
Figura 5-1 Subcuencas que conforman la Cuenca Río Santiago - Guadalajara



Fuente: Elaboración propia.

Para calibrar y modelar un modelo hidrológico de una cuenca correctamente es necesario contar con registros amplios de caudal sobre el cauce principal a modelar. Debido a que los registros de caudal proporcionados por las estaciones hidrométricas dentro del área de estudio delimitada son escasos, fue necesario buscar la estación hidrométrica con mayor cantidad de datos, que estuviera cercana al AIP, lo que requirió ampliar el área de estudio hasta la ubicación de la EH San Cristóbal II de la CONAGUA. Por lo anterior, el área de estudio para la modelación hidrológica queda delimitada de la siguiente manera (**Figura 5-2**).

Figura 5-2 Área de estudio para modelación hidrológica



Fuente: Elaboración propia.

5.5.1 Localización Geográfica

La cuenca de estudio se localiza en el Estado de Jalisco, dentro de la región hidrológica Lerma-Chapala-Santiago, entre las coordenadas 20°18'48" y 21°06'25" Latitud Norte y 102°12'15", 103°34'07" de Longitud Oeste.

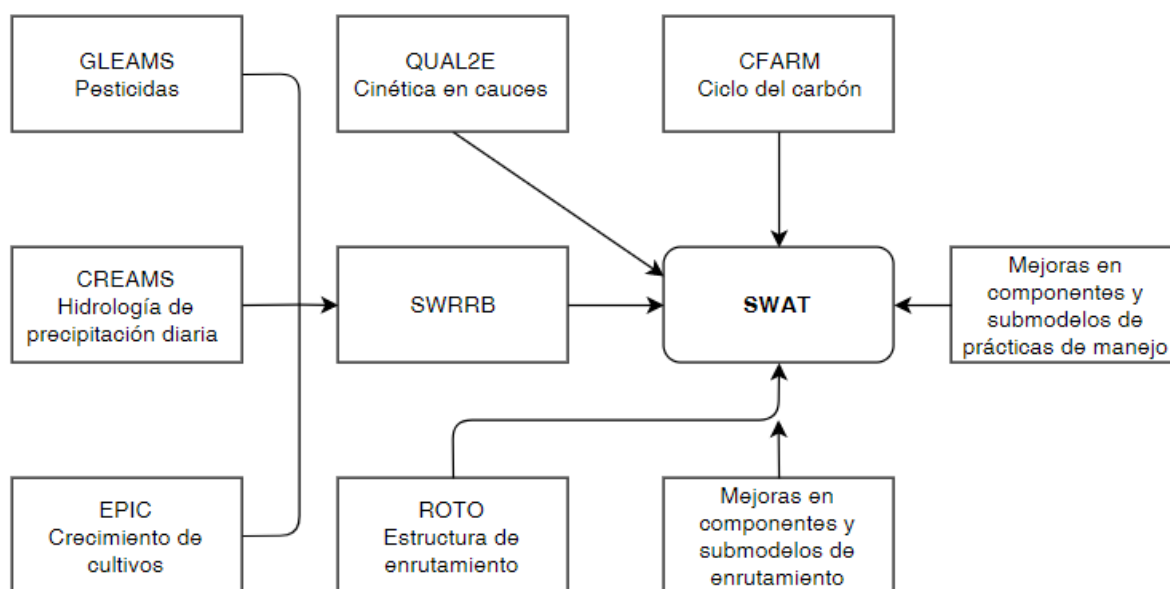
5.6 METODOLOGÍA PARA LA MODELACION HIDROLÓGICA

El SWAT fue desarrollado por la USDA (Departamento de Agricultura de EEUU) y por la Universidad de Texas A&M (TAMU), para predecir el impacto de las prácticas de manejo de la tierra, en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation, Version 2005, 2005).

El desarrollo de SWAT es una continuación de la experiencia de modelado del Servicio de Investigación Agrícola del USDA (USDA-ARS, por sus siglas en inglés) que abarca un período de aproximadamente 30 años. Los orígenes tempranos de SWAT se pueden remontar a los modelos previamente desarrollados de USDA-ARS (**Figura 5-3**) incluyendo el modelo de los productos químicos de la escorrentía, y de la erosión de los sistemas de gestión agrícola (Knisel, 1980); GLEAMS (Leonard, Knisel, & Still, 1987) y el modelo EPIC (Izaurrealde, McGill, Rosenberg, & Quiroga Jakas, 2006), que originalmente se llamó Erosion Productivity Impact Calculator (Williams, The Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) Model: A case History, 1990).

El modelo SWAT actual es un descendiente directo del modelo de Simulador de Recursos Hídricos en las Cuencas Rurales (SWRRB) (Arnold & Williams, Validation of SWRRB: Simulator for Water Resources in Rural Basins., 1987), que fue diseñado para simular los impactos de la gestión en el agua y el movimiento de sedimentos para las cuencas rurales sin riego en los Estados Unidos. SWAT ha sido objeto de una continua revisión y ampliación de sus capacidades desde su creación a principios de los 1990, incluyendo la incorporación de rutinas cinéticas de flujo a partir del modelo QUAL2E (Brown & Barnwell, 1987), así como el modelo Routing Outputs to Outlet (ROTO) desarrollado por (Arnold & Maidment, 1995).

Figura 5-3 Componentes del Modelo SWAT



Fuente: Modificado de SWAT, Model use, calibration and validation. (Arnold, y otros, 2012).

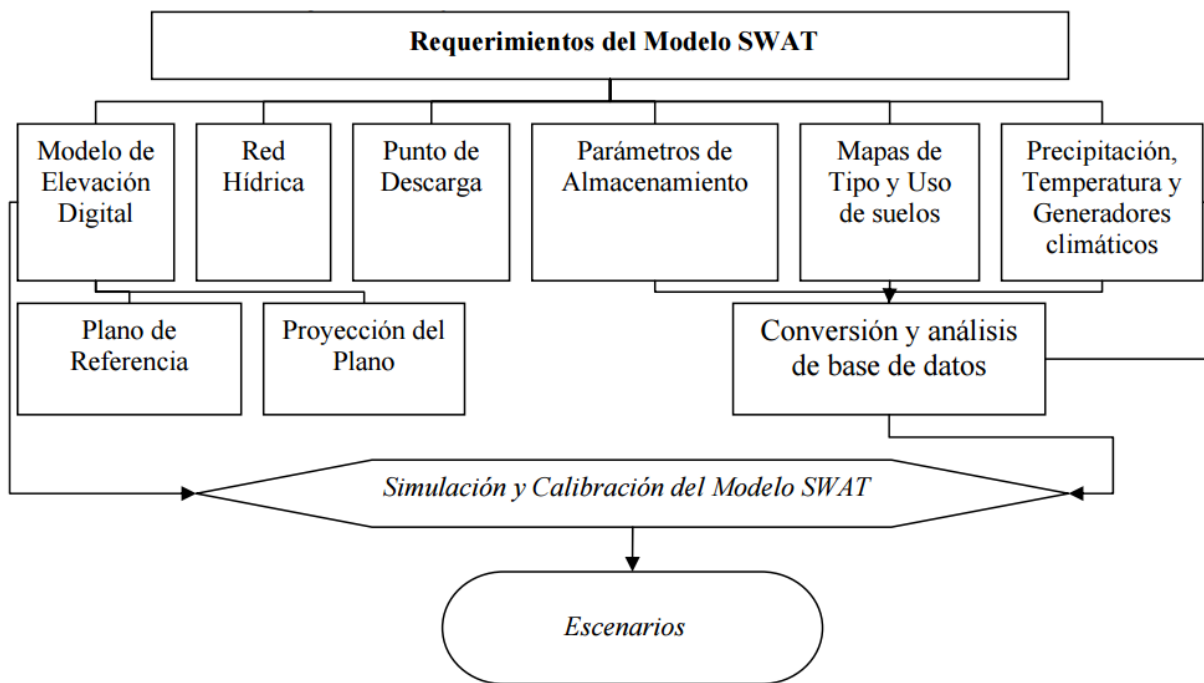


El SWAT está basado físicamente en un modelo de tipo continuo en el tiempo, es decir para procesos hidrológicos a largo plazo. El modelo SWAT es de uso libre y se puede descargar desde su página oficial (<https://swat.tamu.edu/>) para su uso con Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Para modelar sistemas hidrológicos SWAT requiere información sobre clima, propiedades del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo de la tierra en la cuenca, para usar todo esto como datos de entrada. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua y sedimento, entre otros, son modelados directamente por SWAT.

La simulación hidrológica de la cuenca en SWAT, puede ser separada en dos grandes partes, la primera es la fase terrestre del ciclo hidrológico, la cual controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas que ingresan al canal principal de cada subcuenca, y la segunda fase, que define el movimiento del agua, sedimentos, etc., a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia la salida o vertedero (Uribe, 2010). El ciclo hidrológico simulado por SWAT está basado en la ecuación de balance (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation, Version 2005, 2005). En la **Figura 5-4** se esquematiza de manera simplificada el proceso de modelación con SWAT.

Figura 5-4 Esquema de Elaboración de una Modelación con SWAT



Fuente: (Rodríguez, Mojica, Caballero, Franco, & Domínguez, 2006).



SWAT opera en pasos de tiempo diarios y está diseñado para predecir el impacto del uso del suelo y manejo del agua, sedimentos y movimiento de químicos agrícolas en las cuencas hidrográficas. El modelo está basado en procesos, es computacionalmente eficiente y capaz de una simulación continua en periodos a largo plazo.

Los principales componentes del modelo son el clima, la hidrología, la temperatura y las propiedades del suelo, el crecimiento de las plantas, los nutrientes, los plaguicidas, las bacterias y los patógenos y el manejo de la tierra (véase **Figura 5-6**). En SWAT, una cuenca está dividida en múltiples sub-cuencas, que luego se subdividen en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) que consisten en características homogéneas de uso de la tierra, manejo, topografía y suelo. Las HRU se representan como un porcentaje del área de la subcuenca y pueden no ser contiguas o espacialmente identificables dentro de una misma simulación SWAT. Alternativamente, una cuenca puede ser subdividida en sólo subcuencas.

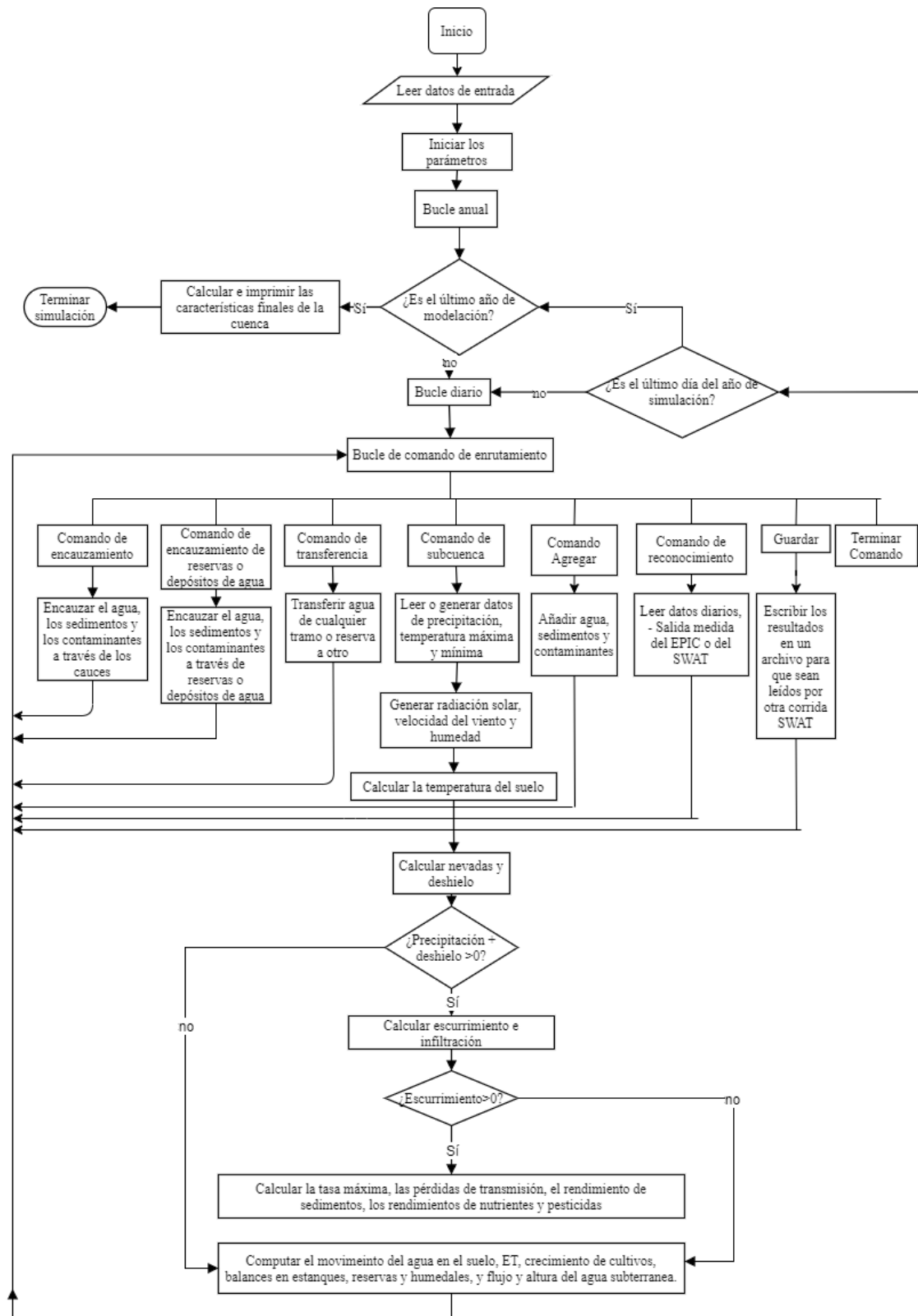
El balance hídrico es la fuerza impulsora detrás de todos los procesos en SWAT porque es este el que afecta tanto el crecimiento de las plantas, el movimiento de sedimentos, nutrientes, pesticidas y patógenos. Los detalles de estos procesos se dan en la documentación teórica SWAT (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Theoretical Documentation. Version 20009, 2011); sin embargo, a continuación, se describen estos procesos de simulación del SWAT.

El ciclo hidrológico está impulsado por el clima y permite entradas de humedad y energía, como la precipitación diaria, temperatura máxima / mínima del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa, que controlan el balance hídrico.





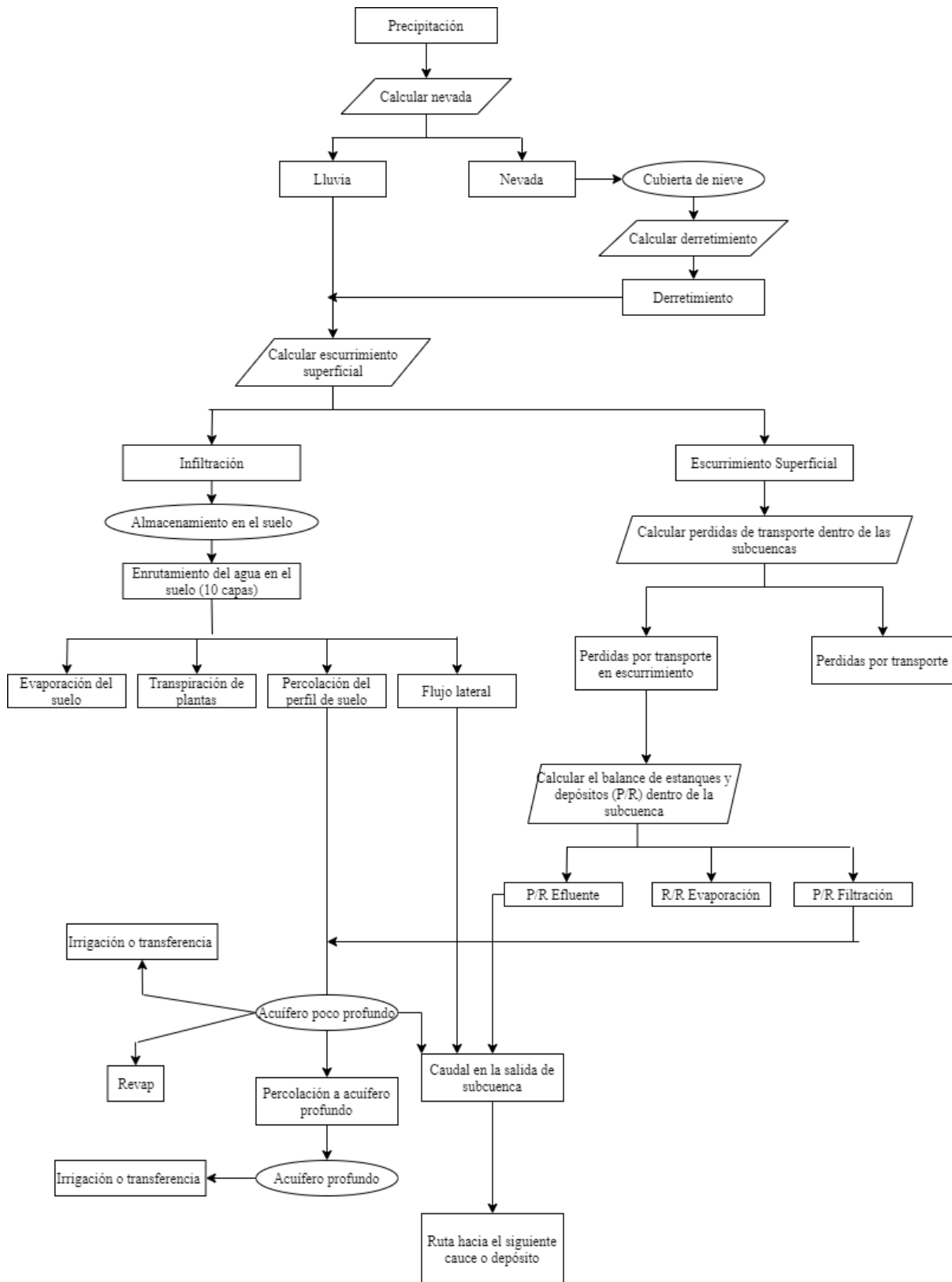
Figura 5-5 Diagrama de Flujo de la Operación del Modelo SWAT



Fuente: Modificado a partir de (Arnold J., Srinivasan, Muttiah, & Williams, 1998).



Figura 5-6 Diagrama de Flujo Hidrológica del Modelo SWAT



Fuente: Modificado a partir de (Arnold J. , Srinivasan, Muttiah, & Williams, 1998).



SWAT puede leer datos climatológicos observados directamente desde archivos o generar datos simulados en tiempos de ejecución de los datos mensuales registrados de forma estadística. A partir de la información proporcionada SWAT simula los principales procesos hidrológicos dentro de la cuenca de estudio, algunos de los cuales se enlistan a continuación:

- Esgurrimiento superficial
- Infiltración
- Evapotranspiración
- Flujo lateral
- Redistribución del agua dentro del perfil del suelo
- Consumos
- Retorno de flujo
- Recarga por filtración desde la superficie ya sea por cuerpos de agua, estanques y canales tributarios

SWAT utiliza un único modelo de crecimiento de plantas para simular todo tipo de cubierta de tierra, diferenciando entre plantas anuales y perennes. El modelo de crecimiento de la planta se utiliza para evaluar la eliminación de agua y nutrientes de la zona, ocasionada por la transpiración y producción de biomasa / rendimiento. SWAT utiliza la tecnología de ecuación de pérdida de suelo (MUSLE) (Williams & Brendt, Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology, 1977) para predecir el movimiento de sedimentos en el terreno. En adición, SWAT modela el movimiento y la transformación de varias formas de nitrógeno y fósforo, pesticidas y sedimentos en la cuenca. SWAT permite al usuario definir las prácticas de gestión que tienen lugar en cada HRU.

Una vez que las cargas de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas de la fase terrestre se determinan, estas cargas son encaminadas a través de cuerpos de agua hacia el cauce principal. El balance hídrico de los embalses incluye la afluencia, el desagüe, la lluvia en la superficie, evaporación, filtración desde el fondo del depósito y desviaciones.

Las ecuaciones completas del modelo se dan en la documentación teórica SWAT (<http://swatmodel.tamu.edu>) y en (Arnold J. , Srinivasan, Muttiah, & Williams, 1998).

Gassman, Reyes y Green presentan una visión general de: insumos climáticos y equilibrio hidrológico de HRU; cultivos, insumos de manejo y pérdidas de contaminantes a nivel HRU; y flujo y enrutamiento de contaminantes (Gassman, Reyes, & Green, 2007).



5.7 DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Los componentes más importantes de cada subcuenca pueden ser catalogados en ocho áreas o divisiones: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento vegetal, nutrientes, pesticidas y prácticas de manejo. A continuación, se describen las principales ecuaciones que rigen estos procesos del modelo.

A continuación, se describen los modelos matemáticos de los principales procesos del modelo SWAT de acuerdo con Arnold, J.G et Al (Arnold, Gassman, & White, New Developments in the SWAT Ecohydrology Model, 2010).

5.7.1 Hidrología

El SWAT integra un número considerable de submodelos; sin embargo, su fundamento es el balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca, este balance se calcula con la ecuación (1):

$$SW_t = sw + \Sigma(R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

Donde:

SW_t	Contenido de agua en el suelo en el día t
sw	Agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en el suelo a 0.1-bar menos el contenido de agua a 15-bar, t es el tiempo en días
R	Precipitación diaria
Q	Cantidad de escorrentía diaria
ET	Evapotranspiración diaria
P	Percolación diaria
QR	Flujo de retorno o flujo base

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración de diferentes suelos y plantíos.

Escorrentía Superficial

La escorrentía se predice de manera separada para cada Unidad de Respuesta Hidrológica o HRU, por sus siglas en inglés, (las HRU son la unidad básica de área para el cálculo del modelo, descrita en la sección **5.9.6 Proceso de Alimentación al Modelo, Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica**) y es canalizada para obtener, ya en conjunto, la escorrentía total de la cuenca. Esto permite al modelo aumentar su precisión y por ende una mejor descripción del balance de agua en la cuenca.

La escorrentía superficial se predice para la precipitación diaria usando la ecuación del número de la curva SCS (USDA-SCS, 1972).





$$Q = \frac{(R-0.2s)^2}{R+0.8s}; R > 0.2s \quad (2)$$

$$Q = 0.0; R \leq 0.2s \quad (3)$$

Donde:

Q	Escorrentía superficial diaria (mm),
R	Precipitación diaria (mm)
s	Parámetro de retención

El parámetro de retención, s , varía entre las cuencas debido a que los suelos, el uso de la tierra, el manejo y la pendiente varían con el tiempo debido a cambios en el contenido de agua en el suelo. El parámetro s está relacionado con el número de curva (CN) por la ecuación SCS (USDA-SCS, 1972).

$$s = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4)$$

La constante 254 está dada en mm. Las fluctuaciones en el contenido de agua del suelo hacen que el parámetro de retención cambie según la ecuación:

$$s = s_1 \left(1 - \frac{FFC}{FFC + \exp[w_1 - w_2(FFC)]} \right) \quad (5)$$

Donde:

s_1	Valor de s asociado con CN_1
$FFCf$	Fracción de capacidad en campo
w_1 y w_2	Parámetros de forma

La fracción de capacidad en campo (FFC) se calcula con la siguiente ecuación:

$$FFC = \frac{SW - WP}{FC - WP} \quad (6)$$

Donde:

SW	Contenido de agua del suelo en la zona de raíces (mm)
WP	Contenido de agua del punto de marchitamiento (mm), (1.500 kPa para muchos suelos)
FC	Capacidad del contenido de agua en el campo (mm) (33 kPa para muchos suelos)





Los valores para w_1 y w_2 se obtienen a partir de una solución simultánea de la ecuación para s de acuerdo con los supuestos que: $s = s_2$ cuando $FFC = 0.6$ y $s = s_3$, cuando $(SW-FC) / (PO-FC) = 0.5$.

Hay dos opciones para estimar el pico de tasa de escorrentía - la fórmula racional modificada y el método SCS TR-55 (USDA-SCS, 1986). Un elemento estocástico se incluye en la ecuación racional para permitir la simulación realista de las tasas de escorrentía máxima, dadas sólo las precipitaciones diarias y la intensidad mensual de lluvias.

Percolación

El componente de percolación utiliza una técnica de encaminamiento de almacenamiento combinada con un modelo de flujo de fisuras para predecir el flujo a través de cada capa de suelo. Una vez que el agua se filtra por debajo de la zona de raíz, se pierde de la cuenca (se convierte en agua subterránea o aparece como flujo de retorno en cuencas aguas abajo). La técnica de enrutamiento de almacenamiento se basa en la ecuación 7:

$$SW_i = SW_{ei} \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right) \quad (7)$$

Donde:

SW_{ei} y SW_i	Contenido de agua del suelo (mm) al principio y al final del día, respectivamente
Δt	Intervalo de tiempo (24 h)
TT_i	Tiempo de viaje (h) a través de la capa i

Por lo tanto, la percolación se puede calcular restando SW_{ei} y SW_i

$$O_i = SW_{oi} \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_i}\right) \right] \quad (8)$$

Donde:

O	Tasa de percolación (mm d ⁻¹)
-----	---

El tiempo de recorrido, TT_i , se calcula para cada capa de suelo con la ecuación de almacenamiento lineal:

$$TT_i = \frac{(SW_i - FC_i)}{H_i} \quad (9)$$

Donde:

H_i	Conductividad hidráulica en mm h ⁻¹
FC	Capacidad de campo menos el punto de marchitamiento del contenido de agua para la capa i en mm





La conductividad hidráulica varía desde el valor de conductividad saturado, en estado de saturación, hasta casi cero a capacidad de campo.

$$H_i = SC_i \left(\frac{SW_i}{UL_i} \right)^{\beta_i} \quad (10)$$

Donde:

SC_i Conductividad saturada para la capa i (mm h^{-1}) y es un parámetro que hace H_i acercarse a cero cuando SW_i se aproxima a FC_i .

Para estimar β se utiliza la ecuación 11:

$$\beta_i = \frac{-2.655}{\log_{10} \left(\frac{FC_i}{UL_i} \right)} \quad (11)$$

Donde la constante (-2.655) se estableció para asegurar $H_i = 0.002SC_i$ a capacidad de campo.

Un flujo ascendente puede ocurrir cuando una capa inferior excede la capacidad de campo. El movimiento de agua desde una capa inferior del suelo a una capa superior adyacente está regulado por las relaciones de agua de suelo a campo de las dos capas. La percolación también se ve afectada por la temperatura del suelo. Si la temperatura en una capa determinada es 0°C o inferior, no se permite la percolación de esa capa.

Flujo Subsuperficial Lateral

El flujo subsuperficial lateral en el perfil del suelo (0-2 m) se calcula simultáneamente con la percolación. Un modelo de almacenamiento cinemático (Sloan et al. 1983) se utiliza para predecir el flujo lateral en cada capa del suelo.

$$q_{lat} = 0.024 \frac{(2 S SC \sin(\alpha))}{\theta_d L} \quad (12)$$

Donde:

q_{lat} Flujo lateral (mm d^{-1})
 S Volumen drenable del agua del suelo (m h^{-1})
 α Pendiente (mm)
 θ_d Porosidad drenable (mm^{-1})
 L Longitud del flujo (m)





Si la zona saturada se eleva por encima de la capa del suelo, se permite que el agua fluya hacia la capa superior (de vuelta a la superficie para la capa superior del suelo). Para dar cuenta de múltiples capas, el modelo se aplica a cada capa de suelo independientemente, comenzando en la capa superior.

Flujo de Agua Subterránea

La contribución del flujo de agua subterránea al caudal total se simula creando un almacenamiento de acuífero poco profundo. El balance hídrico para el acuífero se describe en la ecuación 13:

$$Vsa_i = Vsa_i + Rc - revap - rf - perc_{gw} - WU_{SA} \quad (13)$$

Donde:

V_{sa}	Almacenamiento superficial del acuífero (mm)
R_c	Recarga (percolación desde el fondo del perfil del suelo) (mm)
$revap$	Absorción de la raíz del acuífero superficial (mm)
rf	Flujo de retorno (mm)
$perc_{gw}$	Percolado hasta el acuífero profundo (mm)
WU_{SA}	Uso del agua (retirada) del acuífero superficial (mm)
i	Día

El flujo de retorno desde el acuífero poco profundo hasta la corriente se estima con la ecuación 14 (Arnold et al. 1993):

$$rf_i = rf_i e^{-\alpha \Delta t} + Rc(1.0 - e^{-\alpha \Delta t}) \quad (14)$$

Donde:

α	Constante de proporcionalidad del factor de reacción
----------	--

La relación de la altura de la capa freática (Arnold et al. 1993) es:

$$h_i = h_{i-1} e^{-\alpha \Delta t} + \frac{Rc}{0.8\mu\alpha} (1.0 - e^{-\alpha \Delta t}) \quad (15)$$

Donde:

h	Altura de la capa freática, (m por encima del fondo de la corriente)
μ	Rendimiento específico





Evapotranspiración

El modelo ofrece tres opciones para estimar posibles evapotranspiraciones: Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), Priestley - Taylor (Priestley y Taylor, 1972) y Penman - Monteith (Monteith, 1965). El método de Penman-Monteith requiere de radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa como entradas. Si los datos de velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar no están disponibles (los valores diarios pueden generarse a partir de valores promedio mensuales), los métodos de Hargreaves o Priestley-Taylor proporcionan opciones que dan resultados realistas en la mayoría de los casos. La evapotranspiración de acuerdo con el método de Penman-Monteith se estima de la siguiente manera:

$$E_0 = \frac{\delta(ho+S) + \rho_a C_p (e_s - e_a) / r_a}{HV[\delta + \gamma(r_a - r_c / r_a)]} \quad (16)$$

Donde:

E_0	Evaporación ($\text{g m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
HV	Calor latente de vaporización (J g^{-1})
ho	Radiación neta ($\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
δ	Pendiente de la función de densidad de vapor de saturación ($\text{g m}^{-3}\text{C}^{-1}$)
S	Flujo de calor del suelo ($\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
γ	Constante psicométrica ($\text{g m}^{-3}\text{C}^{-1}$)
ρ_a	Densidad del aire (g m^{-3})
C_p	Calor específico del aire ($\text{J g}^{-1}\text{C}^{-1}$)
e_s	Densidad de vapor de saturación (g m^{-3})
e_a	Densidad de vapor de aire (g m^{-3})
r_a	Resistencia aerodinámica para la transferencia de calor y vapor (s m^{-1})
r_c	Resistencia de la cubierta para transferencia de vapor (s m^{-1})

El método de Priestley-Taylor (1972) proporciona una estimación de la evaporación potencial basada únicamente en la temperatura y la radiación, la cual es:

$$E_0 = 1.28 \left(\frac{h_0}{HV} \right) \left(\frac{\delta}{\delta + \gamma} \right) \quad (17)$$

El calor latente de vaporización, la presión de vapor de saturación y la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación se estiman con la función de temperatura (Amold et al. 1993).

El método de Hargreaves y Samani (1985) estima la evapotranspiración potencial como una función de la radiación extraterrestre y la temperatura del aire. El método Hargreaves fue modificado para su uso en SWAT mediante el aumento de la diferencia de temperatura exponente de 0,5 a 0,6. Además, la radiación extraterrestre es reemplazada por RAMX (máxima radiación solar posible en la superficie terrestre) y el coeficiente se ajusta de 0.0023 a 0.0032 para una conversión adecuada. La ecuación modificada es:





$$E_0 = 0.0032 \left(\frac{RAMX}{HV} \right) (T + 17.8)(T_{mx} - T_{mn})^{0.6} \quad (18)$$

Donde:

T_{mx} y T_{mn} Temperaturas del aire máximo y mínimo diario en °C

El modelo calcula la evaporación de los suelos y plantas de forma separada, como se describe en Ritchie (1972).

La evaporación potencial del agua del suelo se estima como una función de la evapotranspiración potencial y del índice de área foliar (área de hojas de la planta relativa a la superficie del suelo). La evaporación real del agua del suelo se calcula utilizando las funciones exponenciales de la profundidad del suelo y del contenido de agua. La evaporación del agua de la planta se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial y del índice del área de la hoja.

Derretimiento de Nieve

Si hay nieve, puede derretirse en días en que la segunda capa del suelo exceda una temperatura de 0°C. La nieve se funde en función de la temperatura del paquete de nieve utilizando la ecuación

$$SML = T(1.52 + 0.54SPT) \quad (19)$$

$$0.0 \leq SML \leq SNO$$

Donde:

SML Tasa de derretimiento de la nieve en mm*d⁻¹
 SNO Nieve presente en mm de agua
 T Temperatura media diaria del aire en °C
 SPT Temperatura de la capa de nieve en °C

La temperatura del paquete de nieve se calcula con la ecuación:

$$SPT = \min(T_s, T(2)) \quad (20)$$

Donde

T_s Temperatura en la parte superior de la capa de nieve
 $T(2)$ Temperatura en el centro de la capa de suelo 2





La nieve derretida se trata igual que la lluvia para estimar el volumen de escorrentía y la percolación, y la tasa de escorrentía máxima se calcula suponiendo que la precipitación sea uniformemente distribuida durante 24 horas.

Pérdidas de Transmisión

Muchas cuencas semiáridas tienen canales aluviales que sustraen una parte considerable del caudal (Lane, 1982). Las sustracciones, o pérdidas de transmisión, reducen los volúmenes de escorrentía cuando las olas de inundación viajan río abajo. El método de Lane descrito en USDA (1983) se utiliza para estimar pérdidas de transmisión. Las pérdidas de canal son una función del ancho de canal y longitud y duración de flujo. Tanto la escorrentía como la velocidad máxima se ajustan cuando se producen pérdidas de transmisión.

Estanques

Los estanques de granja son estructuras pequeñas que ocurren dentro de una subcuenca. El almacenamiento del estanque se simula como una función de la capacidad del estanque, entradas y salidas diarias, filtraciones y evaporación. Se supone que los estanques sólo tienen vertederos de emergencia. Las entradas necesarias son la capacidad y el área de superficie. La superficie por debajo de la capacidad se estima como una función no lineal de almacenamiento.

5.7.2 Clima

Las variables meteorológicas para impulsar el balance hidrológico son la precipitación, la temperatura del aire, la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa. Si los datos de precipitación diaria y temperatura máxima / mínima están disponibles, se pueden introducir directamente. Si no, el generador meteorológico puede simular la precipitación diaria y la temperatura. La radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa son siempre simuladas. Se puede simular un conjunto de variables meteorológicas para toda la cuenca o se pueden simular diferentes condiciones meteorológicas para cada subcuenca.

Precipitación

El modelo de precipitación desarrollado por Nicks en 1974 es un modelo de cadena de Markov de primer orden (Nicks, 1974). Por lo tanto, la entrada al modelo debe incluir las probabilidades mensuales de recibir la precipitación si el día anterior estaba seco y si el día anterior estaba húmedo. Dado el estado húmedo-seco, el modelo determina estocásticamente si ocurre o no precipitación. Cuando se produce un evento de precipitación, la cantidad se determina a partir de una distribución de precipitación diaria normal asimétrica. La cantidad de precipitación diaria se comparte entre la precipitación y la nevada utilizando la temperatura media diaria del aire.

Temperatura Ambiente y Radiación Solar

La temperatura máxima y mínima diaria del aire y la radiación solar se generan a partir de una distribución normal corregida para el estado de probabilidad húmedo-seco. El factor de corrección se utiliza para proporcionar más desviación en las temperaturas y la radiación cuando el clima cambia y para los días de lluvia. Por el contrario, las desviaciones son menores en días secos. Los factores de corrección se calculan para asegurar que las desviaciones estándar a largo plazo de las variables diarias se mantengan.



Velocidad del Viento y Humedad Relativa

La velocidad diaria del viento se simula utilizando una ecuación exponencial modificada, utilizando la velocidad media mensual del viento como entrada. El modelo de humedad relativa simula la humedad relativa media diaria a partir del promedio mensual utilizando una distribución triangular. Al igual que con la temperatura y la radiación, la humedad relativa media diaria se ajusta para tener en cuenta los efectos de los días húmedos y secos.

5.7.3 Sedimentación

Para la producción de sedimentos se calcula para cada subcuenca con la ecuación universal modificada de pérdida de suelos (MUSLE) (Williams & Brendt, Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology, 1977).

$$Y = 11.8(V q_p)^{0.56}(K)(C)(PE)(LS) \quad (21)$$

Donde:

Y	Rendimiento de sedimentos de la subcuenca en t
V	Columna de escorrentía superficial para la subcuenca en m^3
q_p	Caudal máximo para la subcuenca en m^3s^{-1}
K	Factor de erodibilidad del suelo
C	Factor de manejo del cultivo
PE	Factor de práctica para control de la erosión
LS	Factor de pendiente de la longitud y la pendiente

El factor LS se calcula con la ecuación (Wishmeier & Smith, 1978):

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.1}\right)^{\xi} (65.41S^2 + 4.565S + 0.065) \quad (22)$$

El exponente ξ varía con la pendiente (S) y se calcula usando la ecuación:

$$\xi = 0.6[1 - \exp(-35.835S)] \quad (23)$$

El factor de manejo del cultivo, C , se evalúa para todos los días en que se produce la escorrentía usando la ecuación:

$$C = \exp(-0.2231 - CVM)\exp(-0.00115CV) + CVM \quad (24)$$

Donde:

CM	Cubierta del suelo (biomasa sobre el suelo + residuos en $kg*ha^{-1}$)
CVM	Valor mínimo de C





El valor de la CVM se calcula a partir del factor C medio anual usando la ecuación:

$$CVM = 1.463 \ln(CVA) + 0.1034 \quad (25)$$

El valor de CVA para cada cultivo se determina a partir tablas preparadas por Wischmeier y Smith (1978). Los valores de K están contenidos en la base de datos de SCS Soils-5, y los factores PE pueden estimarse para cada subcuenca utilizando la información contenida en Wischmeier y Smith (1978)

5.7.4 Temperatura del Terreno

La temperatura media diaria del suelo se simula en el centro de cada capa del suelo para su uso en hidrología y descomposición de residuos. La temperatura de la superficie del suelo se calcula utilizando la temperatura máxima y mínima diaria del aire y la cobertura de nieve, planta y residuo para el día de interés más los cuatro días anteriores. La temperatura del suelo se simula para cada capa usando una función de profundidad de amortiguación, temperatura de superficie y temperatura media anual del aire. La profundidad de amortiguación depende de la densidad aparente y del agua del suelo.

5.7.5 Modelo de Crecimiento Vegetal

El modelo de cultivo utilizado por SWAT es una simplificación del modelo de cultivo EPIC (Williams, Jones, & Dyke, A Modeling Approach to Determining the Relationship Between Erosion and Soil Productivity, 1984). SWAT utiliza los conceptos EPIC del desarrollo de cultivos fenológicos basados en unidades de calor acumuladas diariamente, el índice de cosecha para dividir el rendimiento de grano, y el enfoque de Monteith (Monteith, 1977) para la biomasa potencial y los ajustes del estrés hídrico y temperatura. Se utiliza un solo modelo para simular todos los cultivos considerados y SWAT es capaz de simular el crecimiento de los cultivos tanto anuales como perennes.

Los cultivos anuales crecen desde la fecha de siembra hasta la fecha de cosecha o hasta que las unidades de calor acumuladas igualan las unidades de calor potencial para el cultivo. Los cultivos perennes mantienen sus sistemas radiculares a lo largo del año, aunque la planta puede adormecer después de las heladas.

El desarrollo fenológico del cultivo se basa en acumulación diaria de unidades de calor. Se calcula utilizando la ecuación:

$$HU_i = \left(\frac{T_{mx,i} + T_{mn,i}}{2} \right) - T_{bj}; HU_k \geq 0 \quad (26)$$

Donde:

HU Valores de las unidades de calentamiento
 T_{mx} y T_{mn} , Temperatura máxima y temperatura mínima en °C en el día i



T_b Temperatura base específica del cultivo en °C (no hay crecimiento en o debajo de T_b) para la cosecha j

El índice de unidad de calor (HU_i), el cual varía de 0 en la siembra a 1 a la madurez fisiológica, se calcula como sigue:

$$HU_i = \frac{\sum_{k=1}^i HU_k}{PHU_j} \quad (27)$$

Donde:

HU_i Índice de unidad de calor para el día i
 PHU Unidades de calor potenciales requeridas para la madurez del cultivo j

El valor de PHU es calculado por el modelo a partir de las fechas normales de siembra y cosecha.

Crecimiento Potencial

La intercepción de la radiación solar se estima con la ecuación de la ley de Beer (Monsi & Sakei, 1953).

$$PAR_i = 0.02092(RA_i)[1 - \exp(-0.65LAI_i)] \quad (28)$$

Donde:

PAR Radiación fotosintética activa en $MJ \cdot m^{-2}$
 RA Radiación solar en Ly
 LAI Índice de área foliar
 i Día del año

Usando el enfoque de Monteith (Monteith, 1977), el aumento potencial en la biomasa para un día se puede estimar con la ecuación:

$$\Delta B_{p,i} = (BE_j)(PAR_j) \quad (29)$$

Donde:

ΔB_p Aumento potencial diario de la biomasa total en $kg \cdot ha^{-1}$
 BE Parámetro de cultivo para convertir la energía en biomasa en $kg \cdot m^{-2} \cdot ha^{-1} \cdot MJ$

La biomasa potencial se ajusta diariamente debido a las tensiones causadas por el agua, los nutrientes y la temperatura.





LAI se simula como una función de las unidades de calor y la biomasa. LAI se estima con las ecuaciones:

$$LAI_i = \frac{(LAI_{mx})(B_{AG})}{B_{AG} + \exp(9.5 - 0.0006B_{AG})}; HIU_i \leq DL \quad (30)$$

$$LAI_i = (16)(LAI_{mx})(1 - HIU_i)^2; HIU_i > DL_i \quad (31)$$

Donde:

LAI_{mx} Potencial máximo de LAI para el cultivo

B_{AG} Biomasa por encima de la tierra en kg ha⁻¹

$DLAI$ Fracción de la estación de crecimiento cuando el LAI comienza a disminuir (= 0.75)

La fracción de biomasa total dividida en el sistema radicular disminuye normalmente de 0,3 a 0,5 en la plántula a 0,05 a 0,20 en la madurez (Jones, 1985). El modelo estima que la fracción de la raíz varía linealmente desde 0,4 en la aparición hasta 0,2 en la madurez. Así, la fracción de raíz diaria se calcula con la ecuación:

$$RWT_i = (0.4 - 0.2HIU_i) \quad (32)$$

Donde:

RWT Fracción de biomasa total dividida en el sistema de raíces el día i

Así, B_{AG} se calcula a partir de la ecuación:

$$B_{AG} = (1 - RWT_i)(B_{TOTi}) \quad (33)$$

Donde:

B_{TOT} Biomasa total en kg ha⁻¹ el día i

5.7.6 Nutrientes

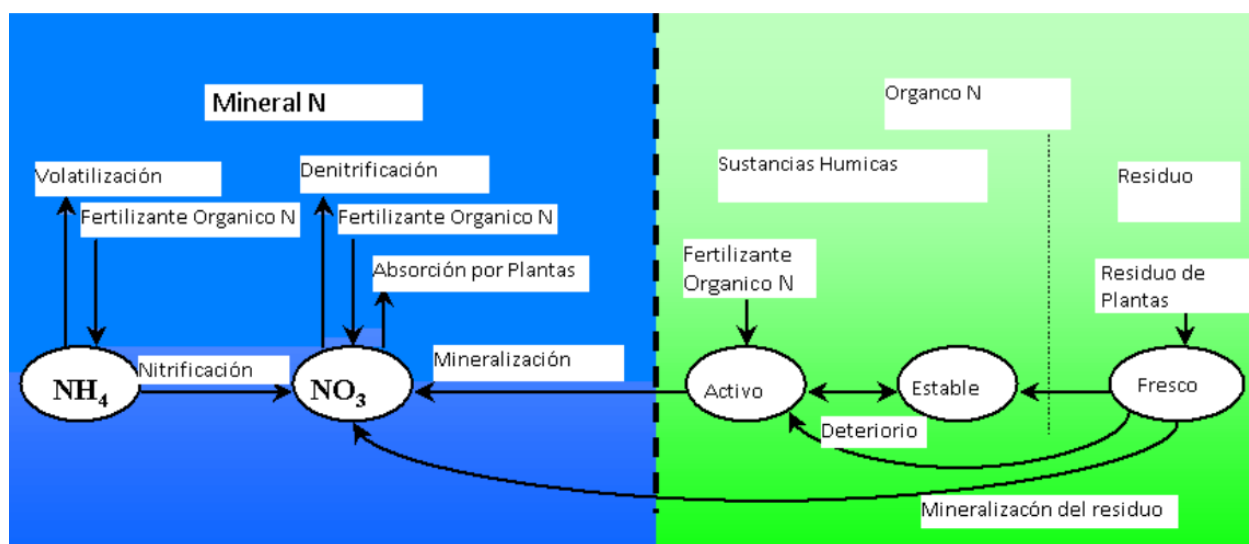
Los nutrientes considerados para la modelación son el nitrógeno y el fósforo, a continuación, se describen los tipos de nitrógeno y fósforo considerados y su simulación en SWAT.

Nitrógeno

Las cantidades de NO₃-N contenidas en la escorrentía, flujo lateral y percolación se estiman como los productos del volumen de agua y la concentración media. La lixiviación y el flujo subterráneo lateral en capas inferiores se tratan con el mismo método utilizado en la capa superior, excepto que no se considera el escurrimiento superficial.

Una función de carga desarrollada por McElroy et al. (McElroy, Chiu, Nebgen, Aletic, & Bennett, 1976) y modificado por Williams y Hann (Williams & Hann, Optimal Operation of Large Agricultural Watershed with Water Quality Constraints, 1987) para su aplicación a eventos de escorrentía individuales se utiliza para estimar la pérdida de nitrógeno orgánico. La función de carga calcula la pérdida orgánica diaria por escorrentía basada en la concentración de nitrógeno orgánico en la capa superior del suelo, el rendimiento sedimentario y la proporción de enriquecimiento. Además, el uso de cultivos de nitrógeno se estima utilizando un enfoque de oferta y demanda. El ciclo de nitrógeno simulado es una simplificación del ciclo real del nitrógeno del suelo.

Figura 5-7 Tipos de Nitrógeno y su Simulación en SWAT

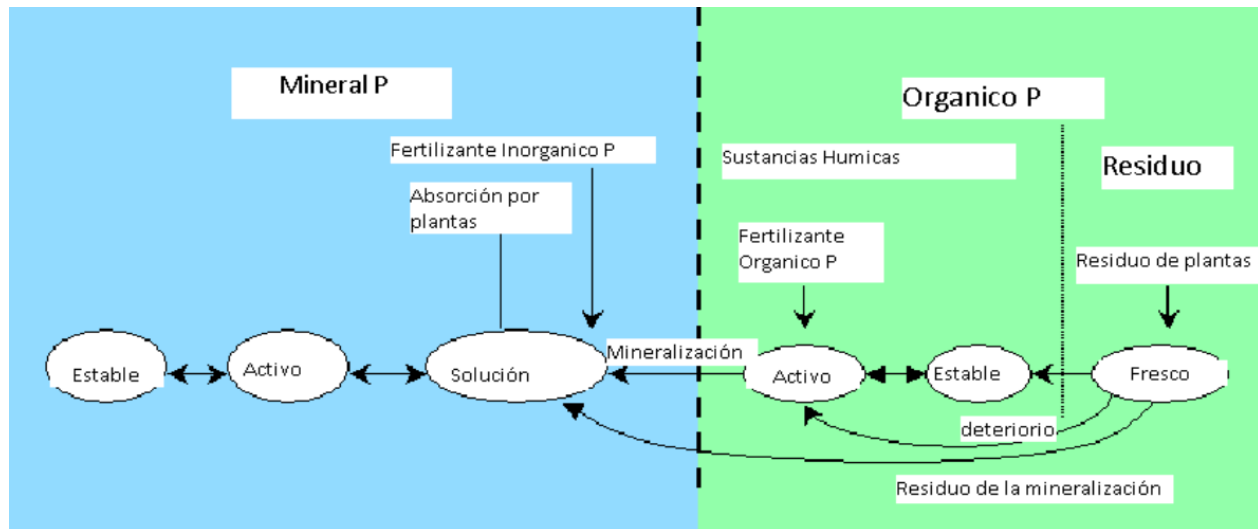


Fuente: Conceptos básicos y guía rápida para el usuario, SWAT 2005 (Uribe, 2010).

Fósforo

El enfoque SWAT para estimar la pérdida de fósforo soluble en la escorrentía superficial, se basa en el concepto de dividir las fases de solución y sedimento descritas por Leonard y Wauchope (Knisel, 1980). Debido a que el fósforo se asocia principalmente con la fase de sedimento, el escurrimiento de fósforo soluble se predice usando la concentración de fósforo lábil en la capa de suelo superior, el volumen de escorrentía y un factor de partición. El transporte de sedimentos con fósforo se simula con una función de carga como se describe en el transporte del nitrógeno orgánico. El uso de cultivos de fósforo también se estima con el enfoque de oferta y demanda.

Figura 5-8 Tipos de Fósforo y su Simulación en SWAT



Fuente: Obtenido de (Uribe, 2010).

Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonoso (CBOD)

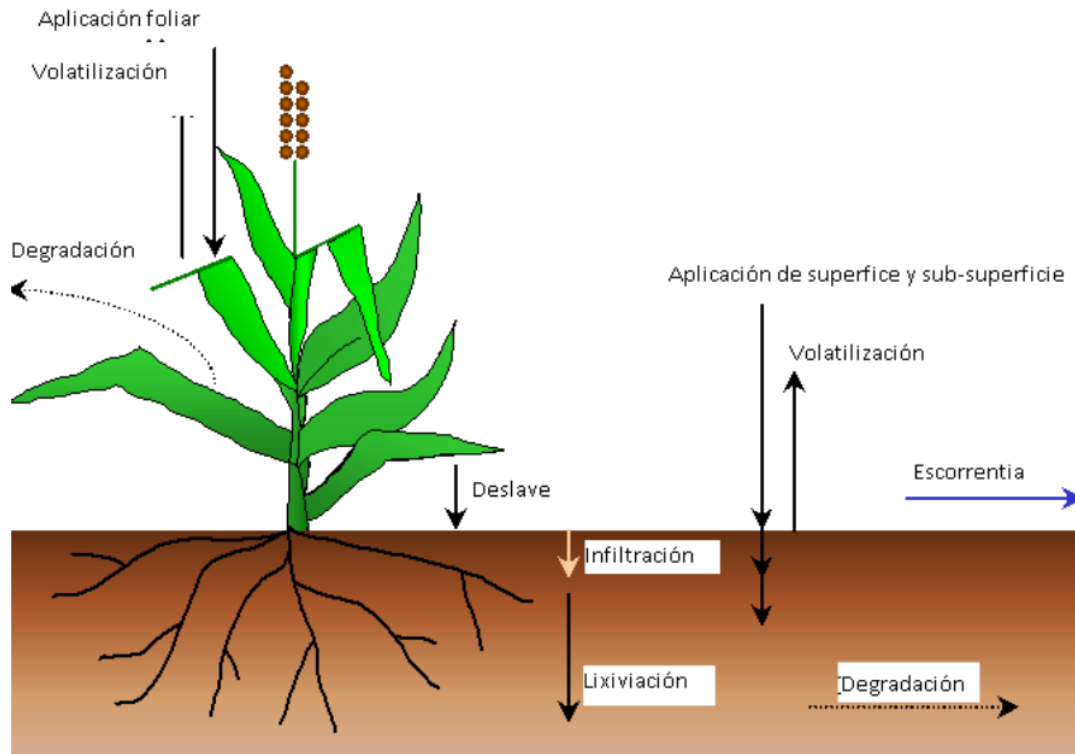
La demanda bioquímica de oxígeno carbonoso (CBOD) define la cantidad de oxígeno requerida para descomponer la materia orgánica transportada en la escorrentía superficial. La estimación de la carga de arrastre o barrido se basa en una relación dada por Thomann y Mueller. Donde el carbono orgánico los primeros 10 mm de la capa superior del suelo, se puede agregar a la corriente a través de la escorrentía superficial (Thormann & Mueller, 1987).

Una vez en el cauce principal, el CBOD está regido por los procesos del módulo de calidad del agua QUAL2E (Brown & Barnwell, 1987), el cual está integrado en el SWAT.

5.7.7 Pesticidas

El modelo utiliza la tecnología GLEAMS (Knisel, 1980) para simular el transporte de plaguicidas por escorrentía, filtración, evaporación del suelo y sedimento. Los plaguicidas se pueden aplicar en cualquier momento y velocidad al follaje de la planta o por debajo de la superficie del suelo a cualquier profundidad. El índice de área foliar de la planta determina qué fracción del pesticida foliar aplicado alcanza la superficie del suelo. Además, una fracción de la tasa de aplicación (llamada eficiencia de la aplicación) se pierde en la atmósfera. Cada plaguicida tiene un conjunto único de parámetros que incluyen la solubilidad, la semivida en el suelo y el follaje, la fracción de lavado y el coeficiente de adsorción de carbono orgánico. El plaguicida en el follaje de la planta y en el suelo se degrada exponencialmente de acuerdo con las semividas apropiadas. Se calcula el plaguicida transportado por agua y sedimento para cada evento de escorrentía y se calcula la lixiviación de pesticidas para cada capa de suciedad cuando se produce la percolación.

Figura 5-9 Simulación de pesticidas en SWAT



Fuente: Obtenido de (Uribe, 2010).

5.7.8 Prácticas de Manejo

El componente de manejo agrícola provee submodelos que simulan sistemas de labranza, aplicación de agua de riego, fertilizantes, pesticidas y sistemas de pastoreo.

Labranza

El componente de labranza fue diseñado para incorporar residuos superficiales y químicos en el suelo. El usuario ingresa el día de la operación de labranza y selecciona el implemento de labranza de la base de datos (se listan más de 100 implementos). Cada implemento tiene una eficiencia de mezcla asociada (0-1) que divide la cantidad de residuo que se incorpora en el suelo y el resto que queda en la superficie.

$$RSD = RSD_0(1 - EF) \quad (34)$$

Donde:

- RSD Residuo en la superficie antes de la labranza
- RSD_0 Residuo después de la labranza
- EF Eficiencia de la mezcla



Una vez incorporado el residuo, no tiene impacto en el modelo. Además, no se hacen ajustes a la densidad del suelo debido a la labranza.

Irrigación

Tanto la agricultura de temporal como la irrigada pueden ser simuladas. Las aplicaciones de riego pueden ser programadas por el usuario o aplicadas automáticamente por el modelo. La opción programada por el usuario requiere que el usuario introduzca fechas de aplicación, cantidades y eficiencias de aplicación. Se agrega agua de riego para llenar la capa superior a capacidad de campo y luego se agrega para llenar las capas inferiores sucesivas a capacidad de campo hasta que se aplica toda el agua. Si se especifica el riego automático, el usuario debe ingresar la eficiencia de la aplicación y un nivel de estrés hídrico en la planta para activar el riego. Cuando se alcanza el nivel de esfuerzo especificado por el usuario, se aplica agua de acuerdo con la ecuación.

$$AIR = \frac{FC - SW}{1 - EFI} \quad (35)$$

Donde:

<i>FC</i>	Capacidad de campo de la zona de la raíz (mm)
<i>SW</i>	Contenido de agua de la zona de la raíz antes del riego en mm
<i>EFI</i>	Relación de eficiencia
<i>AIR</i>	Volumen del agua de riego aplicada (mm)

Fertilización

Las aplicaciones de fertilizantes también pueden ser programadas por el usuario o aplicadas automáticamente por el modelo. La opción programada por el usuario requiere que el usuario introduzca la fecha de aplicación, la cantidad total de N y P, la fracción de N orgánico e inorgánico y P y la capa de aplicación del suelo. El modelo añade la cantidad de fertilizante a la piscina de nutrientes adecuada (orgánica e inorgánica) y a la capa de suelo especificada. La opción de fertilización automática requiere que el usuario ingrese el nivel de estrés de nitrógeno de la planta (0-1) para activar la fertilización, la cantidad de NO₃ en el perfil del suelo después de la fertilización, la capa de suelo de la aplicación, la cantidad máxima de NO₃ que puede aplicarse en un año y el tiempo mínimo entre aplicaciones de fertilizantes.

Cuando el nivel de estrés N de la planta alcanza el valor especificado para el nivel de activación, el modelo aplica automáticamente fertilizante al almacenamiento de NO₃ de la capa de suelo especificada para llevar todo el perfil al nivel especificado.

$$AN03 = FNM \sum_{i=1}^{n\ell} WN03_i \quad (36)$$

$$WN03_{f\ell} = WN03_{f\ell} + AN03 \quad (37)$$





Donde:

$AN03$	Cantidad de NO_3 aplicada
$FNMX$	Cantidad de NO_3 en el suelo después de la fertilización
nl	Número de capas de suelo
fl	Capa de suelo de la aplicación

También se añade N orgánico de acuerdo con la cantidad de NO_3 aplicada y la fracción de N orgánico (entrada).

$$ON = ON + AN03 \left(\frac{forn}{1-forn} \right) \quad (38)$$

Donde:

$forn$ Fracción de N orgánico en la aplicación total de N (0-1)

La fertilización automática de P también ocurre cuando se alcanza el nivel de estrés N. El usuario introduce un nivel bajo, medio o alto de gestión P, y el modelo restaura automáticamente las dos capas superiores del suelo a 10, 20 y 30 ppm de P lábil, respectivamente. Se añade P orgánico como N orgánico en la ecuación anterior.

Aplicaciones de plaguicidas

El usuario introduce el número de plaguicida, la fecha y la cantidad de pesticida aplicada. El usuario también debe introducir el factor de eficiencia de la aplicación para tener en cuenta las pérdidas en la atmósfera. La cantidad de pesticida que llega al suelo (agregada a la capa superior) y la cantidad interceptada por las plantas se calcula como una función de LAI .

Pastoreo

El pastoreo de ganado se simula como una operación de cosecha diaria. Los usuarios especifican una tasa de pastoreo diario en $kg\ ha^{-1}$ y la fecha en que comienza y termina el pastoreo.

$$B_{AG} = B_{AG} - B_{EAT} \quad (39)$$

Donde:

B_{EAT} Cantidad diaria de biomasa eliminada por el ganado en $kg\ ha^{-1}$

Cualquier número de períodos de pastoreo puede ocurrir durante un año, y el programa de pastoreo puede variar de año a año dentro de una rotación.

Enrutamiento de canales y cauces

El módulo de enrutamiento de canales consiste en enrutamiento de inundaciones, sedimentos y componentes químicos de enrutamiento. Una descripción detallada de los componentes de enrutamiento se encuentra en Arnold et al (Arnold & Maidment, 1995).

Encaminamiento de inundación de canales y cauces

El modelo de enrutamiento de inundaciones utiliza un método de coeficiente de almacenamiento variable desarrollado por Williams (Williams, 1969). Las entradas de canal incluyen la longitud de alcance, la pendiente del canal, la anchura y profundidad del canal, la pendiente lateral del canal, la pendiente plana de inundación y el n de Manning para el canal y



la llanura de inundación. El caudal y la velocidad media se calculan utilizando la ecuación de Manning y el tiempo de recorrido se calcula dividiendo la longitud del canal por la velocidad. El flujo de salida de un canal también se ajusta para pérdidas de transmisión, evaporación, desvíos y flujo de retorno.

Enrutamiento de los sedimentos de canales y cauces

El modelo de enrutamiento de sedimentos (Arnold & Maidment, 1995) consta de dos componentes que operan simultáneamente: deposición y degradación. El componente de deposición se basa en la velocidad de caída y el componente de degradación se basa en el concepto de potencia de corriente de Bagnold (Williams, 1980). La deposición en el canal y la llanura inundable, desde la subcuenca hasta la salida de la cuenca, se basa en la velocidad de caída del par de sedimentos. La velocidad de caída se calcula como una función del diámetro de las partículas al cuadrado usando la Ley de Stokes. La profundidad de caída a través de un alcance de enrutamiento es el producto de la velocidad de caída y el tiempo de recorrido de alcance. La relación de suministro se estima para cada tamaño de partícula como una función lineal de la velocidad de caída, el tiempo de viaje y la profundidad de flujo. La potencia de la corriente se utiliza para predecir la degradación en los tramos de enrutamiento. Bagnold (Bagnold, 1977) definió la potencia de la corriente como el producto de la densidad del agua, el caudal y la pendiente de la superficie del agua. Williams modificó la ecuación de Bagnold para colocar más peso en los altos valores de la corriente, aumentando la potencia de la corriente a 1,5. La potencia de corriente disponible se utiliza para reintegrar el material suelto y depositado hasta que todo el material se retire (Williams, 1980). El flujo excesivo de la corriente provoca la degradación de la cama. La degradación de la cama es ajustada por los factores de erosión y cobertura del suelo de USLE del canal y la llanura de inundación.

Ruta de canalización de nutrientes y de plaguicidas.

Se simulan las transformaciones de nutrientes con una forma modificada del modelo QUAL2E (Ramanarayanan, Srinivasan, & Arnold, 1996). Los componentes incluyen las algas como clorofila-un oxígeno disuelto, la demanda carbonácea de oxígeno, nitrógeno orgánico, nitrógeno amónico, nitrógeno nitrito, nitrógeno nitrato, fósforo orgánico y fósforo soluble. La temperatura del agua se estima a partir de la temperatura del aire, de acuerdo a la relación desarrollada por Stefan y Preud'homme (Stefan & Preud'homme, 1993) a través del análisis de regresión de numerosas observaciones de ríos. La relación parece coherente con la mayoría de los ríos con la excepción de los manantiales naturales y la actividad antropológica.

Las transformaciones in vitro de los pesticidas se simulan con una forma modificada de un modelo tóxico desarrollado por Chapra (Chapra, 1989). El tóxico se divide en partículas disueltas y en partículas, tanto en el agua como en los sedimentos. Los procesos principales incluyen reacciones, volatilización, sedimentación, difusión, resuspensión y entierro.

Encaminamiento de reservorios

Similar al enrutamiento del canal, el módulo de enrutamiento del depósito tiene componentes de balance de agua, sedimento y enrutamiento químico.



Balance y enrutamiento del agua en depósito

El balance hídrico de los embalses incluye la afluencia, el flujo de salida, las precipitaciones en la superficie, la evaporación, la filtración desde el fondo del reservorio y las derivaciones y el flujo de retorno. Actualmente hay tres métodos para estimar el flujo. El primer método lee simplemente el flujo medido y permite que el modelo simule los otros componentes del balance hídrico. El segundo método es para pequeños reservorios incontrolados, y el flujo de salida ocurre a una velocidad de liberación especificada cuando el volumen excede el almacenamiento principal. El volumen que excede el aliviadero de emergencia se libera dentro de un día. Para los embalses manejados más grandes, se utiliza un enfoque mensual del volumen objetivo.

Enrutamiento de los sedimentos del embalse

El rendimiento del sedimento de entrada a estanques y embalses (P / R) se calcula con MUSLE. El flujo de salida de P / R se calcula como el producto del volumen de salida y la concentración de sedimento. La concentración de P / R de salida se estima utilizando una simple ecuación de continuidad basada en volúmenes y concentraciones de entrada, salida y almacenamiento de estanques. Se introduce la concentración in situ de estanques y la concentración de las tormentas disminuye en función del tiempo y del tamaño medio del sedimento de entrada.

Nutrientes y pesticidas del embalse

Un modelo simple para el balance de masa de fósforo fue tomado de Thormann y Mueller (Thormann & Mueller, 1987). El modelo supone:

1. Un lago completamente mezclado
2. Fósforo limitado
3. Fósforo total puede ser una medida del estado trófico

La primera hipótesis ignora la estratificación del lago y la intensificación del fitoplancton en el epilimnion. La segunda hipótesis es generalmente válida cuando las fuentes no puntuales dominan y la tercera suposición implica que existe una relación entre el fósforo total y la biomasa. La ecuación del balance de masa de fósforo incluye la concentración en el lago, flujo de entrada, salida y una tasa de pérdida global.

El modelo de balance tóxico del lago (pesticida) se basa en Chapra (Chapra, 1989) y asume condiciones bien mezcladas. El sistema se divide en una capa de agua superficial bien mezclada bajo una capa de sedimento bien mezclada.

El tóxico se divide en partículas disueltas y en partículas tanto en el agua como en las capas de sedimento. Los principales procesos simulados por el modelo son carga, salida, reacciones, volatilización, sedimentación, difusión, resuspensión y enterramiento.



5.8 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

SWAT requiere información específica sobre el clima, las propiedades del suelo, la topografía, la vegetación y las prácticas de manejo que ocurren en la cuenca. Los datos mínimos requeridos para realizar una corrida son comúnmente accesibles por medio de agencias gubernamentales o literatura de diferentes organismos.

Tabla 5-1 Requerimientos y fuentes de información consultadas

Tipo de datos	Requerimiento	Fuentes consultadas	Comentario
Datos de elevación (DEM)	Indispensable	Continuo de Elevaciones Mexicano (INEGI, 2013)	Requerido para elaborar las áreas de estudio, donde únicamente se necesita el archivo Raster.
Datos de tipo de suelo (Raster y base de datos)	Indispensable	Mapa mundial de suelos (FAO , 2007)	Requerido para elaborar las áreas de estudio, donde se requiere una imagen Raster y una base de datos con las características del suelo, donde el usuario puede ligar la imagen a alguna base ya existente o crear la suya propia.
Datos de uso de suelo (Raster y base de datos)	Indispensable	Uso de suelo y vegetación (INEGI, 2013)	Requerido para elaborar las áreas de estudio, donde únicamente se necesita el archivo Raster y ligar a los usos establecidos en el modelo o crear una base de datos propia.
Clima (registros)	Indispensable	Información climatológica (CONAGUA, 2019)	Requerido para generar las variables hidrológicas, el modelo requiere precipitación, temperaturas máximas y mínimas, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Donde la precipitación se vuelve indispensable si se piensa calibrar, el resto puede ser cargada o modelada con el programa.



Tipo de datos	Requerimiento	Fuentes consultadas	Comentario
Información agrícola (bibliografía y datos estadísticos)	Opcional	Censo Agrícola (INEGI, 2008) Agenda Técnica Agrícola Jalisco (INIFAP, 2017) Literatura diversa	Opcional para adecuar las prácticas agrícolas presentes en el área de estudio, como son el tipo de cultivos, rendimientos por hectárea, fertilización, uso de pesticidas, si existe riego.
Información de población (datos estadísticos)	Opcional	Censo de población y vivienda (INEGI, 2011) Tazas de crecimiento poblacional (CONAPO, 2019)	Opcional para adecuar las prácticas humanas en zonas urbanas presentes en el área de estudio.
Fuentes o puntos de descarga	Opcional	Sistema Nacional de Información del Agua (CONAGUA, 2019) Base de datos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (CEA Jalisco, 2019)	Aun que el modelo fue creado con un enfoque en contaminación difusa, en el caso del río Santiago es muy importante incorporar estas aportaciones puntuales. No solo se requiere información de su ubicación, sino también de la cantidad y/o calidad del agua residual de estos puntos, dependiendo el tipo de estudio.
Información de presas o reservorios	Opcional	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (CONAGUA, 2016)	Dependiendo el tamaño de la cuenca y la capacidad y usos de la presa, se sugiere analizar si es necesario agregarlas por su relevancia hidrológica, así como cuales presas son importantes considerar en la zona de estudio.
Registros y muestreos de caudal	Opcional	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) (CONAGUA, 2018) Base de datos de muestreos sobre el río Santiago (CEA Jalisco, 2020)	No requerido por el modelo, pero necesario para calibración hidrológica, e indispensable en aspectos de calidad del agua.



Tipo de datos	Requerimiento	Fuentes consultadas	Comentario
Registros y muestreos de sedimentos	Opcional	Sin información disponible	No requerido por el modelo, pero necesario para calibración de sedimentos y erosión.
Registros y muestreos de nutrientes	Opcional	Base de datos de muestreos sobre el río Santiago (CEA Jalisco, 2020)	No requerido por el modelo, pero necesario para calibración de transporte y comportamiento de nutrientes en la cuenca.

El objetivo de utilizar fuentes de información oficiales y/o confiables para la modelación es que esta se aproxime a la realidad presente en el área de estudio y así pueda representar los diferentes fenómenos y procesos que suceden en la cuenca de forma adecuada.

De igual manera, es útil revisar la literatura disponible acerca de estudios similares que hayan utilizado el modelo, con la finalidad de detectar y aplicar ciertos criterios o procedimientos utilizados en los mismos y que se puedan considerar útiles para el estudio.

Una vez que se recopiló la información necesaria se puede proceder a comenzar con el armado y configuración del modelo, lo cual se describe a continuación.

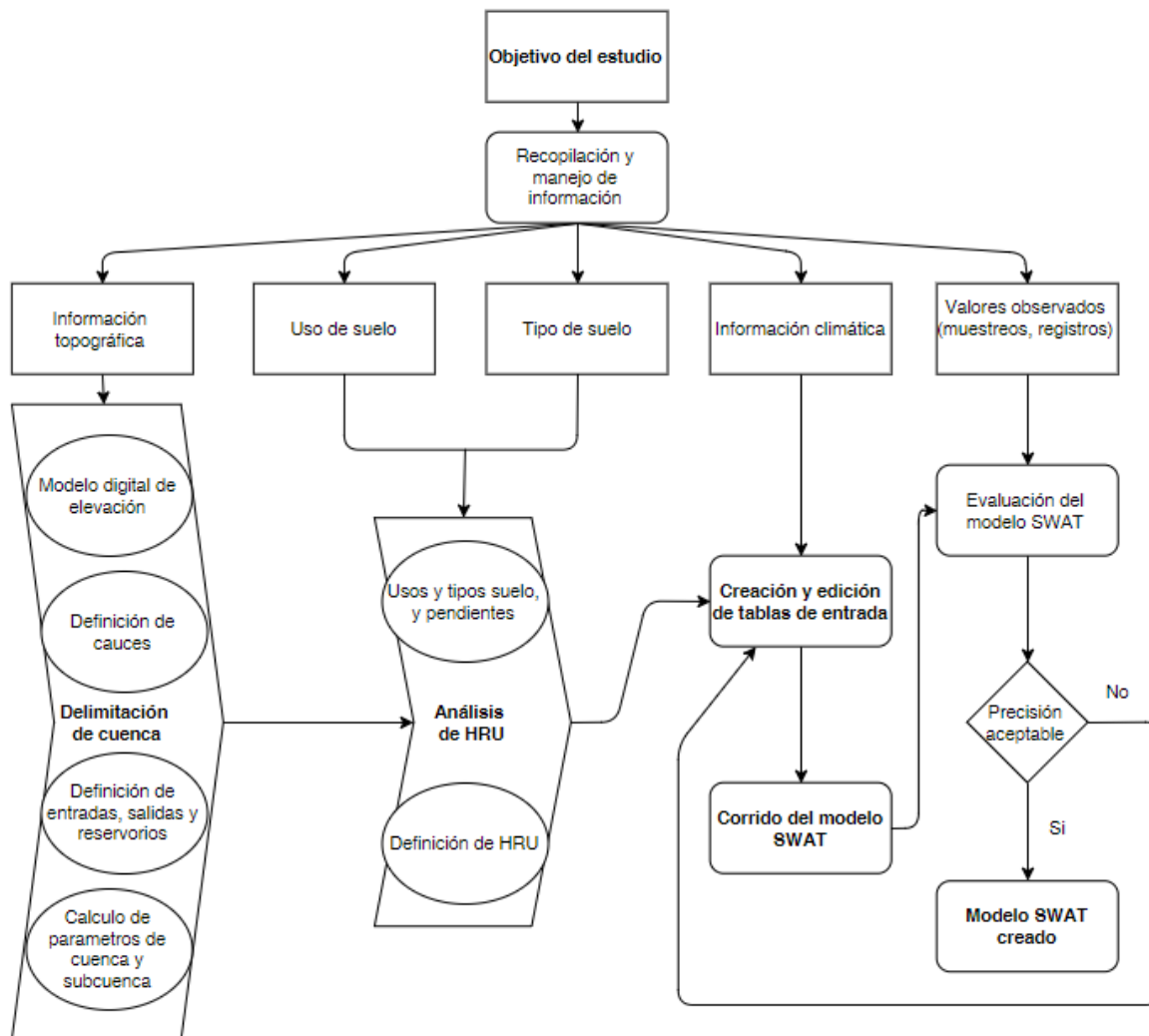
5.9 ARMADO DEL MODELO HIDROLÓGICO

Como ya se mencionó con anterioridad, el modelo requiere de ciertos campos de información, así como un proceso de alimentación que sigue un orden establecido por el mismo. Estos vienen descritos a detalle en el manual de usuario del programa (Winchell, Srinivasan, Di Luzio, & Arnold, 2013), en el mismo menciona los pasos claves que consisten en:

- Cargar o seleccionar la extensión SWAT a utilizar
- Delinear la cuenca y definir las Unidades de Respuesta Hidrológica
- Editar las bases de datos SWAT (Opcional)
- Definir los datos meteorológicos
- Aplicar el editor de archivos de entrada predeterminado
- Edite los archivos de entrada predeterminados (Opcional)
- Configuración y ejecución del SWAT
- Aplicar una herramienta de calibración (Opcional)
- Analizar, trazar y graficar la salida SWAT (Opcional)

De forma visual este proceso se describe de forma simplificada en la **Figura 5-10**.

Figura 5-10 Diagrama de Flujo de una Modelación SWAT



Fuente: Modificado de Assessing river water discharge with GIS (Nguyen Duy & Nguyen Kim, 2012)

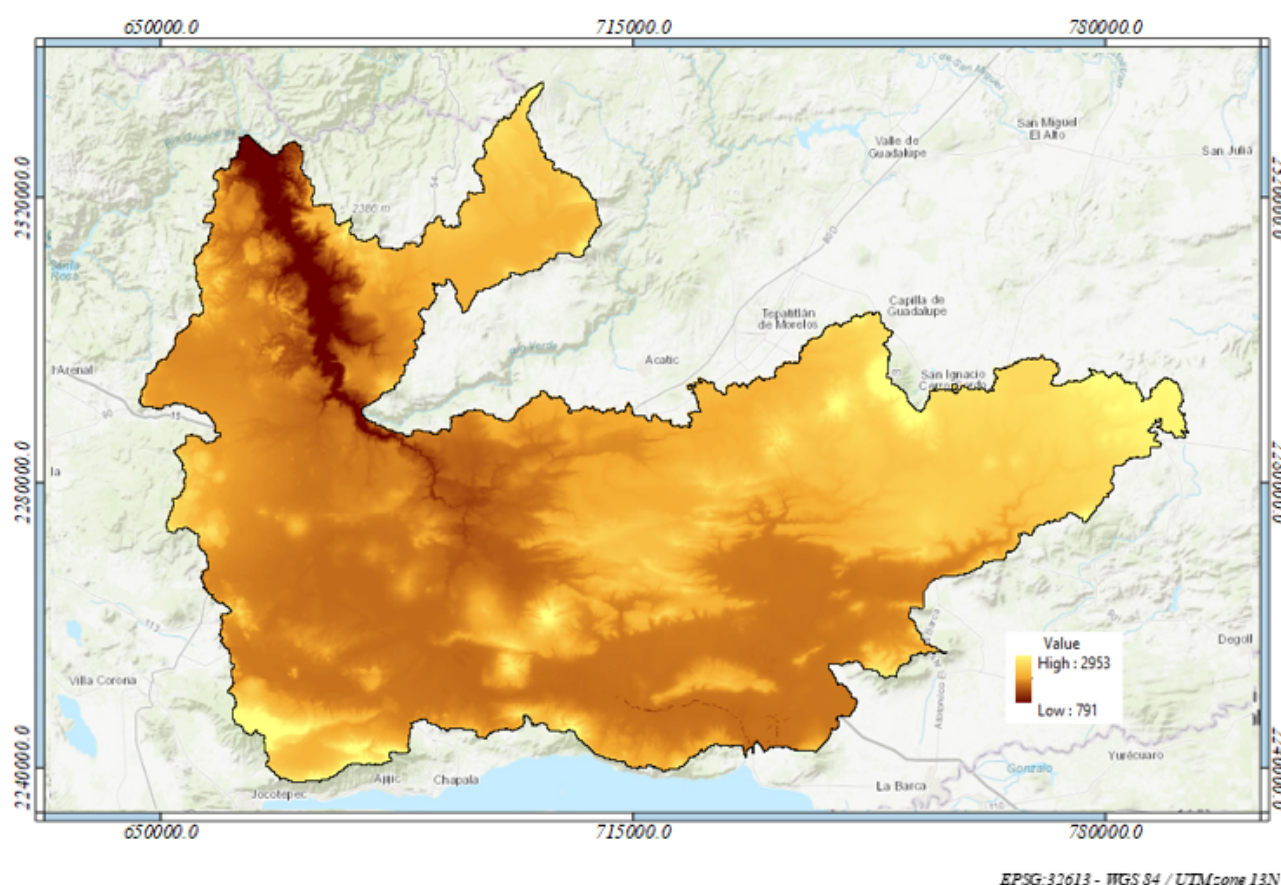
Acerca de la información utilizada, cualquier modelo es tan bueno como la información que se utilice para el mismo, por lo que, para obtener una modelación que se aproxime y pueda representar los fenómenos que suceden en la cuenca, es necesario alimentarlo con datos e información lo más cercanos a la realidad del lugar de estudio.

Tanto la información utilizada como el procedimiento de alimentación se describen a continuación.

5.9.1 Información de elevación utilizada

Para los datos de información de elevación se utilizaron datos del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), con una resolución de 15 m, disponible en formato .tiff y es gratuita desde su portal de internet. La información se encuentra disponible a nivel nacional; sin embargo, por la extensión de la cuenca únicamente se utilizó la del Estado de Jalisco. En la **Figura 5-11** se muestra la distribución de la altitud dentro de la cuenca de modelación.

Figura 5-11 Elevaciones en el Área de estudio de acuerdo con el CEM 3.0 INEGI



Fuente: Elaborado a partir de información obtenida de INEGI (INEGI, 2013).

5.9.2 Información de Usos de Suelo en la Cuenca

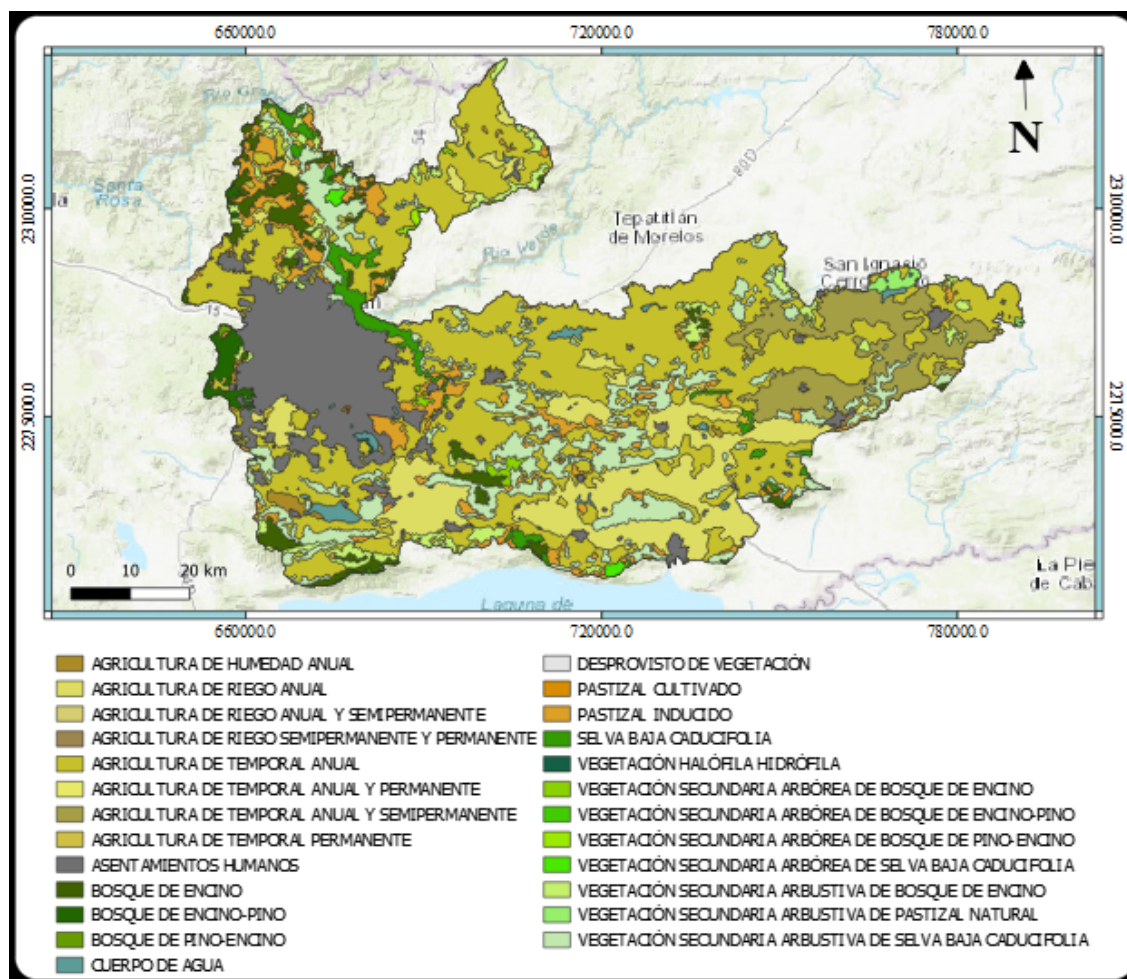
Para la información de uso de suelo de la zona de estudio se utilizó el “Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación”, Escala 1:250 000, Serie V (Capa Unión). Elaborada y disponible en el portal del INEGI en formato Shape, mismo que se utiliza de forma extendida en diferentes Sistemas de Información Geográficos.

El archivo presenta la información de las áreas agrícolas clasificadas de acuerdo a la forma en que reciben el agua los cultivos y por su ciclo agrícola y la distribución de la cubierta vegetal en su estado original, en sus fases sucesionales y la vegetación inducida de acuerdo con el sistema de clasificación de Uso del Suelo y Vegetación del INEGI.

Esta capa se generó durante el periodo 2011-2012, se derivó con base en la información presentada en la Serie IV de Uso del Suelo y Vegetación y actualizada con imágenes del satélite LANDSAT del año 2011. Se presenta en un conjunto nacional los 149 conjuntos de datos escala 1:250 000 del país.

En la **Figura 5-12** se muestra la distribución del uso de suelo de INEGI en la cuenca de modelación.

Figura 5-12 Usos de Suelo en el Área de Estudio

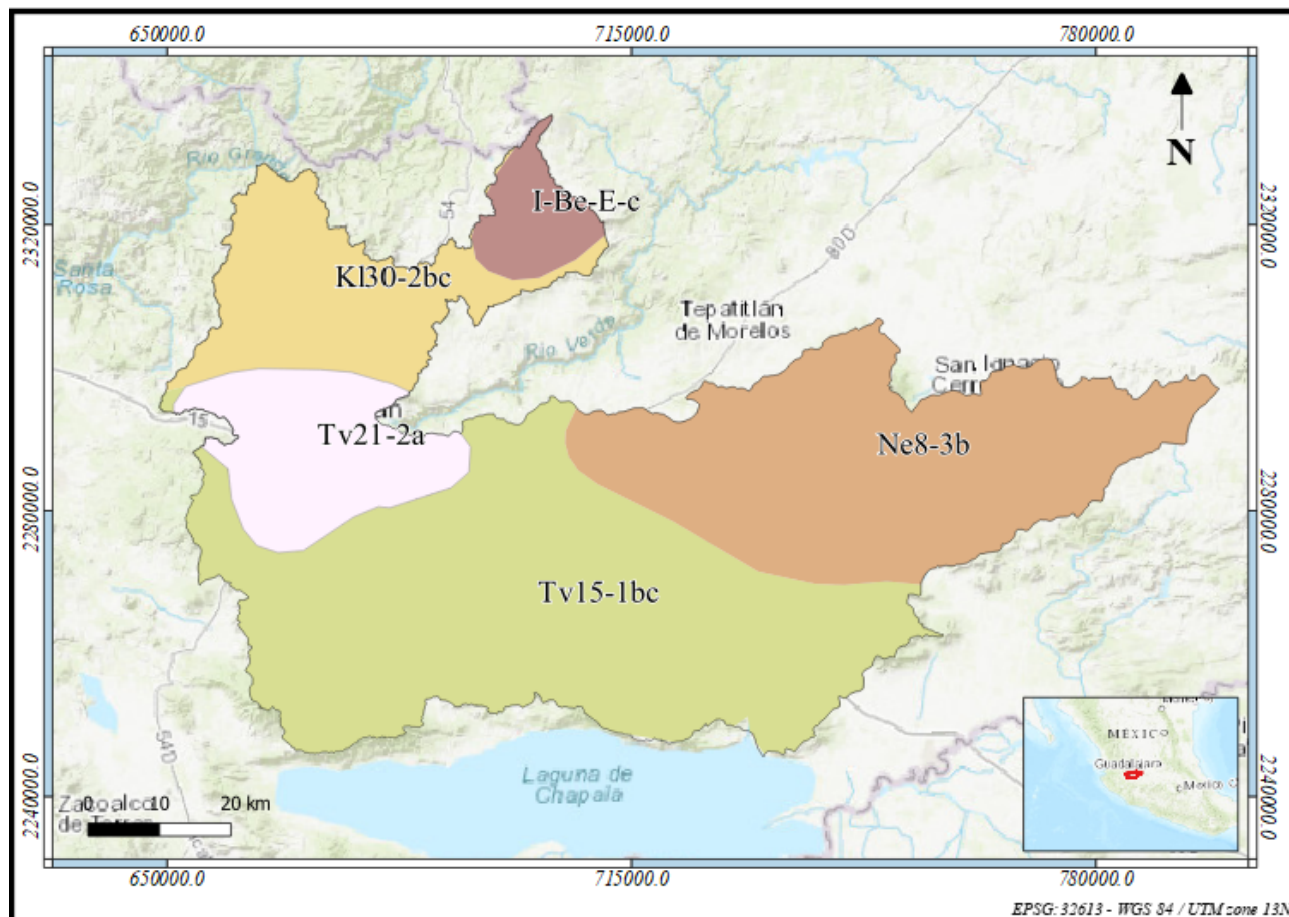


Fuente: Elaborado a partir de información de INEGI (INEGI, 2013)

5.9.3 Información edafológica utilizada

Para la información de tipos de suelo se utilizó el Mapa Mundial de Suelos de la FAO (Organización Mundial para la Alimentación y la Agricultura), esto dado que la base de datos con las características del suelo, incluida en SWAT, viene referenciada para esta capa de información. En la **Figura 5-13** se muestra la distribución del tipo de suelo en la cuenca de modelación de acuerdo con la clasificación de la FAO.

Figura 5-13 Tipos de suelo de acuerdo al Mapa Mundial de Suelos (FAO)



Fuente: Elaborado a partir de información de la FAO (FAO , 2007).

5.9.4 Información meteorológica utilizada

Para la información hidrometeorológica, el modelo cuenta con un generador de clima basado en el Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) de la National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Y está disponible en Internet una base mundial de datos climáticos (<https://globalweather.tamu.edu/>), en el cual se puede descargar la información en el formato que el modelo requiere (únicamente para la versión 2012).

De igual manera y para asegurar que se utiliza información representativa del área de estudio, se buscaron las estaciones de la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico

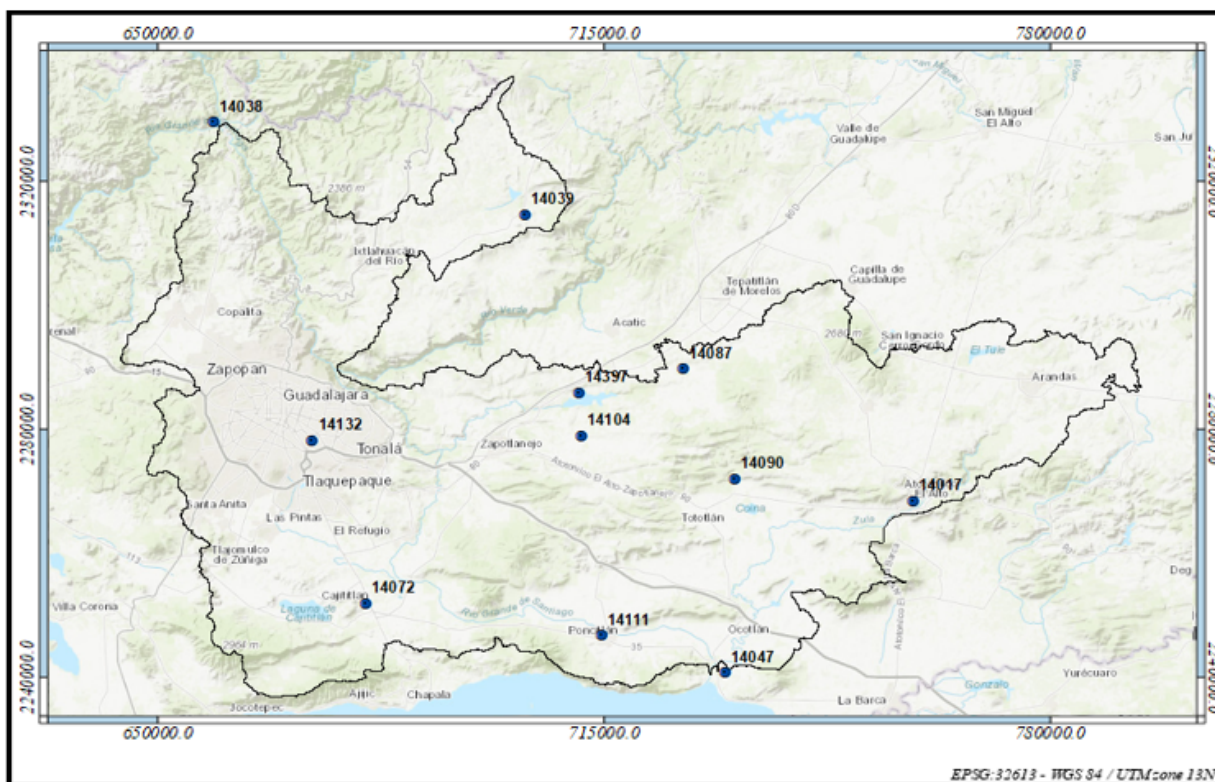


Nacional, que forma parte de la CONAGUA, habiéndose encontrado 11 estaciones climatológicas de utilidad tanto por su distribución espacial como la cantidad de registros con los que se contaban. Las estaciones climatológicas del SMN de utilidad se enlistan en la **Tabla 5-2** y se observan en la **Figura 5-14**.

Tabla 5-2 Estaciones Climatológicas Utilizadas

Nombre	Latitud	Longitud	Elevación [msnm]
14017	20.55	-102.508	1,600
14047	20.331	-102.763	1,540
14072	20.426	-103.242	1,550
14090	20.582	-102.746	1,588
14132	20.638	-103.311	1,540
14087	20.725	-102.813	1,774
14038	21.052	-103.439	1,000
14039	20.928	-103.023	1,790
14397	20.696	-102.953	1,620
14111	20.381	-102.928	1,520
14104	20.64	-102.951	1,730

Figura 5-14 Estaciones climatológicas utilizadas en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

Las estaciones climatológicas no cuentan con registros continuos completos, para los 30 años de modelación (determinados de acuerdo con el objetivo del estudio), dado que se llegan a presentar algunos faltantes, por lo que fue necesario realizar el llenado de información como se describe en la sección de pre procesamiento. En las siguientes tablas se muestra un resumen de la información obtenida de las estaciones climatológicas:

Tabla 5-3 Resumen de estaciones climatológicas utilizadas – precipitación (mm)

Mes	1401 7	1404 7	1407 2	1409 0	1413 2	1408 7	1403 8	1403 9	1439 7	14111	1410 4
Enero	16.6	16.1	15.3	16.8	17.8	18	15.9	15.6	14.5	29.2	15.5
Febrero	7.2	8	10.5	9.4	6.2	10	8.9	9	9.4	5.7	7.9
Marzo	4.1	3.4	4.2	3.1	4.7	4.1	5.6	4.2	6.1	25.5	3.5
Abril	5	3.9	6.7	5.9	7.4	6.4	6.2	7.7	6.4	16.4	5.2
Mayo	37	27.2	24.8	25.9	29.2	24.4	22.6	26.9	20.4	33.6	25.5
Junio	164	191	172.8	162.2	187.4	163.5	161.2	152	170.4	160.5	150.9



Mes	1401 7	1404 7	1407 2	1409 0	1413 2	1408 7	1403 8	1403 9	1439 7	14111	1410 4
Julio	224.8	238.8	239.7	231.3	255.5	253.1	234.6	214.1	198.6	222. 7	218.5
Agosto	206. 8	198.6	183.3	201.4	207. 6	208.5	209.7	188.7	198.7	173.2	180
Septiembr e	145	154.9	154.5	159.4	158.8	139.4	137.6	148.6	149.5	129.4	128.3
Octubre	46.9	42.9	58	48	59.9	52.5	48.7	55.6	51.8	50.9	47.5
Noviembre	15.5	11.4	12.5	14.1	18.6	12.8	10.6	12.6	11.5	14.3	12.6
Diciembre	5.3	7.1	7.2	8.1	16.9	6.2	9.3	7.7	11	9.1	7.2

Tabla 5-4 Resumen de estaciones climatológicas utilizadas – temperatura máxima (°C)

Mes	1401 7	1404 7	1407 2	1409 0	1413 2	1408 7	1403 8	1403 9	1439 7	1411 1	1410 4
Enero	24.8	24.5	23.8	25.9	25.4	23.9	30.7	23.1		25.3	24.2
Febrero	26.8	25.8	25.5	27.8	27.3	25.6	33	24.6		27.1	25.8
Marzo	29.3	28.4	27.9	30.2	30	28.1	35.9	27		29.4	28.4
Abril	31.5	30.4	30.4	31.8	32.4	30.5	38.4	29.3		31.2	30.6
Mayo	32.6	31.2	31.3	32.9	33.8	31.7	39.8	30.9		32.1	31.6
Junio	30.7	29.4	29.2	30	31.8	28.8	37.2	28.7		29.8	29
Julio	28	27.3	26.3	27.1	29.1	25.5	33	25.7		27.1	26.1
Agosto	27.8	27.4	26.1	27.2	28.9	25.5	32.9	25.5		27.3	26
Septiembr e	27.8	27.4	25.8	27.8	28.3	25.5	32.9	25.5		27.1	25.9
Octubre	27.7	26.8	25.9	28.3	28.1	25.7	33.3	25.5		27.4	26.2
Noviembre	26.8	25.9	25.4	27.8	27.2	25.5	32.7	24.9		26.9	25.7
Diciembre	25	24.8	24.1	26.2	25.4	24.2	30.6	23.6		25.5	24.4



Tabla 5-5 Resumen de estaciones climatológicas utilizadas – temperatura mínima (°C)

Mes	1401 7	1404 7	1407 2	1409 0	1413 2	1408 7	1403 8	1403 9	1439 7	1411 1	1410 4
Enero	6.7	7.4	6.8	6.7	8.3	4.7	8.9	3.8		5.5	3.8
Febrero	7.4	8.5	7.6	7.6	9	5.2	10.3	4.8		6.6	4.2
Marzo	8.9	11	9.5	9.5	11.1	6.7	12.7	6.1		8.6	6.1
Abril	11.1	13.5	11.9	12	13.5	9.3	15.8	9.2		11.2	8.2
Mayo	13.4	15.7	14.1	14.5	15.7	12	19.2	12		14	10.9
Junio	15.1	16.8	15.2	16.2	16.5	14.9	21.3	14.6		16	13.1
Julio	14.6	16	14.8	15.3	15.7	14.6	19.9	14.5		15.3	12.9
Agosto	14.4	15.8	14.3	14.9	15.7	14.2	19.6	14.2		15.1	12.6
Septiembre	14	15.6	14.2	14.5	15.4	13.8	19.4	14		14.6	12.4
Octubre	11.6	13.6	12.1	12.1	13.9	10.8	16.4	11.1		11.9	9.9
Noviembre	8.7	9.9	9.1	8.9	10.8	6.9	11.7	7		8.2	6.3
Diciembre	7.2	8.1	7.3	7.2	9	5.4	9.7	4.7		6.3	4.8

5.9.5 Pre-Procesamiento

Antes de iniciar con el armado del modelo SWAT, los usuarios deben preparar sus datos tabulares y espaciales según los requisitos del modelo; ya que resulta común que la información disponible no está de origen en los formatos requeridos, o esta presenta diferencias espaciales o de unidades que requieren ser ajustadas. Para realizar los ajustes necesarios para que la información pueda utilizarse, se requiere un pre procesamiento de la misma, la cual se describe a continuación.

Sistema de Proyección

Todos los datos espaciales (DEM, uso del suelo y tipo de suelo) deben proyectarse en el mismo sistema de coordenadas, preferente pero no necesariamente en UTM. Entre las primeras consideraciones posteriores a la selección del sistema de proyección, que para este estudio es la proyección UTM, es necesario seleccionar la zona de proyección. Para el caso del río Santiago – Guadalajara consiste en la zona 13N. En el presente estudio se realizaron las s transformaciones que se muestran en la **Tabla 5-6**.



Tabla 5-6 Transformación entre sistemas de proyección

Capa de Información	Sistema de Proyección Original	Sistema de Proyección del Modelo
Datos de elevación (.tiff)	ITRF 1992	UTM (13N)
Datos de tipo de suelo (Shape)	Cónica Conforme de Lambert	UTM (13N)
Datos de uso de suelo (Shape)	Cónica Conforme de Lambert*	UTM (13N)

Acotamiento del área de estudio

En muchos casos, como sucedió en este estudio la información espacial (y en general) no está disponible de primera mano separada por cuencas hidrográficas (disponible típicamente a nivel nacional y estatal), por lo que para facilitar el procesamiento de la información por parte del programa de modelación, se vuelve necesario el acotar la capa de información y extraer aquella aproximada al área de estudio, esto lo logramos utilizando una referencia espacial de la localización y extensión del área de modelación delimitada (véase **Figura 5-2**).

Información climática

Como ya se ha mencionado, los registros de las estaciones climatológicas no están presentes de forma ininterrumpida, y dado que para poder modelar adecuadamente se requieren de registros completos, de manera que el modelo pueda representar correctamente las condiciones climáticas del estudio, se recurrió al llenado de información cuando esta se encontraba incompleta.

Con la intención de corregir los registros faltantes de información, para las fechas carentes de información se utilizó el software SIHIMax desarrollado por Hydrobits utilizado por la CEA Jalisco, el cual utiliza información de estaciones climatológicas cercanas y el método del Inverso al Cuadrado (véase la ecuación 40).

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_i}{D_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{D_i^p} \right)} \quad (40)$$

Donde:

- Z_p Valor estimado para el punto
- n Número de puntos usados en la interpolación;
- Z_i Valor en el punto i-ésimo
- D_p Distancia del i-ésimo valor al punto p

5.9.6 Proceso de alimentación al modelo

La interfaz de uso del modelo presenta una configuración paso a paso que se debe seguir para preparar la simulación SWAT, comenzando con la definición de un proyecto, ya sea que este sea



nuevo o uno ya existente. Posteriormente existen tres pasos principales para la elaboración del modelo.

- Delimitación de la cuenca
- Creación de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU)
- Edición de datos y corrido del modelo SWAT

Delimitación de la cuenca

Para la delimitación de la cuenca, se requiere únicamente la capa de elevaciones, misma que permite al modelo estimar la dirección de flujos y acumulaciones que se presentan en la cuenca de forma automática. Este cálculo es realizado por el programa en la totalidad de la capa de elevaciones utilizada, por lo que si esta capa abarca un área mayor a la requerida el programa no distingue cual será la cuenca utilizada, por eso la recomendación de acotar la información utilizada lo más cercano al área de la cuenca de interés, para reducir los tiempos de procesamiento del programa.

La finalidad de la delimitación de la cuenca para su uso en el modelo es el de permitir al programa estimar el trazo de cauces presentes en la capa de información, lo que permite posteriormente determinar las subcuencas.

En un inicio el SIG para el trazado de cauces estimó 3 secciones separadas (véase **Figura 5-15**), lo cual en el modelo terminaría por generar 3 subcuencas distintas y sin conexión entre las mismas.

Esto posiblemente se deba a que en zonas muy planas (Ocotlán-Atequiza, Atotonilco-Tototlán) se considere como parteaguas algunos cerros cercanos al no detectar un paso claro del agua y de igual manera que en el modelo de elevación se detecte un punto muy bajo (Chapala, cuenca contigua Río Angulo-Briseñas) haciendo que se considere como salidas.

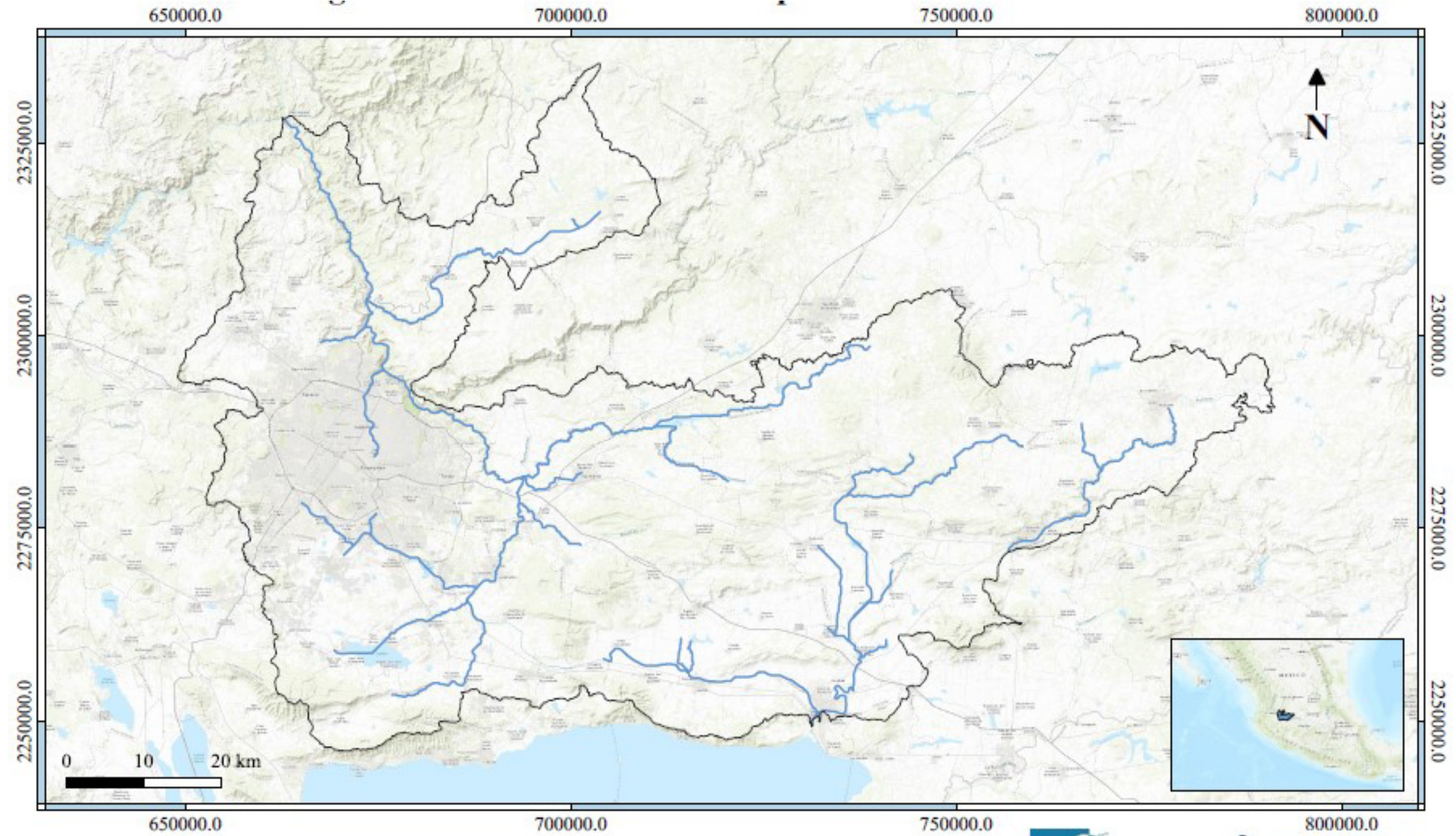
Para corregir lo anterior fue necesario hacer ajustes manuales, previo a esto, con los cauces delineados inicialmente se generaron las subcuencas, para una vez teniendo tanto cauces y subcuencas proceder a la edición mediante las herramientas propias del SIG y así realizar los ajustes para definir la continuidad y conectividad real de la cuenca de estudio, quedando el trazo de cauces y subcuencas como se muestra en la **Figura 5-15** Trazado de cauces por medio del SIG/SWAT.

La delimitación de las subcuencas de igual manera se realizó tomado en cuenta algunos elementos de consideración como las presas presentes en el área de estudio (descritas más adelante).

Una vez realizados los ajustes mencionados, se puede determinar por el usuario si existen puntos de entrada y salida del área de estudio, para nuestro caso existen puntos de salida intermedios, así como entradas: el lago de Chapala (entrada y salida) y el río Verde (entrada) en su confluencia con el río Santiago, y de igual manera se definieron las principales fuentes puntuales de contaminación. Una vez definido lo anterior el programa permite calcular las características topográficas de cauces y subcuencas presentes en el área de estudio, como se muestra en la **Figura 5-17**, y permitiendo así pasar al siguiente paso del armado del modelo.



Figura 5-15 Trazado de cauces por medio del SIG/SWAT



EPSG:32613 - WGS 84 / UTM zone 13N

Fuente: Elaboración propia



Figura 5-16 Cauces y subcuencas en el área de estudio

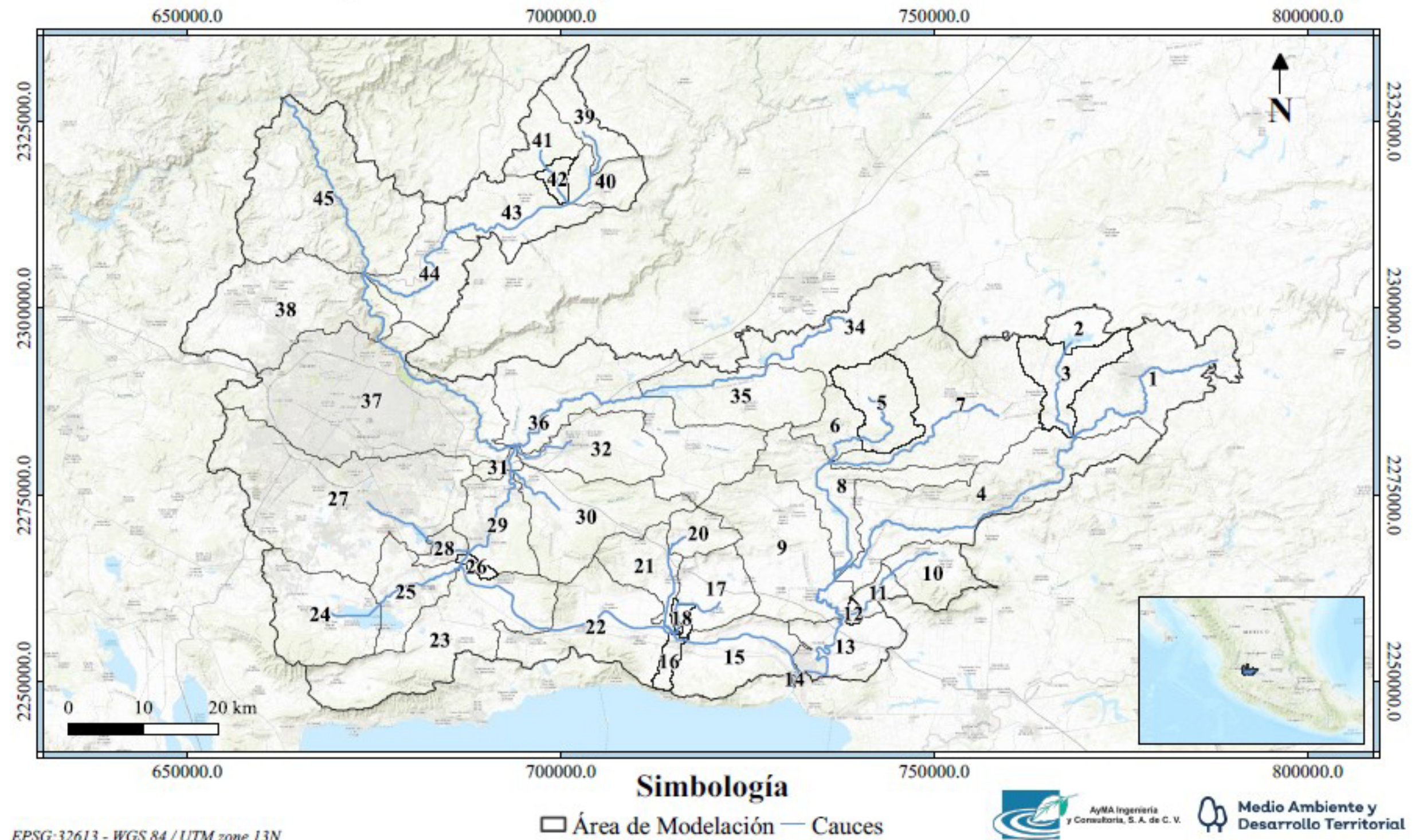
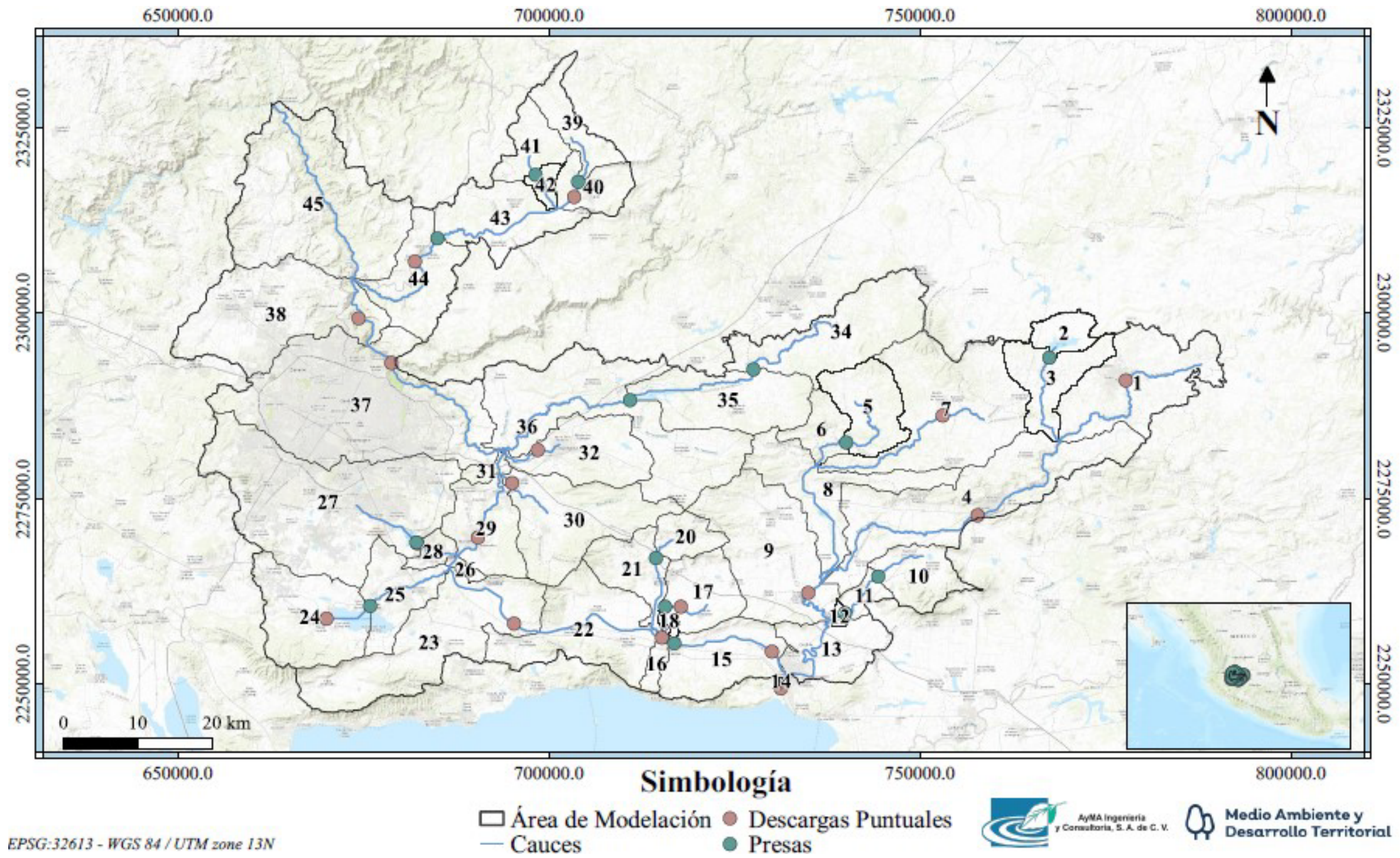




Figura 5-17 Cuenca de estudio con entradas / salidas y presas





Creación de las unidades de respuesta hidrológica

Las unidades de respuesta hidrológicas (HRU, por sus siglas en inglés), son áreas de tierra dentro de la subcuenca que corresponden a todas las únicas posibles combinaciones de cobertura de tierra, suelo y pendiente, y por ende son la unidad básica espacial para los cálculos del modelo. Para la creación de las HRU, se requiere cargar al área de cuenca ya delimitada, la información de las capas de uso de suelo, de tipo de suelo, así como la determinación de pendientes.

Para la capa de uso de suelo, fue necesario transformar los usos de suelo en equivalentes que el programa pueda reconocer, dado que los usos de suelo del INEGI no son los usos de suelo que el programa utiliza en su base de datos.

Los usos de suelo del modelo están dados en claves de 4 letras, existiendo un total de 136 clasificaciones de usos de suelo reconocible por el programa, siendo 127 clasificaciones de uso de suelo natural y agrícola, y 9 clasificaciones de tipo urbano. Mismas que se pueden observar en el Apéndice A de la documentación del modelo (<http://swat.tamu.edu/documentation/>).

Dado que para nuestro uso de suelo existen parámetros que no se mencionan exactamente en las categorías utilizadas por el modelo, se debe a criterio del usuario, seleccionar aquel uso de suelo que se asemeje al uso real. En la **Tabla 5-7** se muestran las clasificaciones y equivalencias utilizadas para el modelo y en la **Figura 5-18** se muestra el uso de suelo del área de modelación de acuerdo con la clasificación SWAT.

Para la capa de tipo de suelos, no fue necesario realizar equivalencias dado que la capa de información utilizada esta referenciada a la base de datos de suelo del modelo, la cual utiliza el Mapa Digital del Suelo del Mundo de la FAO / UNESCO (véase **Figura 5-13**).





Tabla 5-7 Clasificaciones INEGI y equivalencias en base de datos de SWAT

Clave INEGI	Descripción	Equivalente en SWAT
ADV	Desprovisto de vegetación	BARR
AH	Asentamientos humanos	URBN
BPQ	Bosque de pino-encino	PINE
BQ	Bosque de encino	OAK
BQP	Bosque de encino-pino	OAK
H2O	Cuerpo de agua	WATR
HA	Agricultura de humedad anual	HAY
PC	Pastizal cultivado	PAST
PI	Pastizal inducido	PAST
RA	Agricultura de riego anual	AGRC
RAS	Agricultura de riego anual y semipermanente	AGRC
RSP	Agricultura de riego semipermanente y permanente	AGRC
SBC	Selva baja caducifolia	FRSD
TA	Agricultura de temporal anual	AGRL
TAP	Agricultura de temporal anual y permanente	AGRL
TAS	Agricultura de temporal anual y semipermanente	AGRR
TP	Agricultura de temporal permanente	ORCD
VHH	Vegetación halófila hidrófila	WETN
VSA/BPQ	Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	PINE
VSa/BQ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	OAK
VSA/BQ	Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	OAK
VSA/BQP	Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino-pino	OAK

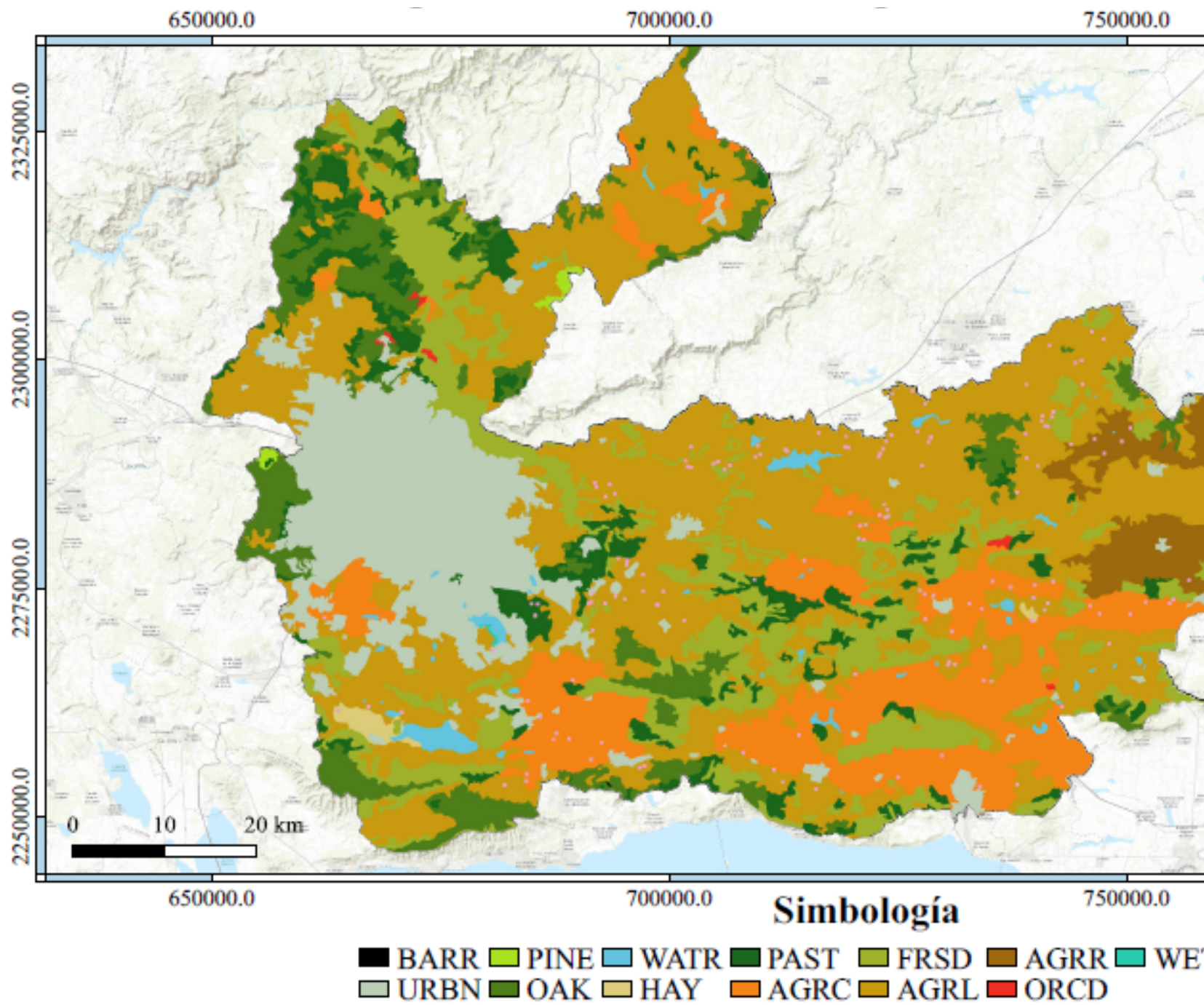


Clave INEGI	Descripción	Equivalente en SWAT
VSa/PN	Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	PAST
VSa/SBC	Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	FRSD
VSA/SBC	Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	FRSD
PEC*	Pecuario	SWRN

*Este uso de suelo se creó explícitamente para simular actividades agrícolas, sin estar considerado en la capa original de usos de suelo.



Figura 5-18 Uso de Suelo según la clasificación SWAT



EPSG:32613 - WGS 84 / UTM zone 13N

Fuente: Elaboración propia.





Por último, es necesario clasificar las pendientes presentes en el área de estudio, donde la definición de las mismas es dependiente del criterio del usuario al no existir un criterio establecido para su definición.

El modelo SWAT permite utilizar para la creación de las HRU una sola pendiente genérica o varias pendientes (hasta 5) para la cuenca de estudio, por cada nueva clasificación de pendiente irán aumentando las HRU que el modelo genere por lo que para cuencas relativamente planas se recomienda manejar la pendiente única.

“La inclusión de pendientes no mejora significativamente los resultados de las simulaciones cuando se utilizó un buen conjunto de parámetros, pero sí mejoró la calibración cuando se utiliza en un número reducido de subcuencas” (Yacoub, Foguet, 2012). Lo anterior es debido a que un mayor número de definiciones de pendientes se genera un número mayor de HRU. Para el presente estudio, la cuenca es principalmente plana o de poco relieve, por lo que utilizar un número grande de definiciones de pendiente no iba significar un beneficio, de esta manera la clasificación de pendientes se puede observar en la **Tabla 5-8**.

Tabla 5-8 Definición de pendientes utilizadas en el SWAT

Clasificación	Límite inferior (>%)	Límite superior (<=%)
1	0	15
2	15	40
3	40	9999*

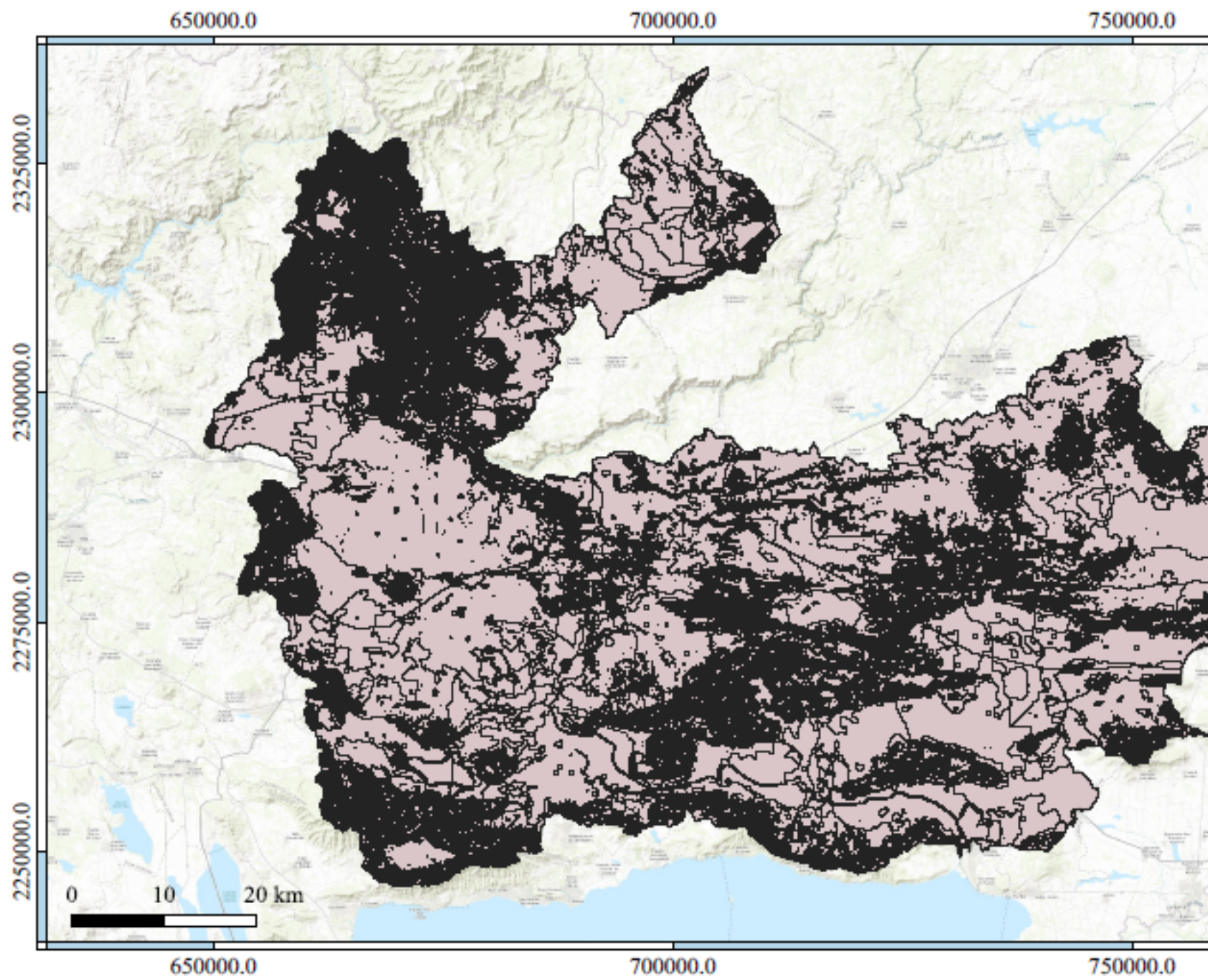
*Valor establecido en el SWAT.

Una vez que las capas de uso de suelo, tipo de suelo y la definición de pendientes son cargadas, el modelo SWAT permite la creación de las HRU. Para la creación de las mismas, el modelo requiere que sean definidas. Lo que significa, en términos generales, expresarle al programa la importancia de cada categoría (asignarle mayor o menor importancia a: Pendiente, Uso o Tipo de suelo), sin embargo, hay que tener cuidado con esta definición ya que se pudiera sacrificar precisión por un procesamiento rápido. Por ende, lo adecuado, y como se empleó en este estudio, es mantener los valores que vienen por default en el modelo el cual a cada categoría se le da la importancia completa para la elaboración de las HRU.

Las HRU generadas para la zona de estudio, quedaron de la siguiente manera.



Figura 5-19 Unidades de Respuesta Hidrológica



EPSG:32613 - WGS 84 / UTM zone 13N

Fuente: Elaboración propia.

El modelo SWAT, a partir de la información alimentada, nos generó un total de 916 HRU, repartidas en las 45 subcuencas estimadas por el modelo. El resultado obtenido del modelo.





Figura 5-20 Resumen de las Unidades de Respuesta Hidrológica Creadas

SWAT model simulation Date: 20/12/2019 12:00:00 a. m. Time: 00:00:00
 MULTIPLE HRUs LandUse/Soil/Slope OPTION THRESHOLDS : 0 / 0 / 0 [%]
 Number of HRUs: 916
 Number of Subbasins: 45

	Area [ha]	Area[acres]	
Watershed	601067.8982	1485268.8299	
<hr/>			
	Area [ha]	Area[acres]	%Wat.Area
LANDUSE:			
Residential --> URBN	73747.9644	182234.9074	12.27
Oak --> OAK	46654.0297	115284.4401	7.76
Water --> WATR	6508.0389	16081.6896	1.08
Pasture --> PAST	36575.5479	90380.0077	6.09
Forest-Deciduous --> FRSD	80152.4263	198060.6529	13.34
Agricultural Land-Generic --> AGRL	237705.2544	587381.5690	39.55
Agricultural Land-Row Crops --> AGRR	39471.8729	97536.9715	6.57
Southwestern US (Arid) Range --> SWRN	2491.2109	6155.9067	0.41
Hay --> HAY	1936.2067	4784.4635	0.32
Agricultural Land-Close-grown --> AGRC	74085.9815	183070.1646	12.33
Orchard --> ORCD	642.7253	1588.2064	0.11
Barren --> BARR	13.1867	32.5850	0.00
Wetlands-Non-Forested --> WETN	109.5316	270.6581	0.02
Pine --> PINE	973.9210	2406.6074	0.16
SOILS:			
Ne8-3b-4925	171733.9655	424363.2154	28.57
Tv15-1bc-5028	266508.9636	658556.9744	44.34
WATER-6997	226.0672	558.6234	0.04
Tv21-2a-5320	63189.3322	156143.9994	10.51
K130-2bc-4832	77563.0225	191662.1067	12.90
I-Be-E-c-3504	21846.5473	53983.9106	3.63
SLOPE:			
0-15	467271.5647	1154651.3999	77.74
15-40	95168.8647	235167.0231	15.83
40-9999	38627.4689	95450.4070	6.43

Edición de datos y corrido del modelo SWAT

Para la edición de datos, el primer paso corresponde el alimentar la información climática de la zona de estudio. Misma que como se mencionó anteriormente puede ser simulada o alimentada al modelo con información observada. Para el modelo en cuestión se modela la información de temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, únicamente utilizando información de precipitación de las 11 estaciones climatológicas escogidas del SMN.

Una vez cargada esta información, el modelo permite la creación de tablas de datos, estas no son otra cosa, que los registros de las variables de entrada al modelo, a continuación, se describen brevemente cada una y que modificaciones se realizaron en cada tabla.



Fuentes puntuales

En esta sección se pueden modificar las características de aquellas fuentes puntuales que se localizan sobre alguno de los cauces considerados en el modelo SWAT, para este estudio se consideraron como fuentes puntuales las descargas de las localidades principales, las cuales son:

Fuentes puntuales:

- Arandas
- Atotonilco
- San Ignacio Cerro gordo - San francisco - San José de Gracia
- Tototlán
- Ocotlán
- Poncitlán
- Zapotlán del rey
- Atequiza
- Tlajomulco (cabecera y Cajititlán)
- PTAR El Ahogado (ZMG 1)
- El Salto y Juanacatlán (Frac. Andalucía)
- Jala y Santa fe
- Zapotlanejo
- PTAR Agua prieta (ZMG 2)
- Cuquío
- Ixtlahuacán del río

Entradas y salidas del modelo:

- Chapala
- Río Verde

Para las localidades consideradas, el volumen de descarga se basó en la población de cada una para el año 2010, y utilizando un valor de 230 l/hab/día de consumo y un factor de retorno de 80% para la estimación de aguas residuales. Los volúmenes de descarga estimados se pueden observar en la **Tabla 5-9**.

Tabla 5-9 Balance de agua para agua residual en fuentes puntuales (m³/d)

Localidad(es)	Población 2010	Consumo de Agua	Descarga total estimada
Arandas	52,175	12,000	9,600
Atotonilco	26,874	6,181	4,945
Cerro gordo, San francisco,	14,964	3,442	2,753



Localidad(es)	Población 2010	Consumo de Agua	Descarga total estimada
San José de Gracia			
Tototlán	12,516	2,879	2,303
Ocotlán	83,769	19,267	15,413
Poncitlán	13,581	3,124	2,499
Zapotlán del rey	3,280	754	604
Atequiza	6,771	1,557	1,246
Tlajomulco (cabecera y Cajititlán)	30,273	6,963	5,570
El Salto y Juanacatlán (Frac. Andalucía)	30,777	7,079	5,663
Jala y Santa fe	2,744	631	505
Zapotlanejo	32,376	7,446	5,957
Cuquío	4,766	1,096	877
Ixtlahuacán del río	6,198	1,426	1,140

Además de las localidades mencionadas se consideran como fuentes de generación las descargas provenientes de las 159 granjas porcícolas localizadas dentro del área de modelación por medio de sistemas de información geográfica (SIG) e imágenes satelitales de la zona.

Las entradas y salidas del modelo, las cuales son el nacimiento del río Santiago en Chapala y la desembocadura del río Verde en su confluencia con el río Santiago, se estimaron tomando algunas consideraciones.

Para la entrada del río Verde, las estaciones hidrométricas en la confluencia del mismo con el río Santiago, no contaban con suficientes registros para obtener el volumen de aportación de esta cuenca o de forma indirecta realizar un balance, es por ello que fue necesario calcularlo utilizando el método racional, el cual está determinado por la siguiente ecuación:

$$Q = Ce * P * A \quad (41)$$

Donde:

- Q Volumen anual a la salida de la cuenca m³/año
- Ce Coeficiente de escurrimiento
- P Precipitación anual en (m)
- A Área de la cuenca en (m²)

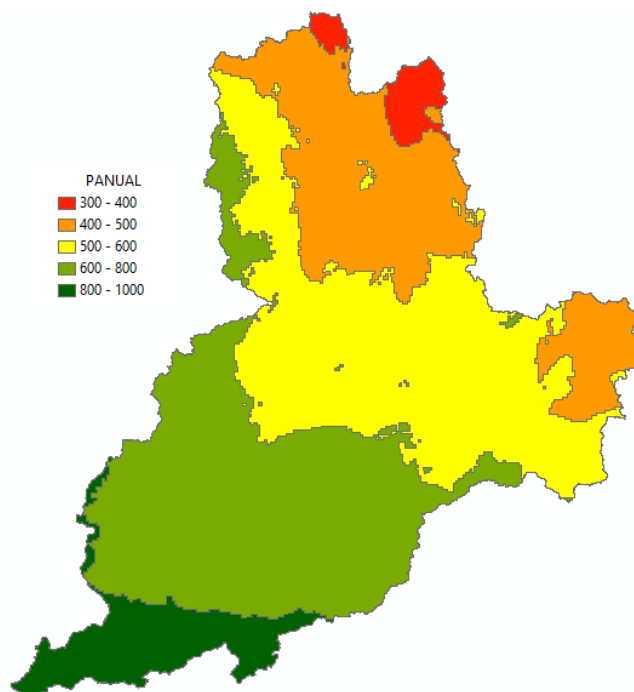


Dado que lo que se busca es conocer Q a la salida de la cuenca del río Verde, es necesario saber las otras tres variables, para ello se consultó la siguiente información espacial:

- Precipitación anual en México 1910-2009 (Cuervo-Robayo, Majarez-García, Sanchez-Sanchez, & Martinez.Meyer, 2014)
- Red hidrológica (INEGI, 2010)

A partir de esta información se determinó tanto la precipitación como el área de la cuenca del río Verde, como se observa en la **Figura 5-21**.

Figura 5-21 Precipitación anual en la cuenca del río Verde 1910-2009



Fuente: Elaboración propia.

Para estimar el coeficiente de escurrimiento se utilizaron los registros de la EH La Cuña, la cual se encuentra a 55 km de la salida de la cuenca, pero el 93.4% de la cuenca se encuentra aguas arriba de la misma. Es por ello que despejando C_e de la ecuación 41 es que se puede estimar el coeficiente de escurrimiento a partir de la información de la EH La Cuña como se observa en la ecuación 42:

$$C_e = \frac{Q}{P * A} \quad (42)$$

$$C_e = \frac{(14.43 \text{ m}^3/\text{s}) * (86,400 \text{ s/día}) * (365 \text{ día/año})}{((586.2 \text{ mm/año}) / (1000 \text{ mm/m})) * (19889.3 \text{ km}^2 * (1,000,000 \text{ m}^2/\text{km}^2))}$$

$$C_e = 0.039$$



Los 14.43 m³/s representan el promedio mensual de los registros en la Cuña durante el periodo de modelación, eliminando años incompletos. Una vez que se obtuvo el coeficiente de escurrimiento para aguas arriba se utiliza el mismo para estimar el volumen de salida de agua para el tramo del río Verde entre la EH La Cuña y el río Santiago (ecuación 41).

$$Q = Ce * P * A$$

$$Q = 0.039 * (1401.1 \text{ km}^2 * (1,000,000 \text{ m}^2 / \text{km}^2)) * ((864.7 \text{ mm/año}) / (1000 \text{ mm/m}))$$

$$Q = (47282288.9 \text{ m}^3 / \text{año}) / ((365 \text{ día/año}) / (86,400 \text{ s/día}))$$

$$Q = 1.5 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Una vez conociendo el volumen de salida para el tramo faltante se puede estimar la entrada del río Verde al modelo hidrológico. Los 1.5 m³/s no son continuos y que éstos varían de acuerdo al caudal en su momento, es por ello que el ajuste se realiza de forma porcentual (y no adicional) mediante un factor de 1.104 el cual multiplica los registros en la EH La Cuña para darnos el volumen estimado de río Verde hasta su confluencia al Santiago.

Para la entrada y salida que representa el lago de Chapala, se contactó a SIAPA y CONAGUA para solicitarles información respecto a la operación del sistema de compuertas Chapala-Ocotlán-Poncitlán. A partir de la solicitud mencionada se obtuvo la siguiente información:

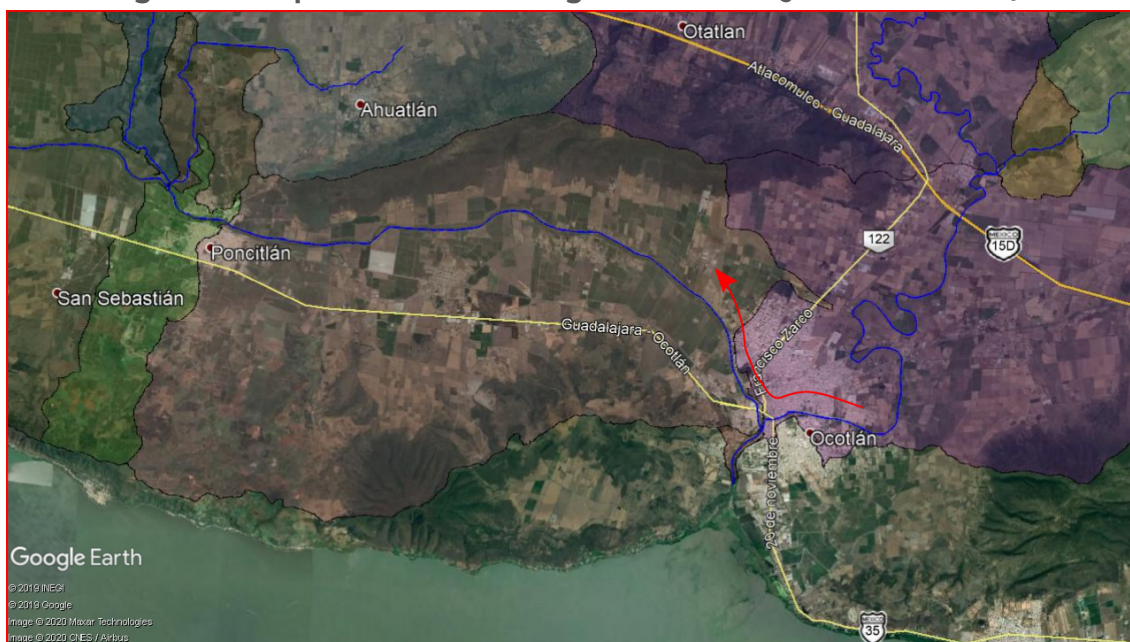
- “Criterios operativos” de las compuertas en Ocotlán
- Registros de suministro a distrito de riego (2.45 m³/s promedio)
- Volumen entregado a canal de Atequiza (2.2 m³/s promedio)

A partir de los “criterios operativos” se obtiene lo siguiente:

- No existe un reglamento interinstitucional (entre CONAGUA y SIAPA) para la operación del sistema, este se da dependiendo de las circunstancias que prevalecen en un momento dado.
- Usos del agua:
 - Agrícola: Se elabora un documento denominado plan de riegos en el que se especifica las superficies a regar y las fechas de cuando se requiere el riego.
 - Uso Público Urbano: SIAPA es quien solicita los requerimientos en el año.
 - De la suma se determina los equipos que entran en operación en Ocotlán .
- Operación compuertas: Escurrimientos por debajo de los 5.0 m³/s es posible dejar colocados los obturadores y permitir que estos circulen hacia el río Santiago para abastecer al SIAPA, arriba de los 5.0 m³/s se abren los obturadores para que el agua del río Zula fluya hacia el lago de Chapala.

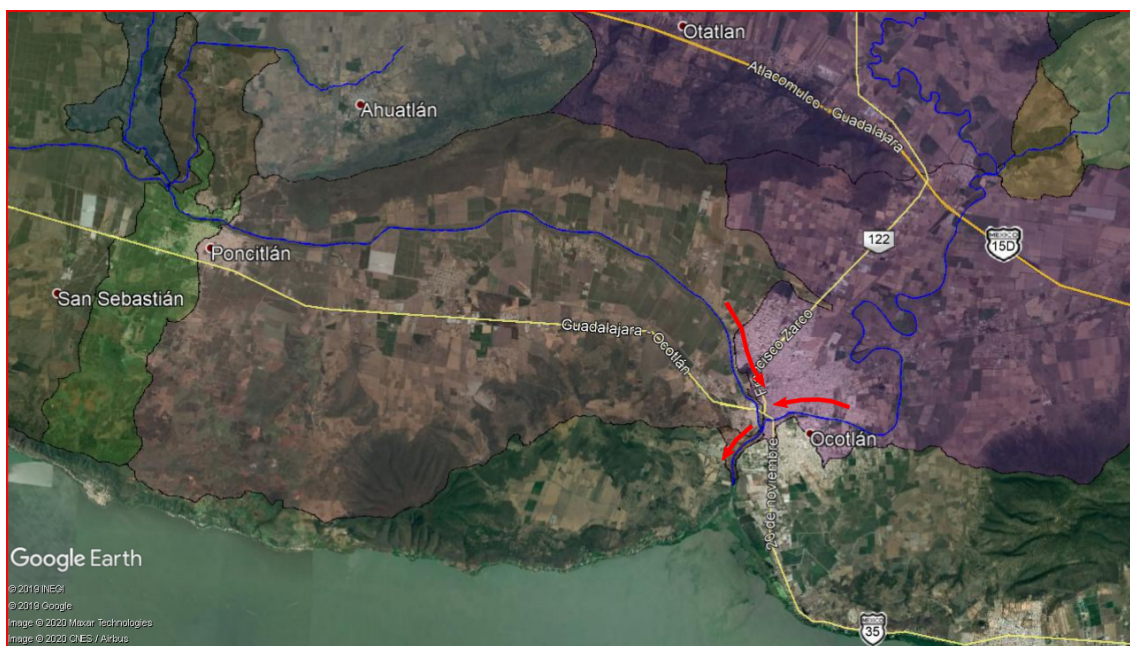
A partir de lo anterior se puede entender que las únicas entradas al sistema por parte del lago de Chapala están dadas por los volúmenes entregados al distrito de riego y al SIAPA, mientras que las salidas (hacia el lago de Chapala) están determinadas por el flujo que presente el río Zula, como se observa en la **Figura 5-22** y **Figura 5-23**, estos volúmenes de salida se determinaron al momento de la calibración y se explican con mayor detalle en esa sección.

Figura 5-22 Operación Río Santiago en Ocotlán Q es Menor a $5\text{m}^3/\text{s}$



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5-23 Operación Río Santiago en Ocotlán Q es Mayor a $5\text{m}^3/\text{s}$



Fuente: Elaboración propia.

De los registros de suministro al distrito de riego (#13 Estado de Jalisco) y los volúmenes entregados al canal de Atequiza (público urbano, SIAPA), se obtuvo la cantidad de agua entregada en las compuertas de Ocotlán y por lo tanto las entradas al modelo en este punto, lo anterior se puede observar de forma anualizada en la **Tabla 5-10**.



Tabla 5-10 Volúmenes Promedio a Distrito de Riego y Canal de Atequiza (m³/s)

Mes	Distrito de riego (1998-2018)	Canal de Atequiza (2013-2018)
Enero	6.2	2.3
Febrero	6.5	2.6
Marzo	7.4	2.3
Abril	6.7	2.3
Mayo	0.9	3.0
Junio	0.1	2.4
Julio	0.1	1.9
Agosto	0.3	1.8
Septiembre	0.2	1.6
Octubre	0.2	1.9
Noviembre	0.3	2.1
Diciembre	0.5	2.0
Promedio	2.45	2.2

Parámetros de suelo

Los datos de suelos utilizados por SWAT se pueden dividir en dos grupos: características físicas y características químicas. Las propiedades físicas del suelo gobiernan el movimiento del agua y del aire a través del perfil y tienen un impacto importante en el ciclo del agua dentro de las HRU. Las entradas para las características químicas se utilizan para establecer los niveles iniciales de los diferentes productos químicos en el suelo.

El archivo de entrada de suelo (.sol) define las propiedades físicas de todas las capas del suelo. Y no se contempla cambio alguno en esta etapa.

Edición de información del clima

SWAT requiere información diaria de precipitación, temperatura máxima / mínima del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Los valores de todos estos parámetros se pueden leer a partir de registros de datos observados o pueden ser generados.

Cuando se requieren generar, el archivo de entrada del generador meteorológico contiene los datos estadísticos necesarios para generar datos climáticos diarios representativos para las subcuencas. Idealmente, al menos 20 años de registros se utilizan para calcular los parámetros en el archivo .wgn. Los datos climáticos se generarán en dos casos: cuando el usuario especifica que se debe simular o cuando existen valores faltantes en las mediciones.

No se realizó edición de la información en esta etapa.



Parámetros de las subcuencas

El archivo de entrada general de la subcuenca contiene información relacionada con una diversidad de características dentro de la subcuenca. Los datos contenidos en el archivo de entrada de la subcuenca pueden agruparse en las siguientes categorías: tamaño y ubicación de la subcuenca, especificación de los datos climáticos utilizados en la subcuenca, el relieve topográfico dentro de la subcuenca y su impacto en el clima, propiedades de los canales tributarios en la subcuenca, variables relacionadas con el cambio climático, el número de HRU en la subcuenca y los nombres de los archivos de entrada de HRU.

No se realizó edición de la información en esta etapa.

Parámetros de las HRU

El archivo de entrada general HRU contiene información relacionada con una diversidad de características dentro de la HRU. Los datos contenidos en el archivo de entrada de HRU pueden agruparse en las siguientes categorías: características topográficas, flujo de agua, erosión, cubierta de tierra y áreas de almacenamiento en depresión.

No se realizó edición de la información en esta etapa.

Datos del cauce principal

Para simular los procesos físicos que afectan el flujo de agua y el transporte de sedimentos en la red de canales de la cuenca, SWAT requiere información sobre las características físicas del canal principal dentro de cada subcuenca. El archivo de entrada de canal principal (.rte) resume las características físicas del canal que afectan el flujo de agua y el transporte de sedimentos, nutrientes y pesticidas.

Inicialmente el modelo estima las dimensiones representativas del cauce en sus diferentes secciones a partir de las dimensiones de las subcuencas y el modelo de elevación, sin embargo, estas resultan ser desproporcionadas en la anchura con respecto a lo observado en el río, por lo que fue necesario modificarlo. Las ediciones al cauce se realizaron a partir de mediciones en diferentes secciones mediante herramientas geoespaciales, los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 5-11** y **Tabla 5-12**.

Tabla 5-11 Medidas ajustadas de los cauces principales en el modelo

No. cuenca (tramo)	Cauce	Ajuste	
		Ancho (m)	Alto (m)
45	Río Santiago	104.9	4.22
38	Río Santiago	95.7	3.97
37	Río Santiago	77.4	3.89
33	Río Santiago	77.3	3.49
31	Río Santiago	75.3	3.44
29	Río Santiago	67.0	3.36



No. cuenca (tramo)	Cauce	Ajuste	
		Ancho (m)	Alto (m)
26	Río Santiago	66.1	3.12
23	Río Santiago	58.4	2.99
22	Río Santiago	50.9	2.86
19	Río Santiago	50.9	2.69
16	Río Santiago	50.1	2.63
15	Río Santiago	43.8	2.62
14	Río Santiago	43.3	2.58
13	Río Zula	37.9	2.54
9	Río Zula	34.6	2.41
4	Río Zula	23.9	1.73
1	Río Zula	19.2	1.10

Tabla 5-12 Medidas ajustadas de los cauces tributarios en el modelo

No. cuenca (tramo)	Cauce	Ajuste	
		Ancho (m)	Alto (m)
Cuquio, Ixtlahuacán del río			
44	Tributario	20.5	1.06
43	Tributario	16.9	1.18
42	Tributario	7.1	0.54
41	Tributario	6.1	0.49
40	Tributario	9.4	0.71
39	Tributario	6.3	0.54
Calderón			
36	Tributario	26.3	1.35
35	Tributario	17.8	1.18
34	Tributario	12.2	1.04
Zapotlanejo			
32	Tributario	9.5	0.81





No. cuenca (tramo)	Cauce	Ajuste	
		Ancho (m)	Alto (m)
La Laja			
30	Tributario	12.2	1.04
El ahogado			
28	Ahogado	20.5	1.07
27	Ahogado	19.9	1.69
Cajititlán			
25	Tributario	14.8	0.93
24	Tributario	11.3	0.96
Presa La Cañada			
21	Tributario	9.4	0.65
20	Tributario	5.1	0.43
	La Colonia		
18	Tributario	8.1	0.42
17	Tributario	7.6	0.64
Presa La Guaracha			
12	Tributario	8.5	0.60
11	Tributario	8.3	0.60
10	Tributario	7.0	0.60
Presa Garabatos			
8	Tributario	23.8	1.11
7	Tributario	15.5	1.03
6	Tributario	10.5	0.76
5	Tributario	8.2	0.70
Presa El Tule			
3	Tributario	9.8	0.76
2	Tributario	4.7	0.40



Datos de agua subterránea

El SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: un acuífero poco confinado que contribuye con el flujo de retorno a los arroyos dentro de la cuenca y un acuífero profundo y confinado que no aporta flujo de retorno a los arroyos dentro de la cuenca. Las propiedades que rigen el movimiento del agua hacia y desde los acuíferos se inicializan en el archivo de entrada del agua subterránea.

No se realizó edición de la información en esta etapa.

Datos de Usos del Agua

El consumo de agua es una herramienta de gestión que elimina el agua de la cuenca por usos consuntivos. Este archivo se utiliza para simular la remoción de agua para riego fuera de la cuenca o la eliminación de agua para uso urbano/industrial. El agua eliminada para uso consuntivo se considera que se pierde del sistema. SWAT permite que el agua sea removida del acuífero poco profundo, el acuífero profundo, el alcance o el estanque en cualquier subcuenca de la cuenca. El agua también puede ser removida de los reservorios/presas para uso consuntivo (véase el archivo .res).

Para el uso consuntivo urbano, se consideró el número de población y la dotación (230 l/hab/día de acuerdo con (SIAPA, 2014)). El modelo, al manejarse por cuencas, no respeta divisiones políticas, por lo que se separó la población por cuencas y no por municipio o localidad, como se observa en la **Tabla 5-13**.

Tabla 5-13 Uso consuntivo urbano

No. cuenca SWAT	Población 2010	Consumo de agua (m ³ /año) *
1	52,085	4,372,536
4	26,618	2,234,581
7	19,749	1,657,929
9	12,402	1,041,148
13	83,522	7,011,672
14	5,574	467,937
15	2,800	235,060
16	16,079	1,349,832
17	3,269	274,433
22	13,658	1,146,589
23	7,625	640,119
24	48,482	4,070,064
25	33,930	2,848,424



No. cuenca SWAT	Población 2010	Consumo de agua (m³/año) *
27	1,117,550	93,818,323
28	29,483	2,475,098
29	51,235	4,301,178
30	5,813	488,001
32	31,908	2,678,677
34	7,547	633,571
35	2,445	205,258
37**	3,046,000	8,784,820
40	4,766	400,106
44	6,198	520,322

*El consumo contempla únicamente el abastecimiento subterráneo.

**La cuenca 37 corresponde a la cuenca de Guadalajara, por lo que no se considera las entradas de Chapala y presa Calderón.

De igual manera se contempló como uso consuntivo el relativo a las actividades pecuarias (porcino y bovino), por lo que se calculó el consumo de agua a partir del número de cabezas y lo reportado en la literatura en cuanto al consumo de agua con base en las edades de la población de ganado (De Blas y Garrido, 2012).

Tabla 5-14 Valores típicos consumo de agua actividades pecuarias

Consumo de agua	Valor	Unidad
Bovino	66.1	l/día
Porcino	7.3	l/día

Tabla 5-15 Consumo de agua bovinos y porcinos

Cuencas	Bovinos		Porcinos	
	Cabezas	Agua (m³/día)	Cabezas	Agua (m³/día)
Zula	242,713	16,044	297,471	2,168
Santiago 1	52,401	3,464	19,341	141
Santiago 2	108,266	7,156	64,146	468



Cuencas	Bovinos		Porcinos	
	Cabezas	Agua (m ³ /día)	Cabezas	Agua (m ³ /día)
Zapotlanejo	46,569	3,078	16,670	122
Calderón	118,550	7,836	176,440	1,286
Total	568,499	37,578	574,068	4,185

El número de cabezas se obtuvo, para porcinos a partir de la base de datos proporcionada por la CEA para dicha actividad por municipio, mientras que para los bovinos a nivel municipal la única información disponible era el Censo agrícola 2007 (INEGI, 2008), por lo que fue necesario mediante una relación entre la información a nivel estatal que estaba más actualizada y la base de datos de la CEA el poder estimar un número actual de número de cabezas de ganado en la zona de estudio.

Administración y manejo

Un objetivo primario del modelado ambiental es evaluar el impacto de las actividades humanas en un sistema dado. El punto central de esta evaluación es la enumeración de las prácticas de manejo de tierras y aguas que tienen lugar dentro del sistema. El archivo primario utilizado para resumir estas prácticas es el archivo de administración HRU (.mgt).

Este archivo contiene datos de entrada para la siembra, cosecha, aplicaciones de riego, aplicaciones de nutrientes, aplicaciones de pesticidas y operaciones de labranza. La información sobre los drenajes de azulejos y áreas urbanas también se almacena en este archivo.

El archivo de gestión de prácticas de manejo se puede dividir en dos secciones. La primera sección resume las entradas para condiciones iniciales o prácticas de gestión que nunca cambian durante la simulación. La segunda sección enumera el calendario de operaciones de gestión que ocurren en momentos específicos.

Para usos agrícolas se consideró modificar los valores de entrada a partir de información recabada del Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007 (INEGI), y la Encuesta Nacional Agrícola 2017 (INEGI), para determinar los cultivos principales que se siembran en la región. Una vez determinados, se consultó la Agenda Técnica Agrícola Jalisco, publicación de la SAGARPA, SENASICA y el INIFAP, de donde se obtuvieron los procesos de cultivo recomendados para la región en cuestión, tanto en tiempos de siembra y cosecha, cantidad de fertilizantes y pesticidas.

La información de usos de suelo del INEGI para usos agrícolas no viene por tipo de cultivo, sino por la practica dominante (ej. anual/permanente o temporal/riego), por lo que fue necesario determinar un cultivo principal para los usos de suelo contemplados.

En la **Tabla 5-16** se describen de forma general, pero más específicamente, las modificaciones realizadas a las prácticas de manejo de acuerdo al uso de suelo considerado en el modelo.



Tabla 5-16 Modificaciones a las prácticas de manejo en el modelo

Clave SWAT	Uso de suelo	Practica de manejo contemplada
BARR	Sin vegetación	No se contempla cambio en la práctica de manejo
URBN	Urbano	No se contempla cambio en la práctica de manejo
PINE	Bosque de pino	Se considera perennifolio, así que se elimina el proceso de cosecha para asegurar que no existe pérdida vegetal según la temporada. Se maneja que la vegetación ya estaba presente al inicio de la simulación.
OAK	Bosque de encino	Se considera perennifolio, así que se elimina el proceso de cosecha para asegurar que no existe pérdida vegetal según la temporada. Se maneja que la vegetación ya estaba presente al inicio de la simulación.
WATR	Cuerpos de agua	No se contempla cambio en la práctica de manejo
HAY	Agricultura de humedad	Se cambió el cultivo principal a maíz, se adecuo la fecha de siembra para junio y la cosecha para diciembre, así como se adiciono la práctica de riego para el periodo de cultivo, con fertilización (18-46-00 y urea). Se agregó la práctica de riego acuerdo a los requerimientos de la planta, donde la fuente de abastecimiento principal sea el acuífero somero.
PAST	Pastizal	Se respetó que al inicio de la simulación no exista vegetación presente, al considerar que su comportamiento es similar a un cultivo de temporal.
AGRC	Agricultura de riego (anual)	Se cambió el cultivo principal a maíz, se adecuo la fecha de siembra para junio y la cosecha para diciembre, así como se adiciono la práctica de riego para el periodo de cultivo, con fertilización (18-46-00 y urea). Se agregó la práctica de riego continuo de acuerdo a los requerimientos de la planta, donde la fuente principal de abastecimiento sea agua subterránea.
FRSD	Selva baja caducifolia	Plantas con características caducifolias, por lo que se aseguró de que exista el proceso de cosecha para simular la caída de las hojas. Se maneja que la vegetación ya estaba presente al inicio de la simulación.



Clave SWAT	Uso de suelo	Practica de manejo contemplada
AGRL	Agricultura de temporal (anual)	Se cambió el cultivo principal a maíz y se adecuo las fechas de siembra para junio y cosecha para diciembre, con fertilización (18-46-00 y urea).
AGRR	Agricultura semipermanente	Se considera el cultivo principal como espárrago (al ser de la misma especie que el agave y con características de crecimiento similar), se siembra al inicio de la modelación y la cosecha se programa para el año 7, simulando así el ciclo del agave, adicionalmente se contempló la adición de 18-46-00 y urea como fertilizante.
ORCD	Agricultura permanente	Se considera el cultivo principal como Manzana (simulando el aguacate/limón como cultivos dominantes), se maneja que la vegetación ya estaba presente al inicio de la simulación y 2 cortes (cosechas sin despirme) durante el año, así como se adiciono la práctica de riego para todo el año y fertilización con fosforo.
WETN	Vegetación de humedal	No se contempla cambio en la práctica de manejo
SWRN	Pecuario	Se estimó la producción de estiércol y urea a partir del número de cabezas (bovino y porcino), mismas que se adicionan en forma de fertilización continua en el área.

Química de los suelos

La entrada de las características químicas se utiliza para inicializar las cantidades de productos químicos en el suelo. Se recomienda la inclusión de un período de equilibrio (un año o más) al comienzo de un período de simulación para que el ciclo hidrológico esté completamente operativo.

El período de equilibrio también permite que los niveles de nutrientes en el suelo se equilibren, haciendo la inicialización de características químicas en el suelo innecesaria en la mayoría de los casos. En caso de existir muestreos significativos de suelos en el área de estudio, únicamente se recomienda modificar las propiedades químicas si los niveles de nutrientes o pesticidas en el suelo son atípicamente altos. No se realizó edición de la información en esta etapa.

Estanques y humedales

Los estanques y humedales son embalses ubicados dentro del área de la subcuenca. Estos embalses reciben cargas sólo de la superficie de la subcuenca.

El archivo .pnd contiene información sobre parámetros, de dónde obtener información sobre retención y estanques húmedos, información sobre las cuencas de retención-riego y de filtración de sedimentación e información utilizada para modelar el balance de agua, sedimentos y nutrientes de estanques y humedales. Todos los procesos son modelados de la misma manera para los estanques y humedales excepto para el flujo de salida.



Tabla 5-17 Características de las presas contempladas en el Modelo Hidrológico

Cuenca SWAT	Nombre oficial	Lat	Long	NAME (ha)	NAME (hm ³)	NAMO (ha)	NAMO (hm ³)	Volumen extraído (m ³ /año)	Flujo Max Vertedor (m ³ /s)	Propósito	Uso del agua
2	El Tule	20.73	-102.43	628	38.9	533	28.9	11,745,168	565.9	Almacenamiento Control de avenidas	Riego (1641 ha)
5	Garabatos	20.63	-102.70	154	15.2	135	12.0	4,876,886	250	Almacenamiento	Riego (1360 ha)
10	Xonocostle	20.46	-102.66	74	4.0	65	3.2	1,300,503	54	Almacenamiento	Riego (640 ha)
11	La Guaracha	20.42	-102.70	177	5.75	155	5.0	2,032,036	49	Almacenamiento	Riego (500 ha)
15	Derivadora Poncitlán	20.39	-102.92		0*		0*	59,181,643	379.62	Derivación Regulación o cambio de régimen	Riego (7250 ha)
17	La Colonia	20.43	-102.93	329	5.8	286	4.8	1,962,947	97.8	Almacenamiento	Riego (581 ha)
20	La Cañada	20.49	-102.94	91	3.6	80	2.9	1,158,260	57.7	Almacenamiento	Riego (N/D ha)
24	Laguna de Cajititlán	20.43	-103.31	1827	57.9	1735	45.7	18,589,065	926.0	Almacenamiento	Riego (2514 ha)
27	El Ahogado	20.51	-103.25	617	6.3	540	5.0	2,032,036	12	Almacenamiento	Riego (350 ha)
27	El Cuervo	20.51	-103.38	58	4.49	51	3.3	1,320,823	45.12	Almacenamiento	Riego (80 ha)
27	El Guayabo	20.54	-103.40	47	2.3	41	1.8	731,533	8.9	Almacenamiento	Riego (81 ha)

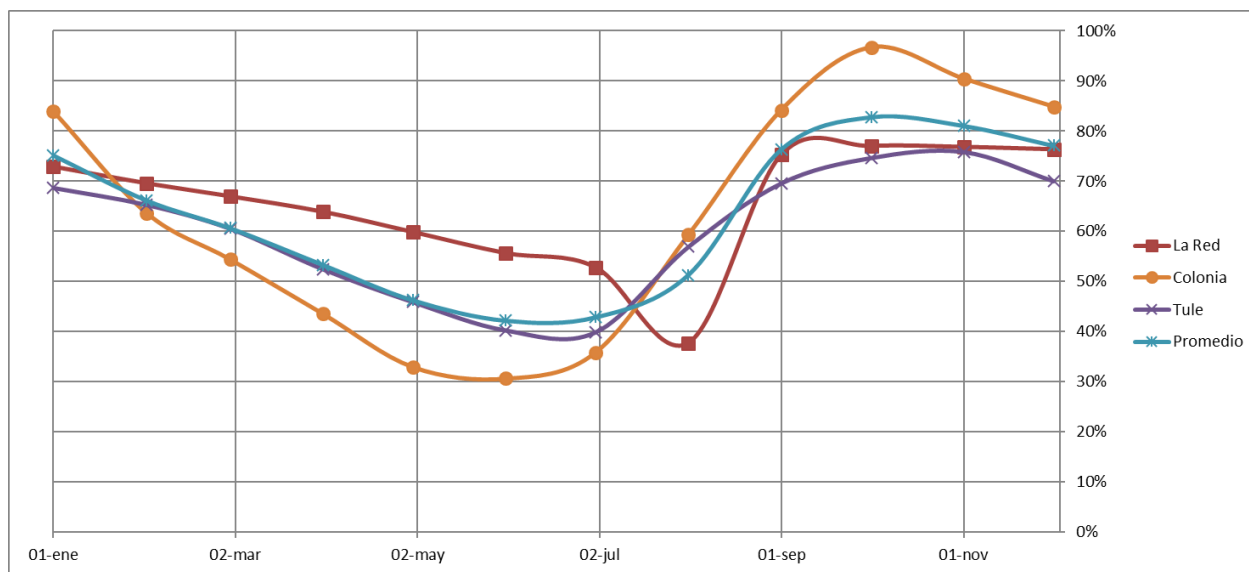


34	La Red	20.72	-102.82	236	18.8	196	14.3	5,791,302	282	Almacenamiento	Riego (1313 ha)
35	Ing. Elías González Chávez (Calderón)	20.68	-102.98	1060	101.8	944	82.0	2 (m/s)**	290	Almacenamiento	Agua potable
39	Cuquío (los gigantes)	20.95	-103.04	167	8.88	146	7.5	3,048,054	121	Almacenamiento	Riego (1345 ha)
41	Cuácuala	20.96	-103.09	98	8.12	86	6.5	2,641,647	230	Almacenamiento	Riego (1067 ha)
43	Los sauces	20.88	-103.22	120	14.98	105	11.5	4,665,555	915.9	Almacenamiento	Riego (2125 ha)



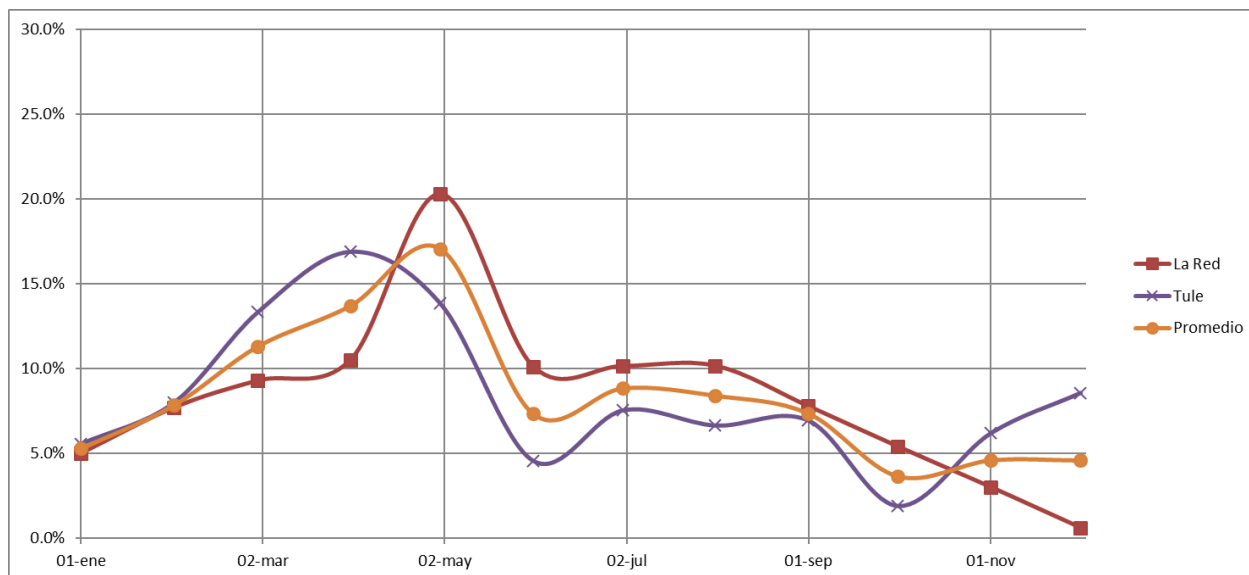
Se determinó la operación de las presas a partir de los registros históricos reportados en el BANDAS (CONAGUA), sin embargo, la disponibilidad de información era limitada dado que únicamente existe información reportada para 3 presas dentro del área de estudio, por lo que para definir la operación del resto de presas se tomó como base el promedio de las reportadas para obtener un estimado, como se observa en las **Figura 5-24** y **Figura 5-25**.

Figura 5-24 Porcentaje de llenado anualizado por presa



Fuente: Elaboración propia

Figura 5-25 Porcentaje de extracción anualizado por presa



Fuente: Elaboración propia.



Donde el porcentaje de llenado, sirve como una referencia al momento de evaluar el comportamiento del embalse en el modelo, y el porcentaje de extracción sirve para estimar la operación como tal.

Calidad del agua en los cauces

Si bien la calidad del agua es un tema amplio, las principales áreas de preocupación son los nutrientes, los productos químicos orgánicos, tanto agrícolas (pesticidas) como industriales, los metales pesados, las bacterias y los sedimentos en arroyos y grandes masas de agua. SWAT es capaz de modelar procesos que afectan los niveles de nutrientes, plaguicidas y sedimentos en los principales canales y reservorios. Los datos utilizados por SWAT para los procesos de calidad de agua en flujo están contenidos en dos archivos: el archivo de entrada de calidad de agua de arroyo (.swq) para alcances específicos y el archivo de entrada general de calidad de agua (.wwq) para procesos modelados uniformemente en toda la cuenca.

No se realizó edición de la información en esta etapa.

Séptico

El fichero de entrada de los Sistemas de Aguas Residuales en Sitio contiene información relacionada con una diversidad de características de estos dentro de la subcuenca. Los datos contenidos en el archivo de entrada de fosas sépticas son: tipo de sistema séptico, geometría de la biozona, características de la biomasa y coeficientes de reacción biofísica que ocurren en la biozona (Siegrist, y otros, 2005).

No se realizó edición de la información en esta etapa.

Operaciones

El archivo de Operaciones de Gestión Programada (.ops) es un archivo opcional que permite la simulación de actividades no recurrentes relacionadas con la gestión. El archivo .ops es particularmente útil para comenzar medidas de conservación en media simulación. Después de su inicialización, las prácticas permanecen en vigor durante el resto de la simulación. Deben especificarse el día y los parámetros operacionales relevantes. Varias medidas de conservación sólo están disponibles a través del archivo .ops.

No se realizó edición de la información en esta etapa.

Parámetros generales de la cuenca

Los atributos generales de la cuenca se definen en el archivo de entrada de la cuenca. Estos atributos controlan una diversidad de procesos físicos a nivel de cuenca. Las interfaces automáticamente establecerán estos parámetros en los valores "predeterminados" o recomendados que se enumeran en la documentación de variables. Los usuarios pueden usar los valores predeterminados o cambiarlos para reflejar mejor lo que está sucediendo en una cuenca dada. Las variables que gobiernan el transporte de bacterias o plaguicidas necesitan ser iniciados sólo si estos procesos están siendo modelados en la cuenca. Incluso si los nutrientes no están siendo estudiados en una cuenca hidrográfica, se debe prestar cierta atención a estas variables porque el ciclo de los nutrientes afecta el crecimiento de las plantas, que a su vez afecta al ciclo hidrológico.



La siguiente es una breve descripción de las variables en el archivo de entrada de la cuenca. Se enumeran por tema.

Parámetros de calidad del agua de la cuenca

La calidad del agua de la cuenca se aborda de la misma manera que la calidad del agua de los cauces. Los datos utilizados por SWAT para los procesos de calidad del agua en la corriente están contenidos en dos archivos: el archivo de entrada de calidad del agua de la corriente (.swq) para alcances específicos y el archivo de entrada general de la calidad del agua (.wwq) para procesos modelados uniformemente en toda la cuenca.

Actualización del uso del suelo

El archivo landuse update (lup.dat) es un archivo opcional que permite la actualización de fracciones de las HRU durante la ejecución de la simulación. El archivo lup.dat es particularmente útil para comenzar medidas de conservación a media simulación. Después de su inicialización, las prácticas permanecen en vigor durante el resto de la simulación. Debe especificarse el día y los parámetros operacionales relevantes.

No se realizó edición de la información en esta etapa.

5.10 CORRIDA INICIAL DEL MODELO

Una vez que se hicieron los ajustes a los datos de entrada al modelo, estos se deben guardar para que el programa pueda leerlos adecuadamente. El siguiente paso consiste en especificar el periodo de modelación, el cual está establecido a partir de la información climática utilizada: si esta se realizó con datos medidos el modelo únicamente permite modelar el intervalo de registros, en caso que esta información sea generada, el modelo permite intervalos amplios, incluyendo fechas futuras con el simulador de clima (aunque esto no es lo sugerido).

Dado que para este estudio se utilizaron registros de precipitación, el modelo permite modelar del 1° de enero de 1988 al 31 de diciembre de 2017 (periodo de 30 años), y estableciendo un periodo de 5 años para estabilización del modelo, esto permite al modelo que ciertos procesos se estabilicen y no genere información de salida o resultados y así evitar interpretaciones erróneas.

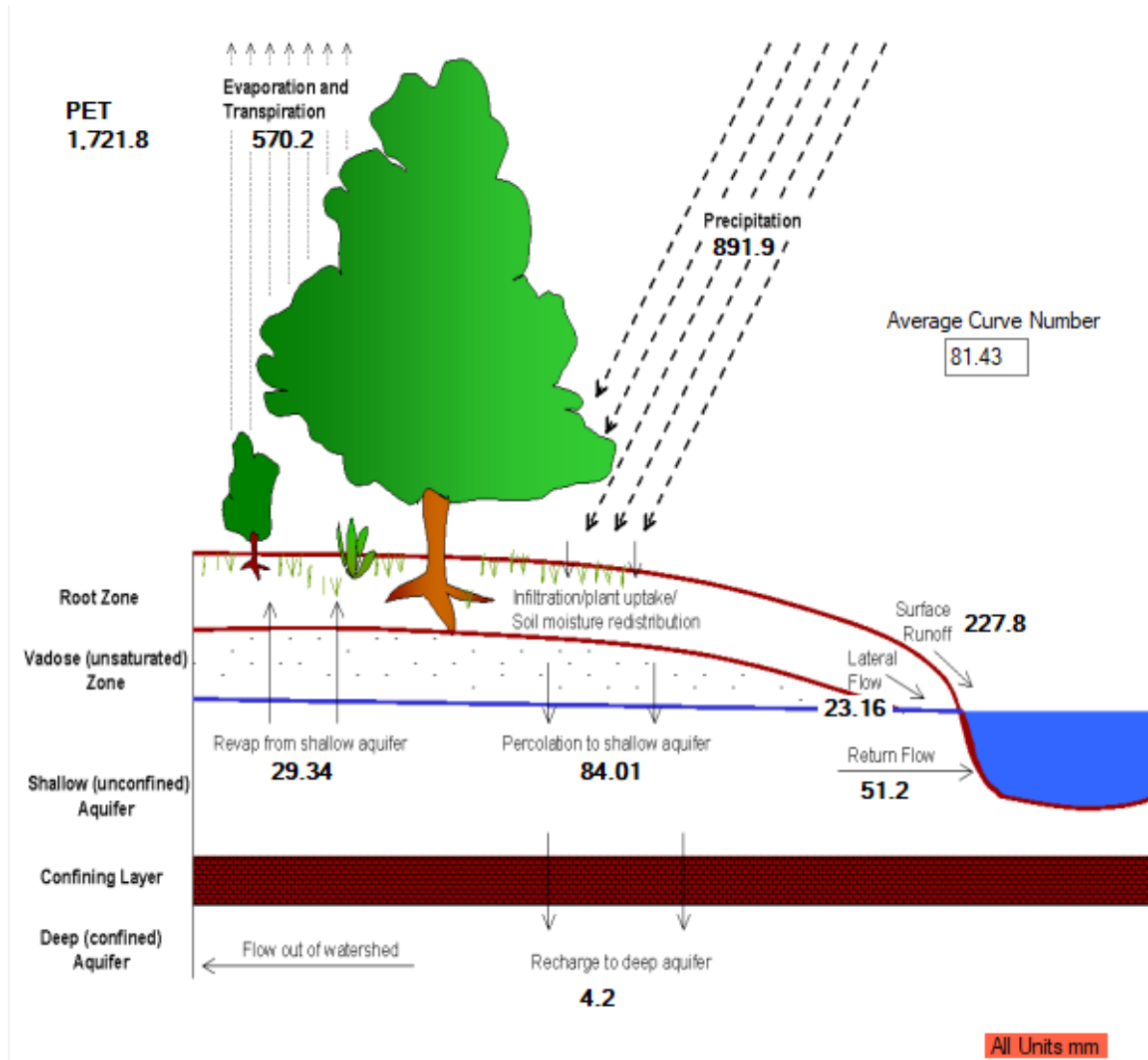
Una vez que se establece el periodo de modelación, se corrió el modelo. El cual arrojó los resultados que se describen en la siguiente sección.

5.10.1 Resultados iniciales

Con la información alimentada en la forma descrita con anterioridad, se realizó una primera corrida del modelo, mismo que entrega una serie de resultados.

La primera serie de valores reportados por el modelo corresponden a la distribución del agua, dentro del ciclo hidrológico, a lo largo de la cuenca. En la **Figura 5-26** se pueden observar los valores correspondientes de forma global para todo el periodo de modelado el cual comprende 25 años de resultados y en la **Tabla 5-18** se presentan estos de forma mensual.

Figura 5-26 Distribución global del agua dentro del ciclo hidrológico según corrida inicial (mm/año)



Fuente: Elaboración propia en SWAT.

Tabla 5-18 Distribución mensual del agua dentro del Ciclo Hidrológico (mm)

Mes	Precipitación	Flujo superficial	Flujo lateral	Salida de agua	Evapotranspiración	Sedimentos	ETP*
1	9.9	1.3	0.2	2.4	14.8	0.1	117.4
2	12.5	3.3	0.3	4.2	15.1	0.6	128.0
3	7.6	1.7	0.2	2.3	20.0	0.3	176.2
4	3.6	0.2	0.1	0.5	21.8	0.0	192.6



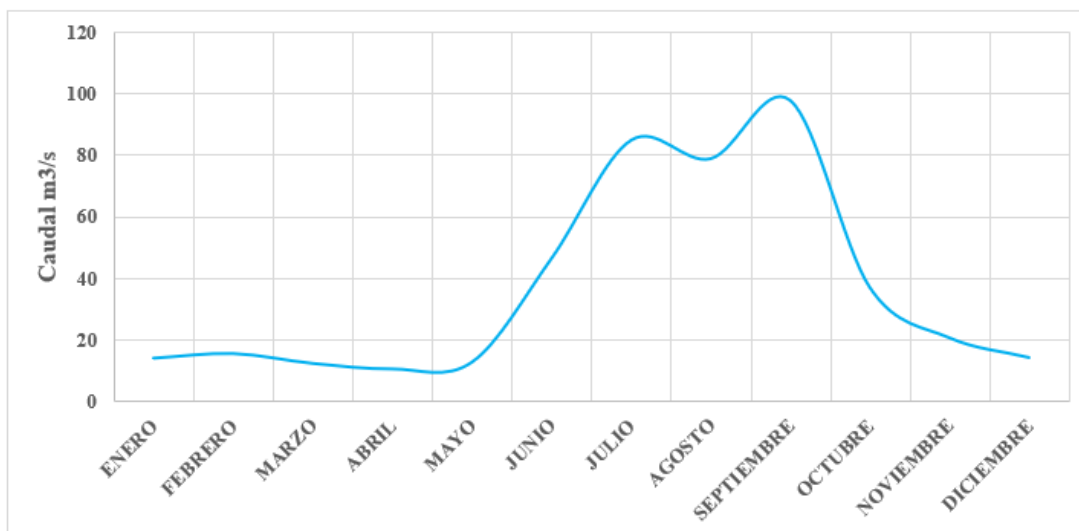
Mes	Precipitación	Flujo superficial	Flujo lateral	Salida de agua	Evapotranspiración	Sedimentos	ETP*
5	27.5	3.7	0.4	4.0	21.6	0.6	198.3
6	177.9	41.3	3.9	45.0	68.8	4.6	135.0
7	227.5	64.7	6.0	74.3	130.3	6.4	162.0
8	192.2	46.3	4.7	59.8	126.1	4.2	160.2
9	160.7	48.6	5.0	65.9	69.6	3.4	103.8
10	52.1	12.9	1.9	30.2	42.6	1.1	124.9
11	12.3	2.4	0.4	12.5	24.6	0.3	113.2
12	8.1	1.5	0.2	5.3	15.0	0.2	109.1

*ETP: Evapotranspiración potencial, la cual se refiere a la evapotranspiración máxima (teórica) que se puede llegar a dar desde un suelo completamente cubierto de vegetación y completamente abastecido de agua.

De forma más general, el modelo proporciona información de caudales de salida del modelo, la cual corresponde a la ubicación de la EH San Cristóbal II. En la **Tabla 5-19** se muestran los caudales de salida promedio calculados por el modelo para cada mes del año y se visualiza en el hidrograma presentado en la **Figura 5-27**.

Tabla 5-19 Caudales de salida promedio

Mes	Caudal [m³/s]
Enero	14.2
Febrero	15.7
Marzo	12.5
Abril	10.7
Mayo	12.9
Junio	46.6
Julio	85.0
Agosto	79.0
Septiembre	97.9
Octubre	37.1
Noviembre	20.8
Diciembre	14.4

**Figura 5-27 Hidrograma en la salida del modelo**

Fuente: Elaboración propia.

Dando un flujo promedio de $63.2 \text{ m}^3/\text{s}$ en la salida del modelo, la cual corresponde a la ubicación de la EH San Cristóbal II, misma donde para el mismo periodo se reporta $36.7 \text{ m}^3/\text{s}$, esta diferencia significativa expone la necesidad de calibrar y validar el modelo hidrológico, mismo que es el paso siguiente en la elaboración del modelo y se describe a continuación.

5.11 CALIBRACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO

Los parámetros de entrada SWAT están basados en procesos por lo que deben mantenerse dentro de un rango de incertidumbre realista. El primer paso en el proceso de calibración y validación en SWAT es la determinación de los parámetros más sensibles para una cuenca o subcuenca. El usuario determina cuáles son las variables a ajustar según el criterio de un experto o el análisis de sensibilidad. El análisis de sensibilidad es el proceso de determinar la tasa de cambio en las salidas del modelo con respecto a los cambios en los insumos del modelo (parámetros). Es necesario identificar los parámetros clave y la precisión de los parámetros necesarios para la calibración (Ma, y otros, 2000). En un sentido práctico, este primer paso ayuda a determinar los procesos y variables predominantes, de manera que sea en estos procesos donde se enfoque los trabajos de calibración.

El segundo paso es el proceso de calibración. La calibración es un esfuerzo para parametrizar mejor un modelo a un conjunto dado de condiciones locales, reduciendo así la incertidumbre de predicción. La calibración del modelo se realiza seleccionando cuidadosamente los valores de los parámetros de entrada del modelo (dentro de sus respectivos rangos de incertidumbre) comparando las predicciones del modelo (salida) para un conjunto dado de condiciones asumidas con datos observados para las mismas condiciones.

El paso final es la validación del componente de interés (caudal, rendimientos de sedimentos, etc.). La validación de modelos es el proceso de demostrar que un modelo específico de sitio es capaz de realizar simulaciones suficientemente precisas, donde "suficientemente precisas"



puede variar en función de las metas del proyecto (Refsgaard, 1997). La validación implica la ejecución del modelo utilizando parámetros que se determinaron durante el proceso de calibración y su posterior comparación con datos observados que no fueron utilizados en la calibración.

En general, una buena calibración y validación del modelo debe incluir:

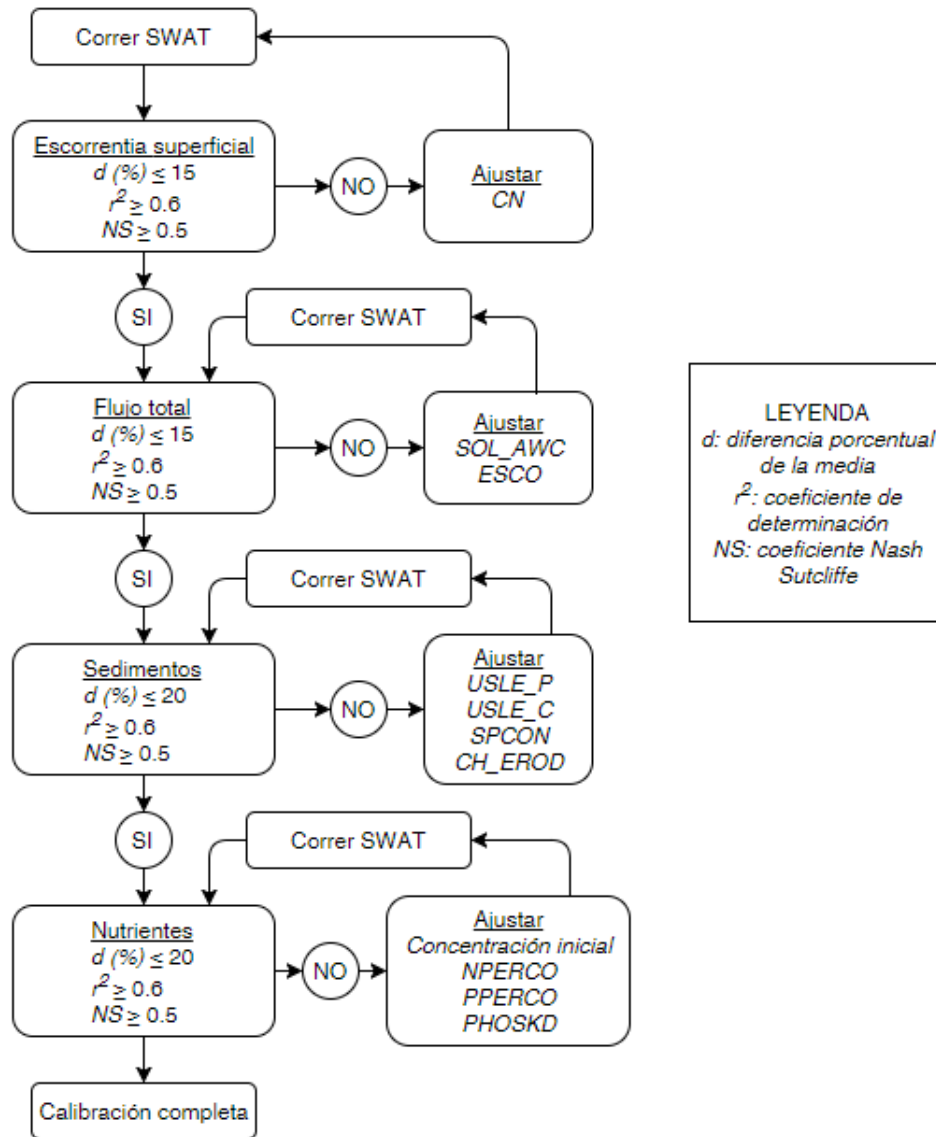
- Datos observados que incluyen años húmedos, medios y secos (Gan, Dlamini, & Biftu, 1997)
- Técnicas de evaluación múltiple (ASCE, 1993) (Legates & McCabe, 1999) (Boyle, Gupta, & Sorooshian, 2000)
- Calibrar todos los componentes a evaluar
- Sirve de apoyo la verificación de que otros resultados importantes del modelo son razonables o congruentes según el criterio del modelador.

La calibración puede realizarse manualmente o utilizando herramientas de autocalibración en SWAT (Van Griensven & Bauwens, 2003), (Van Liew, Arnold, & Bosch, 2005) o SWAT-CUP (Abbaspour, Vejdani, & Haghighat, 2007)

En la **Figura 5-28** se muestra un diagrama de flujo para realizar la calibración manual de: flujo, sedimentos y nutrientes. Durante el proceso de calibración, los usuarios deben verificar los componentes del balance hídrico para asegurarse de que las predicciones son razonables. Varios estudios (Santhi, y otros, 2001) (Engel, Storm, White, Arnold, & Arabi, 2007) recomiendan que el flujo de corriente, sedimentos y el transporte de nutrientes se calibren secuencialmente (en ese orden) debido a las interdependencias entre los constituyentes debido a los procesos de transporte compartidos.



Figura 5-28 Diagrama de flujo para calibración manual del SWAT



Fuente: modificado de (Arnold, y otros, 2012)

La calibración y la validación se realizan típicamente dividiendo los datos observados disponibles en dos conjuntos de datos: uno para la calibración y otro para la validación, asegurando cuidadosamente que los datos climáticos utilizados tanto para la calibración como para la validación no son sustancialmente diferentes, es decir, los años húmedos, moderados y secos ocurren en ambos períodos (Gan, Dlamini, & Biftu, 1997).

Los datos también se pueden dividir espacialmente, con todos los datos disponibles en un lugar de monitoreo asignado a la fase de calibración y realizar correspondientemente la validación en uno o más indicadores de la cuenca. Este enfoque puede ser necesario cuando los usuarios se enfrentan a situaciones limitadas de datos que impiden la realización de una calibración y validación de tiempos parciales utilizando un indicador único.



Los usuarios de SWAT también han utilizado parámetros ya calibrados de una cuenca hidrográfica con condiciones climáticas, suelos y condiciones de uso de la tierra similares para su validación en la cuenca del estudio, o viceversa.

Aunque lo antes mencionado son los enfoques de calibración y validación recomendados, estos no siempre se aplican, debido a que los objetivos y disponibilidad de información varían de estudio en estudio, por lo que se han elaborado varias maneras en las que SWAT ha sido calibrado y validado.

Por lo general para la calibración y validación de modelos, se utilizan estadísticos que sirven para determinar el grado de semejanza entre la serie observada y la simulada. Moriasi et al. lista ciertos criterios estadísticos para determinar el desempeño global de un modelo, los cuales se observan en la **Tabla 5-20** (Moriasi, y otros, 2007).

Tabla 5-20 Estadísticos para evaluación de Modelos Hidrológicos

Desempeño del modelo	RSR	NSE	PBIAS
Muy bueno	$0.0 \leq \text{RSR} \leq 0.5$	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Bueno	$0.5 < \text{RSR} \leq 0.6$	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfactorio	$0.6 < \text{RSR} \leq 0.7$	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$
Inadecuado	$0.7 < \text{RSR}$	$\text{NSE} \leq 0.50$	$\pm 25 \leq \text{PBIAS}$

Fuente: (Moriasi, y otros, 2007)

Para la calibración del presente estudio se utilizó el programa de calibración SWAT CUP, el cual es un programa de dominio público. El programa vincula los procedimientos SUFI 2, PSO, GLUE, ParaSol y MCMC a SWAT. Este permite realizar análisis de sensibilidad, la calibración, la validación y el análisis de incertidumbre de los modelos SWAT.

En la calibración se utilizó el procedimiento SUFI2, siguiendo el orden sugerido, donde primero el modelo es calibrado para flujo, para posteriormente calibrar nutrientes (N y P). Como datos observados se utilizaron los registros hidrométricos del BANDAS, así como datos de los registros de calidad de agua sobre los ríos Santiago y Zula de la CEA.

5.11.1 Calibración y validación hidrológica

Calibración

En concreto, para la calibración hidrológica se utilizaron los registros de la EH San Cristóbal II, misma que contaba con el mayor y más actual número de registros sobre el río Santiago. Ya que el resto de estaciones hidrométricas en la zona de estudio contaba con información incompleta o no actualizada, por lo que su uso no fue posible.



Con esta información se procedió a calibrar el modelo, el análisis de sensibilidad no se llevó a cabo dado que se seleccionaron las variables hidrológicas más importantes que se reportan en la literatura (Arnold, y otros, 2012) para calibrar modelos en SWAT, como se observa en la **Tabla 5-21**.

Tabla 5-21 Variables utilizadas en la calibración

Variable	Clasificación
CN2.mgt	Número inicial de la curva de escurrimiento SCS para la condición de humedad II.
OV_N.hru	Valor "n" de Manning para el flujo por tierra.
HRU_SLP.hru	Pendiente promedio (m / m).
SLSUBBSN.hru	Longitud promedio de la pendiente (m).
EPCO.bsn	Factor de compensación de absorción de planta.
ESCO.bsn	Factor de compensación de la evaporación del suelo.
SURLAG.bsn	Coefficiente de retraso de escurrimiento superficial.
ALPHA_BF.gw	Factor alfa de flujo de base (1 / día).
GW_DELAY.gw	Tiempo de retardo de agua subterránea (días).
GWQMN.gw	Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial requerido para que se produzca el flujo de retorno (mm H ₂ O).
GW_REVAP.gw	Coefficiente de "revaporación" del agua subterránea.
REVAPMN.gw	Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial para "revaporación" o percolación al acuífero profundo (mm H ₂ O).
RCHRG_DP.gw	Fracción de percolación profunda del acuífero.
CH_N2.rte	Valor "n" de Manning para el cauce principal.
CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva en aluvión del canal principal (mm/hr).
SOL_AWC.sol	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo (mm H ₂ O / mm de suelo).
SOL_K.sol	Conductividad hidráulica saturada (mm / h).
SOL_BD.sol	Densidad aparente humedad (Mg / m ³ o g / cm ³).
SOL_Z.sol	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa (mm).

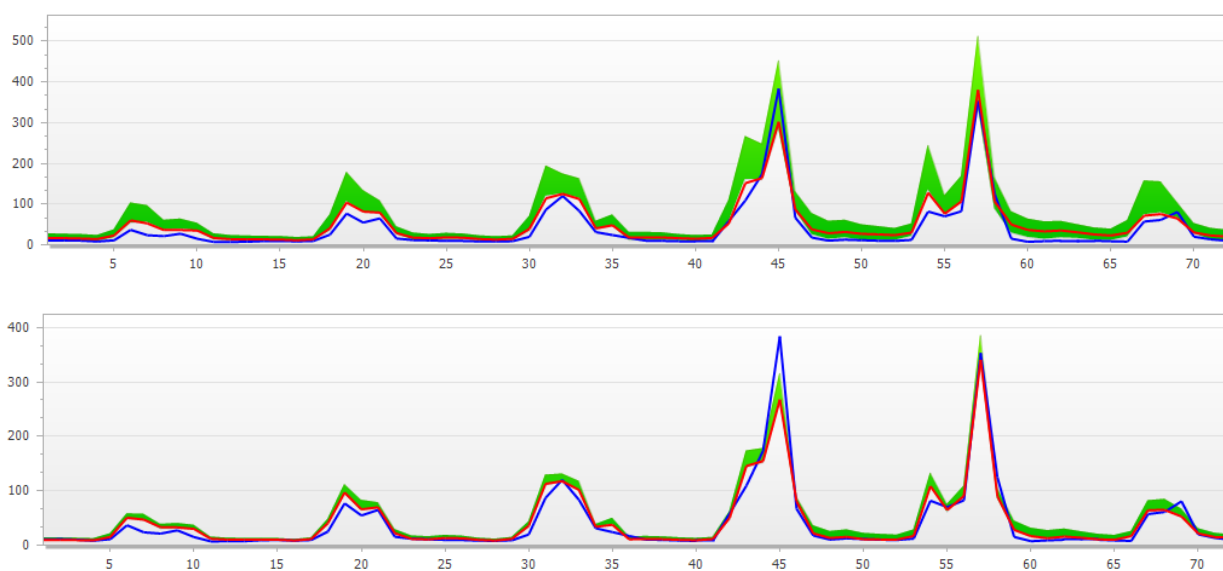
Una vez seleccionadas las variables, dependiendo de las características y/o función de cada una se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones, la primera fue determinar si era conveniente la separación de alguna variable de acuerdo a alguna característica de la misma (ej. por uso de suelo para CN2 o por clasificación de pendiente para HRU_SLP), la segunda fue la manera en que el modelo calibraría cada variable, esto se logra definiendo tanto un método como un rango de variación, debiendo escoger entre una variación porcentual (relativa al valor original) o un remplazo fijo definido, y asignando un rango de variación el cual, dependiendo la naturaleza de la variable, pudiera variar en su amplitud.

Lo anterior resultó en que, de las 19 variables contempladas, una vez separadas por alguna clasificación, resultaran en 60 variables modificadas para el proceso de calibración (ver **Tabla 5-22**). Donde las variables con alguna característica espacial se modificaron de manera porcentual y las que fueran variables con características globales se modificaron mediante remplazo.

Previo al proceso de calibración como tal, pero parte de, se realizó una primera corrida de calibración para el periodo de estiaje, esto con la finalidad de poder estimar cuando el río Zula sobrepasa los 5 m³/s, valor con el cual de acuerdo a CONAGUA es que se abren las compuertas de Ocotlán permitiendo que el Zula fluya hacia Chapala y por lo tanto es agua que sale de la cuenca y por ende el modelo.

Posterior a la extracción del modelo del agua del río Zula en los meses de lluvia o alto flujo (para simular el trasvase hacia el lago de Chapala), se procedió al proceso de calibración para todo el periodo considerado (tanto estiaje como temporal de lluvias), en donde se corrió el programa SWAT-CUP con un número de iteraciones y un rango de variación para cada variable, al finalizar cada corrida de calibración se iban ajustando los rangos de variación a fin de ir reduciendo la incertidumbre y aproximar la calibración a los resultados deseados. Como se observa en la **Figura 5-31**.

Figura 5-31 Reducción de la incertidumbre al ajustar las variaciones en calibración



Fuente: Elaboración propia.



En total se realizaron 6 iteraciones de calibración, en las cuales se corrió el modelo entre 300-500 veces para permitir al programa de calibración contar con suficientes elementos para los procesos estadísticos de calibración y así asegurar que la calibración sea ejecutada adecuadamente. Se detuvo en la sexta iteración una vez que no se observaron ya mejoras aparentes en los resultados de calibración del modelo, quedando la calibración del modelo de acuerdo a la **Tabla 5-22**.

Tabla 5-22 Variables modificadas en la calibración hídrica

Variable	Clasificación	Tipo de ajuste	Mejor ajuste
1:R_CN2.mgt	BARR	Relativo (%)	-0.2
2:R_CN2.mgt	URBN	Relativo (%)	-0.4
3:R_CN2.mgt	PINE	Relativo (%)	-0
4:R_CN2.mgt	OAK	Relativo (%)	-0.2
5:R_CN2.mgt	WATR	Relativo (%)	-0.1
6:R_CN2.mgt	HAY	Relativo (%)	-0.2
7:R_CN2.mgt	PAST	Relativo (%)	-0.3
8:R_CN2.mgt	AGRC	Relativo (%)	-0.3
9:R_CN2.mgt	FRSD	Relativo (%)	-0.3
10:R_CN2.mgt	AGRL	Relativo (%)	-0.3
11:R_CN2.mgt	AGRR	Relativo (%)	-0.4
12:R_CN2.mgt	ORCD	Relativo (%)	-0.1
13:R_CN2.mgt	WETN	Relativo (%)	0.06
14:R_CN2.mgt	SWRN	Relativo (%)	-0.2
15:R_OV_N.hru		Relativo (%)	6.79
16:R_HRU_SLP.hru	0-15	Relativo (%)	0.01
17:R_HRU_SLP.hru	15-40	Relativo (%)	0.07
18:R_HRU_SLP.hru	40-9999	Relativo (%)	-0.1
19:R_SLSUBBSN.hru	AGRL	Relativo (%)	0.13
20:R_SLSUBBSN.hru	FRSD	Relativo (%)	0.04
21:R_SLSUBBSN.hru	AGRC	Relativo (%)	-0
22:R_SLSUBBSN.hru	URBN	Relativo (%)	-0.1
23:R_SLSUBBSN.hru	OAK	Relativo (%)	0.09
24:R_SLSUBBSN.hru	ORCD	Relativo (%)	-0



Variable	Clasificación	Tipo de ajuste	Mejor ajuste
25:R__SLSUBBSN.hru	PAST	Relativo (%)	-0
26:V__EPCO.bsn		Reemplazar	0.36
27:V__ESCO.bsn		Reemplazar	0.42
28:V__SURLAG.bsn		Reemplazar	8.31
29:V__ALPHA_BF.gw		Reemplazar	0.7
30:V__GW_DELAY.gw		Reemplazar	351
31:V__GWQMN.gw		Reemplazar	4401
32:V__GW_REVAP.gw		Reemplazar	0.06
33:V__REVAPMN.gw		Reemplazar	328
34:V__RCHRG_DP.gw		Reemplazar	0.04
35:R__CH_N2.rte		Relativo (%)	18
36:V__CH_K2.rte		Reemplazar	4.65
37:R__SOL_AWC(.1).sol	LOAM	Relativo (%)	2.66
38:R__SOL_AWC(.2).sol	LOAM	Relativo (%)	1.54
39:R__SOL_AWC(.1).sol	SANDY_LOAM	Relativo (%)	1.03
40:R__SOL_AWC(.2).sol	SANDY_LOAM	Relativo (%)	2.51
41:R__SOL_AWC(.1).sol	CLAY_LOAM	Relativo (%)	2.1
42:R__SOL_AWC(.2).sol	CLAY_LOAM	Relativo (%)	0.98
43:R__SOL_K(.1).sol	LOAM	Relativo (%)	0.59
44:R__SOL_K(.2).sol	LOAM	Relativo (%)	0.28
45:R__SOL_K(.1).sol	SANDY_LOAM	Relativo (%)	1.52
46:R__SOL_K(.2).sol	SANDY_LOAM	Relativo (%)	1.08
47:R__SOL_K(.1).sol	CLAY_LOAM	Relativo (%)	1.46
48:R__SOL_K(.2).sol	CLAY_LOAM	Relativo (%)	0.57
49:R__SOL_BD(.1).sol	LOAM	Relativo (%)	-0.1
50:R__SOL_BD(.2).sol	LOAM	Relativo (%)	0.56
51:R__SOL_BD(.1).sol	SANDY_LOAM	Relativo (%)	-0.1
52:R__SOL_BD(.2).sol	SANDY_LOAM	Relativo (%)	0.19
53:R__SOL_BD(.1).sol	CLAY_LOAM	Relativo (%)	0.04

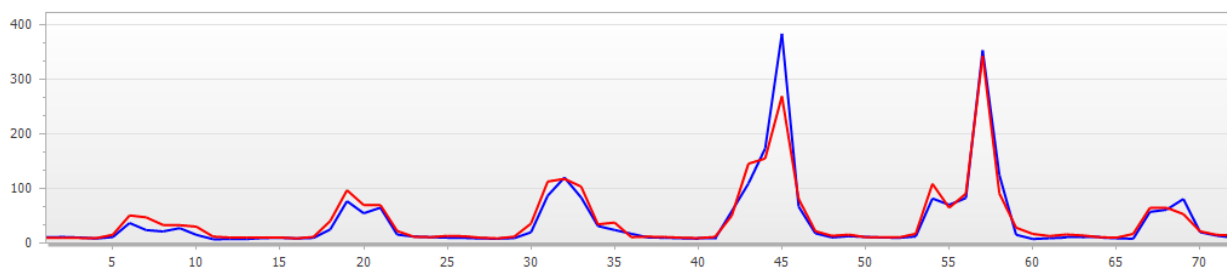


Variable	Clasificación	Tipo de ajuste	Mejor ajuste
54:R__SOL_BD(.2.).sol	CLAY_LOAM	Relativo (%)	0.39
55:R__SOL_Z(.1.).sol	LOAM	Relativo (%)	1.06
56:R__SOL_Z(.2.).sol	LOAM	Relativo (%)	0.3
57:R__SOL_Z(.1.).sol	SANDY_LOAM	Relativo (%)	0.3
58:R__SOL_Z(.2.).sol	SANDY_LOAM	Relativo (%)	-0
59:R__SOL_Z(.1.).sol	CLAY_LOAM	Relativo (%)	0.58
60:R__SOL_Z(.2.).sol	CLAY_LOAM	Relativo (%)	0.1

*Para las variables de suelo (archivo .sol) se separó por capa de suelo (1 y 2) y clasificación de suelo.

La **Figura 5-32** muestra los resultados de la última calibración, donde la línea azul representa los valores observados en campo y la línea roja representa la simulación que estadísticamente representa el mejor ajuste.

Figura 5-32 Resultados de la calibración hídrica del modelo



Fuente: Elaboración propia.

Los estadísticos para determinar la semejanza del modelo (Moriasi, y otros, 2007) descritos en la **Tabla 5-20**, resultaron ser:

- RSR: 0.27 (Muy bueno)
- NSE: 0.93 (Muy bueno)
- PBIAS: -6.3 (Muy bueno)

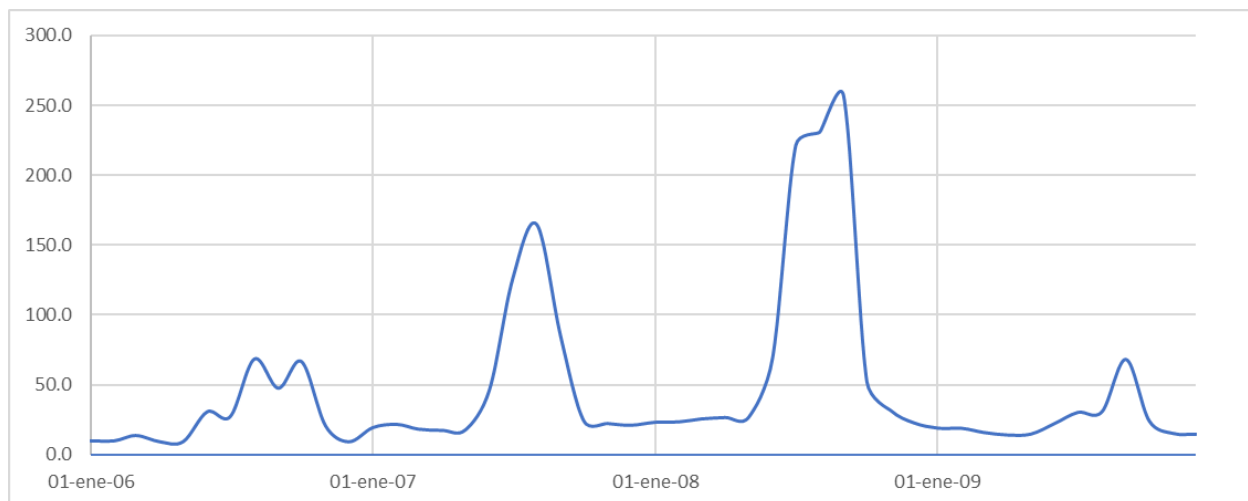
Una vez calibrado el modelo hidrológicamente, corresponde ahora validarlo y así corroborar que el modelo hidrológicamente responde adecuadamente y por lo tanto es creíble.

Validación

Como ya se mencionó, el proceso de validación consiste en evaluar el modelo calibrado con una serie de datos distinta a la utilizada, para esto se utilizaron registros del periodo 2006 a 2009 (4 años) bajo el mismo criterio usado para la selección de registros para la calibración, estos registros se pueden observar de forma mensual en la siguiente figura.



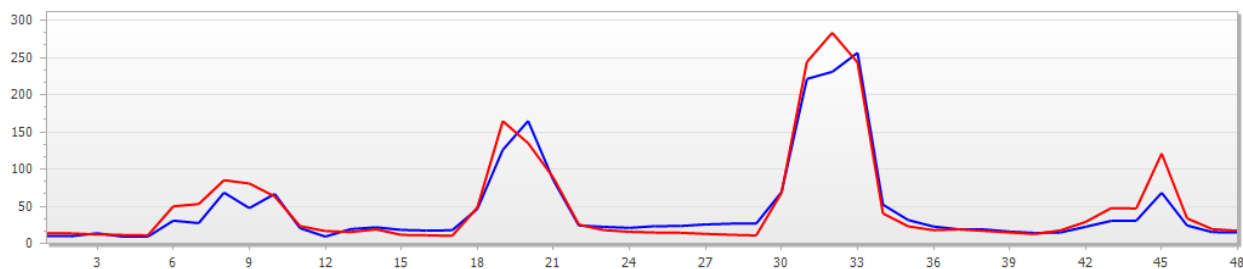
Figura 5-33 Caudal en la EH San Cristóbal II del 2006-2009 (m³/s)



Fuente: Elaboración propia.

En este punto, dado que es validación, no hace falta modificar ninguna variable del modelo y por ende solo corresponde comparar los datos de salida con los registros de la EH para observar la semejanza del modelo, esto se observa en la **Figura 5-34**.

Figura 5-34 Resultados de la validación hídrica del modelo



Fuente: Elaboración propia.

Los estadísticos para determinar la semejanza del modelo (Moriasi, y otros, 2007) descritos en la **Tabla 5-20**, resultaron ser:

- RSR: 0.29 (Muy bueno)
- NSE: 0.92 (Muy bueno)
- PBIAS: -7.8 (Muy bueno)

A partir de lo anterior podemos considerar que el modelo hidrológicamente se encuentra calibrado y validado.



5.12 RESULTADOS

Una vez que el modelo es capaz de representar aceptablemente las condiciones de la cuenca de estudio, se continuó a modelar el caudal en el cauce principal obteniendo un registro del caudal mensual para el tramo del cauce de cada cuenca del SWAT para los años de modelación (1993 al 2017).

En la **Tabla 5-23** se muestra el balance hídrico mensual, mostrando el promedio de todos los años modelados, obteniendo un dato de caudal representativo para cada mes del año a lo largo del cauce principal (río Zula y río Santiago) con la finalidad de observar los cambios de caudal a lo largo del año y posteriormente el comportamiento de las concentraciones de contaminantes en el cauce. Y en la **Tabla 5-24** y en la **Figura 5-35** se muestra un resumen de la **Tabla 5-23** en la forma del caudal promedio, el caudal máximo y el caudal mínimo a lo largo del cauce para cada cuenca del SWAT. Se puede observar que para el río Zula los caudales más bajos se encuentran cerca de su nacimiento (con un promedio de $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ y un caudal mínimo de $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ en los meses de abril y mayo) y va en aumento hasta su confluencia con el río Santiago, donde se presenta un caudal promedio de $4.8 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal mínimo de $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ en abril y un caudal máximo de $12.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en septiembre). Para el río Santiago el caudal más bajo se encuentra en el tramo Poncitlán – Atequiza (caudal promedio de $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$) y el tramo con mayor caudal corresponde al AMG (promedio de $28.3 \text{ m}^3/\text{s}$ llegando hasta los $81.9 \text{ m}^3/\text{s}$ en septiembre), ya que se considera la aportación del río Verde.

De la misma manera en la **Tabla 5-25** se muestra el balance hídrico anual, mostrando un registro de caudal representativo para cada año modelado a lo largo del cauce principal con la finalidad de su posterior comparación con la declaración de disponibilidad del agua del río Santiago.

Mientras tanto, en la **Tabla 5-26** y la **Figura 5-36** se muestra un resumen de la información de la tabla anterior (caudal promedio, caudal mínimo y caudal máximo).



Tabla 5-23 Caudal promedio mensual* en m³/s

Cuenca SWAT	Cauce	Tramo de Referencia (Referencia Muestreo AyMA 2019**)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	Zula	Arandas	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.6	1.3	1.0	1.5	0.8	0.6	0.6
4	Zula	Atotonilco (RZ4)	1.4	1.5	1.1	0.8	1.0	2.4	4.7	3.8	5.1	2.5	1.8	1.5
9	Zula	Tototlán (RZ6)	2.4	2.6	1.8	1.4	1.6	5.2	9.4	8.0	11.4	4.8	3.1	2.6
13	Zula	Ocotlán (RZ7)	2.4	2.6	1.8	1.3	1.6	5.7	10.2	8.8	12.6	5.1	3.1	2.6
15	Santiago	Ocotlán – Poncitlán (RS2)	4.8	5.2	4.2	3.7	4.0	1.7	2.0	0.6	2.0	2.3	5.7	5.0
19	Santiago	Poncitlán	4.8	5.2	4.2	3.8	4.1	1.8	2.2	0.7	2.1	2.4	5.7	5.1
22	Santiago	Poncitlán-Atequiza (RS3)	2.8	3.3	2.2	1.6	2.1	2.5	4.4	1.8	3.3	1.9	3.8	3.1
23	Santiago	Atequiza-Capilla (RS4)	3.1	3.9	2.5	1.8	2.3	5.3	8.4	4.8	6.2	3.2	4.1	3.3
26	Santiago	Previo al Ahogado	3.1	4.1	2.5	1.8	2.4	6.3	10.8	6.3	8.0	4.0	4.3	3.3
29	Santiago	El Salto-Juanacatlán	5.8	7.0	5.0	4.0	4.9	16.7	25.3	17.9	21.5	10.0	7.4	5.8



Cuenca SWAT	Cauce	Tramo de Referencia (Referencia Muestreo AyMA 2019**)	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
		(RS6)												
31	Santiago	Autopista Los Altos- México	5.9	7.1	5.1	4.0	5.0	17.7	27.0	19.4	23.0	10.4	7.5	5.9
33	Santiago	Confluencia Zapotlanejo- Calderón	6.0	7.3	5.2	4.1	5.1	18.1	27.7	20.1	23.7	10.7	7.6	6.0
37	Santiago	ZMG***	7.9	9.3	6.6	5.1	7.0	35.6	70.2	65.6	81.9	27.7	14.1	8.0

* Calculado a partir del promedio del caudal modelado para cada año (de 1993 a 2017) en cada mes.

** Muestreo realizado en 2019 para el presente estudio (Sección 03)

*** Incluye el río Verde.



Tabla 5-24 Resumen de caudales – obtenidos del caudal promedio mensual (en m³/s)

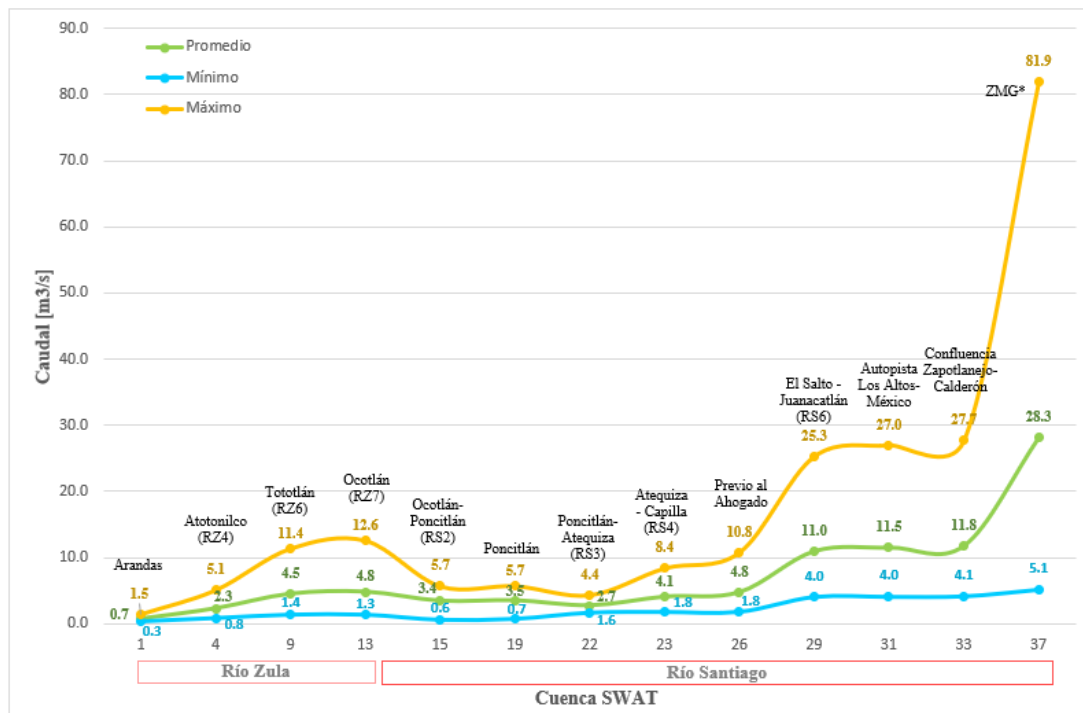
Cuenca SWAT	Cauce	Tramo de Referencia (Referencia Muestreo AyMA 2019*)	Promedio	Mínimo	Máximo
1	Zula	Arandas	0.7	0.3	1.5
4	Zula	Atotonilco (RZ4: aguas arriba de SM de Zula)	2.3	0.8	5.1
9	Zula	Tototlán (RZ6: en SM de Zula)	4.5	1.4	11.4
13	Zula	Ocotlán (RZ7: en Ocotlán)	4.8	1.3	12.6
15	Santiago	Ocotlán – Poncitlán (RS2: Aguas abajo compuestas Poncitlán)	3.4	0.6	5.7
19	Santiago	Poncitlán	3.5	0.7	5.7
22	Santiago	Poncitlán-Atequiza (RS3: en Presa Corona)	2.7	1.6	4.4
23	Santiago	Atequiza-Capilla (RS4: en Macrolibramiento)	4.1	1.8	8.4
26	Santiago	Previo al Ahogado	4.8	1.8	10.8
29	Santiago	El Salto-Juanacatlán (RS6: en Puente Grande)	11.0	4.0	25.3
31	Santiago	Autopista Los Altos-México	11.5	4.0	27.0
33	Santiago	Confluencia Zapotlanejo-Calderón	11.8	4.1	27.7
37	Santiago	ZMG**	28.3	5.1	81.9

*Muestreo realizado en 2019 para el presente estudio (Sección 03)

**Incluye el río Verde



Figura 5-35 Resumen de Caudales – Obtenidos del Caudal Promedio Mensual



*Incluye el río Verde.

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 5-25 Caudal Promedio Anual* en m³/s

Cauce		Río Zula				Río Santiago								
Cuenca SWAT (Clave de muestreo**)		1	4 (RZ4)	9 (RZ6)	13 (RZ7)	15 (RS2)	19	22 (RS3)	23 (RS4)	26	29 (RS6)	31	33	37
Tramo de Referencia		Aran das	Atoto nilco	Totot lán	Ocotl án	Ocotlá n - Poncit lán	Poncit lán	Poncit lán- Atequi za	Atequi za- Capill a	Previo al Ahoga do	El Salto- Juanac atlán	Autopist a Los Altos- México	Confluencia Zapotlanejo- Calderón	ZMG***
Año de Modelación	1993	0.4	1.5	2.6	2.9	2.6	2.7	1.9	3.5	4.5	10.2	10.7	11.0	26.9
	1994	0.4	1.4	2.9	3.3	2.2	2.3	1.4	2.2	2.5	9.0	9.5	9.7	24.1
	1995	0.4	1.5	3.0	3.5	2.5	2.5	1.3	2.7	3.4	8.4	8.8	9.1	28.8
	1996	0.3	0.8	1.6	1.9	2.3	2.3	1.3	2.7	3.5	9.4	9.7	9.9	26.0
	1997	0.2	0.8	1.7	2.0	2.4	2.5	1.4	2.3	2.5	7.1	7.6	7.9	16.0
	1998	0.4	1.5	2.7	2.9	2.1	2.1	1.1	1.9	2.2	7.9	8.6	9.0	26.1
	1999	0.3	1.0	2.5	2.7	2.4	2.4	1.4	2.3	2.6	7.9	8.2	8.4	21.6
	2000	0.3	1.0	1.8	1.9	2.2	2.3	1.0	1.9	2.1	6.9	7.3	7.5	15.4
	2001	0.3	1.2	2.2	2.3	2.2	2.3	1.2	2.0	2.2	7.2	7.6	7.8	23.1
	2002	0.4	1.3	2.7	2.9	2.7	2.8	2.0	3.2	3.5	9.2	9.7	9.9	34.2
	2003	1.0	3.5	7.2	7.8	3.0	3.1	3.8	4.9	5.3	13.2	14.1	14.6	56.9
	2004	0.6	1.9	4.5	5.1	2.9	3.0	2.3	3.4	4.0	13.2	14.0	14.4	57.0
	2005	0.4	1.4	3.5	3.6	2.3	2.4	1.5	2.1	2.3	6.9	7.3	7.5	18.6
	2006	0.8	2.6	5.0	5.0	3.7	3.7	2.7	3.7	4.0	11.4	11.7	11.8	27.5
	2007	0.9	2.7	5.1	5.3	4.4	4.5	3.5	5.0	5.8	11.8	12.2	12.4	38.9
	2008	1.1	3.3	6.9	7.5	4.3	4.4	4.4	7.3	9.9	18.1	19.1	19.7	71.7
	2009	1.0	3.0	6.3	6.5	4.3	4.3	3.6	4.8	5.3	11.3	12.1	12.5	24.3
	2010	1.1	3.4	6.6	7.3	5.0	5.1	4.9	7.4	9.6	17.8	18.6	19.1	25.1
	2011	0.7	2.0	3.5	3.7	3.3	3.4	2.1	3.0	3.3	9.3	9.7	9.9	15.8
	2012	1.1	3.4	5.8	6.0	4.9	5.0	3.8	4.5	4.8	10.6	11.0	11.2	17.5
2013	1.2	3.8	7.2	7.6	4.8	4.9	4.1	5.5	5.9	11.6	12.1	12.4	18.7	
2014	1.1	3.5	6.9	7.2	4.8	4.9	4.9	6.2	6.9	12.6	12.9	13.2	29.0	



2015	1.3	4.2	7.7	8.0	5.5	5.6	5.0	7.2	9.0	16.3	17.1	17.5	23.5
2016	1.2	3.7	7.3	7.5	4.8	4.8	4.0	6.2	7.6	14.3	15.0	15.4	20.8
2017	1.0	3.1	5.7	6.1	4.3	4.4	4.0	5.6	6.2	11.9	12.4	12.7	17.2

*Calculado a partir del promedio del caudal mensual modelado, de todos los meses ese año.

**Muestreo realizado en 2019 para el presente estudio (Sección 03)

***Incluye el río Verde





Tabla 5-26 Resumen de Caudales – Obtenidos del Caudal Promedio Anual

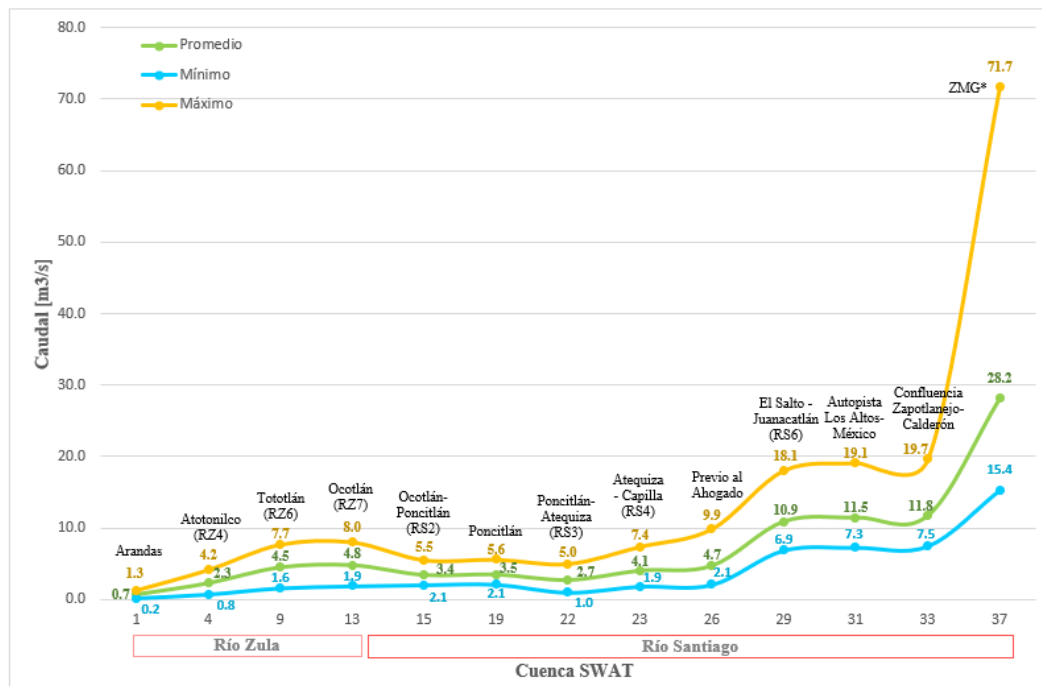
Cuenca SWAT	Cauce	Tramo de Referencia (Referencia Muestreo AyMA 2019*)	Promedio	Mínimo	Máximo
1	Zula	Arandas	0.7	0.2	1.3
4	Zula	Atotonilco (RZ4: aguas arriba de SM de Zula)	2.3	0.8	4.2
9	Zula	Tototlán (RZ6: en SM de Zula)	4.5	1.6	7.7
13	Zula	Ocotlán (RZ7: en Ocotlán)	4.8	1.9	8.0
15	Santiago	Ocotlán – Poncitlán (RS2: Aguas abajo compuestas Poncitlán)	3.4	2.1	5.5
19	Santiago	Poncitlán	3.5	2.1	5.6
22	Santiago	Poncitlán-Atequiza (RS3: en Presa Corona)	2.7	1.0	5.0
23	Santiago	Atequiza-Capilla (RS4: en Macrolibramiento)	4.1	1.9	7.4
26	Santiago	Previo al Ahogado	4.7	2.1	9.9
29	Santiago	El Salto-Juanacatlán (RS6: en Puente Grande)	10.9	6.9	18.1
31	Santiago	Autopista Los Altos-México	11.5	7.3	19.1
33	Santiago	Confluencia Zapotlanejo-Calderón	11.8	7.5	19.7
37	Santiago	ZMC***	28.2	15.4	71.7

*Muestreo realizado en 2019 para el presente estudio (Sección 03)

**Incluye el río Verde.



Figura 5-36 Resumen de Caudales – Obtenidos del Caudal Promedio Anual



*Incluye el río Verde.

Fuente: Elaboración propia.

5.12.1 Estimación del caudal ecológico basado en 7Q10

En la NMX-AA-SCFI-2012 se define el caudal ecológico como “la calidad, cantidad y régimen del flujo o variación de los niveles de agua requeridos para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos epicontinentales”:

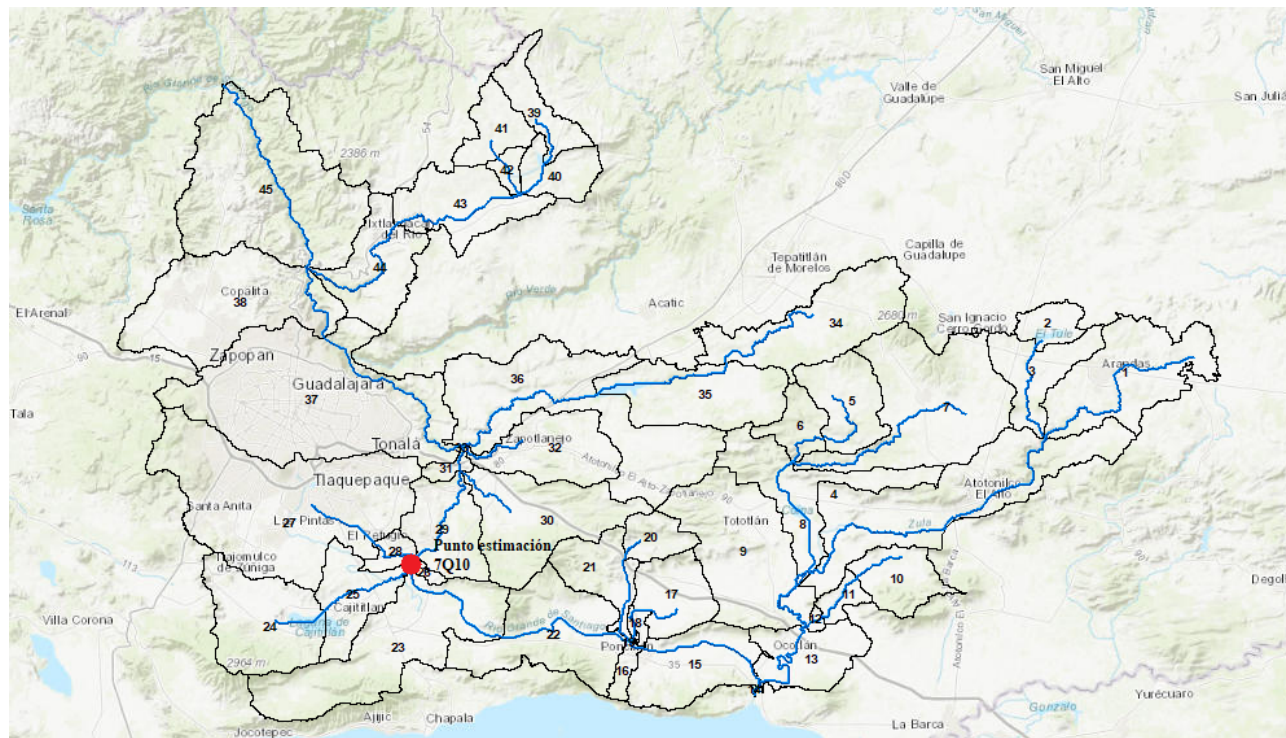
Mantener un caudal ecológico es importante ya que los caudales bajos agravan los efectos de la contaminación del agua debido a la disminución en el factor de dilución, el cual es el principal mecanismo por medio del que se reducen las concentraciones de contaminantes que son descargados a cuerpos de agua.

Uno de los métodos más utilizados para la determinación del caudal ecológico es mediante el cálculo de escurrimiento bajo las condiciones 7Q10. Este método consiste en la determinación del caudal con base en los caudales medios mínimos observados durante un intervalo de tiempo de 7 días, en un periodo de retorno mínimo de 10 años.

El 7Q10 se estima a partir de los registros de caudales observados de forma diaria por un periodo de 10 años, sin embargo, en las estaciones hidrométricas dentro de la zona de estudio como se describió anteriormente, la única EH con información suficiente sería la EH San Cristóbal II (utilizada en la calibración) pero al quedar fuera del área de intervención prioritaria motivo de este estudio y al tener ya los influentes del río Verde, no es posible utilizarla para la determinación del 7Q10 de acuerdo a los objetivos de este estudio y por ende determinarlo a partir de observaciones dentro del AIP tampoco es posible. Es por ello que el modelo hidrológico SWAT se vuelve una herramienta útil para la estimación del mismo.

Debido a lo anterior se procedió a correr el modelo en una escala temporal diaria, y a partir del cauce estimado por el modelo para la salida de alguna de las subcuencas se obtuvo el 7Q10. La cuenca seleccionada fue la número 26 del modelo, correspondiente al río Santiago previo a su confluencia con el arroyo El Ahogado, debido a que la PTAR El Ahogado aporta un flujo continuo de agua, impidiendo la estimación adecuada del 7Q10. En la **Figura 5-37** se muestra la ubicación del sitio de estimación para el 7Q10.

Figura 5-37 Ubicación del Punto de Estimación del 7Q10



Fuente: Elaboración propia.

Se procedió a estimar el 7Q10 separando las temporadas de estiaje y lluvias, debido a que (como se ha mencionado) para la simulación de las operaciones y manejos del agua en Chapala-Ocotlán-Ponciltán se realiza una extracción de agua en el modelo, la cual simula el trasvase del cauce del Zula hacia Chapala. Esta extracción se realizó en una escala temporal mensual, lo cual puede derivar en que días antes del inicio del temporal o días después del periodo de lluvias se esté extrayendo agua sin que esto sea ya necesario, y por ende se esté subestimando el flujo del río Santiago.

Por lo que, para evitar un posible error, debido a las consideraciones de manejo del agua mencionadas en el párrafo anterior, se procedió a eliminar de la estimación del 7Q10 aquellas estimaciones de caudal donde se observara un cambio drástico entre las transiciones del periodo de estiaje y lluvias, generadas por la extracción del agua del agua del río Zula del modelo en época de lluvias.

Con estas consideraciones es que se procedió a estimar el 7Q10 del río Santiago previo a su confluencia con el arroyo El Ahogado, donde este es de $0.57 \text{ m}^3/\text{s}$ durante mayo de 1998 y para lluvias el flujo fue de $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ en octubre de 2005, como se observa en la **Tabla 5-27**.



Tabla 5-27 Caudal 7Q10 en la cuenca 26 del Modelo SWAT

Estiaje			Lluvias		
Fecha	Caudal (m³/s)	7Q10 (m³/s)	Fecha	Caudal (m³/s)	7Q10 (m³/s)
01/05/1998	0.63	0.61	10/10/2005	0.12	0.83
02/05/1998	0.62	0.61	11/10/2005	0.12	0.98
03/05/1998	0.61	0.61	12/10/2005	0.11	1.09
04/05/1998	0.61	0.60	13/10/2005	0.11	1.18
05/05/1998	0.6	0.60	14/10/2005	0.73	1.23
06/05/1998	0.6	0.60	15/10/2005	2.96	1.18
07/05/1998	0.61	0.60	16/10/2005	1.68	1.01
08/05/1998	0.61	0.59	17/10/2005	1.14	1.37
09/05/1998	0.6	0.59	18/10/2005	0.92	1.37
10/05/1998	0.59	0.59	19/10/2005	0.69	1.36
11/05/1998	0.59	0.58	20/10/2005	0.5	1.34
12/05/1998	0.59	0.58	21/10/2005	0.38	1.33
13/05/1998	0.59	0.58	22/10/2005	1.74	1.32
14/05/1998	0.58	0.58	23/10/2005	4.23	1.10
15/05/1998	0.59	0.58	24/10/2005	1.14	0.52
16/05/1998	0.58	0.57	25/10/2005	0.83	0.38
17/05/1998	0.57	0.57	26/10/2005	0.59	0.28
18/05/1998	0.57	0.57	27/10/2005	0.41	0.21
19/05/1998	0.57	0.57	28/10/2005	0.3	0.17
20/05/1998	0.58	0.58	29/10/2005	0.22	0.14
21/05/1998	0.58	0.58	30/10/2005	0.17	0.12
22/05/1998	0.57	0.58	31/10/2005	0.14	0.11
23/05/1998	0.57	0.58	10/10/2005	0.13	0.10
24/05/1998	0.57	0.58	11/10/2005	0.12	0.10
25/05/1998	0.58	0.58	12/10/2005	0.11	0.09
26/05/1998	0.58	0.58	13/10/2005	0.1	0.12
27/05/1998	0.58	0.57	14/10/2005	0.09	0.20



Estiaje			Lluvias		
Fecha	Caudal (m ³ /s)	7Q10 (m ³ /s)	Fecha	Caudal (m ³ /s)	7Q10 (m ³ /s)
28/05/1998	0.58	0.57	15/10/2005	0.09	0.33
29/05/1998	0.58	0.57	16/10/2005	0.08	0.50
30/05/1998	0.57	0.57	17/10/2005	0.08	0.68
31/05/1998	0.56	0.56	18/10/2005	0.08	0.86

El volumen menor en lluvias, una vez eliminado el posible error generado por la extracción del agua del río Zula, se podría explicar por la extracción continua que se lleva a cabo en el canal de Atequiza, agua que durante estiaje es aportada por el lago de Chapala en las compuertas de Ocotlán y no impacta el caudal natural del río en esa temporada.

Por ende, uno pudiera asumir que sin esa extracción en Atequiza para la ciudad de Guadalajara el 7Q10 en época de lluvias debería ser 2.2 m³/s más elevado aguas abajo de presa Corona, a partir de esto, aunque ambos valores son útiles, se pudiera considerar de mayor relevancia el estimado para estiaje, por representar más adecuadamente el cauce natural del río Santiago.

Los escurrimientos en las condiciones de 7Q10 muestran un caudal muy bajo en este tramo del río Santiago, lo que hace evidente la necesidad de determinar un caudal ecológico que posibilite mejores condiciones para el río Santiago en este punto tan crítico.

5.12.2 Efectos del Cambio Climático en el Área de Estudio

Desde el punto de vista meteorológico, se llama cambio climático a la alteración de las condiciones predominantes. De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), éste se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (ONU, 1992).

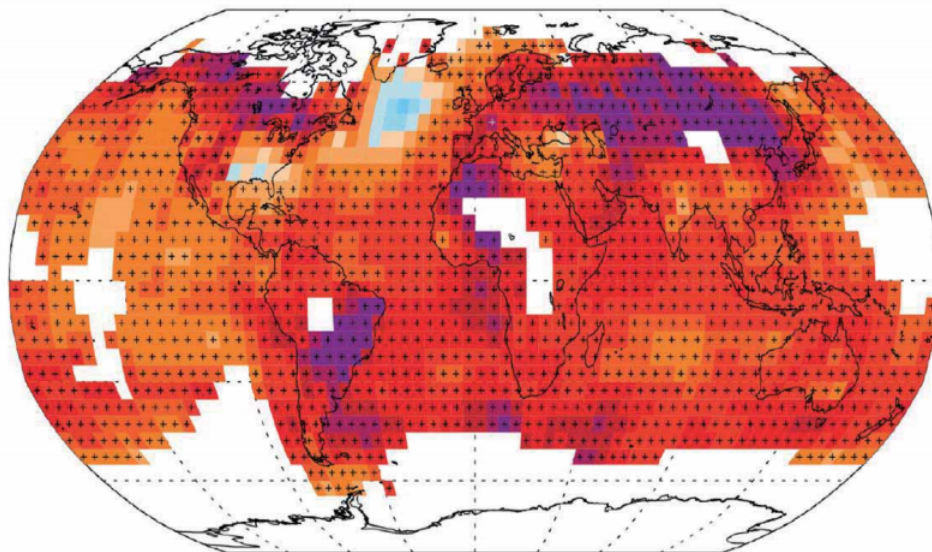
Por otro lado, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) lo define como cualquier cambio en el clima con el tiempo debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas.

A partir de lo anterior, dado que los efectos climáticos determinan de forma importante el ciclo hidrológico, y por esto se deben tomar en cuenta el cambio climático como un fenómeno que puede afectar en un futuro el comportamiento y disponibilidad del recurso hídrico en la zona de estudio. Esto sin mencionar el impacto que se pueda tener en los ecosistemas y actividades humanas, ya que los mismos quedan en parte fuera del alcance de este estudio.

Para la generación escenarios de cambio climático actualmente se utilizan como herramientas los modelos de circulación global (GCM por sus siglas en ingles). Los GCM son modelos de tipo matemático que buscan simular la circulación de la atmósfera y/u oceánica. Se basan en ecuaciones Navier-Stokes, y representan las modelaciones sobre una esfera rotatoria. Estas

ecuaciones sirven de base para modelos complejos en programas de computador que normalmente se utilizan para simular las condiciones de la atmósfera y océanos de la Tierra.

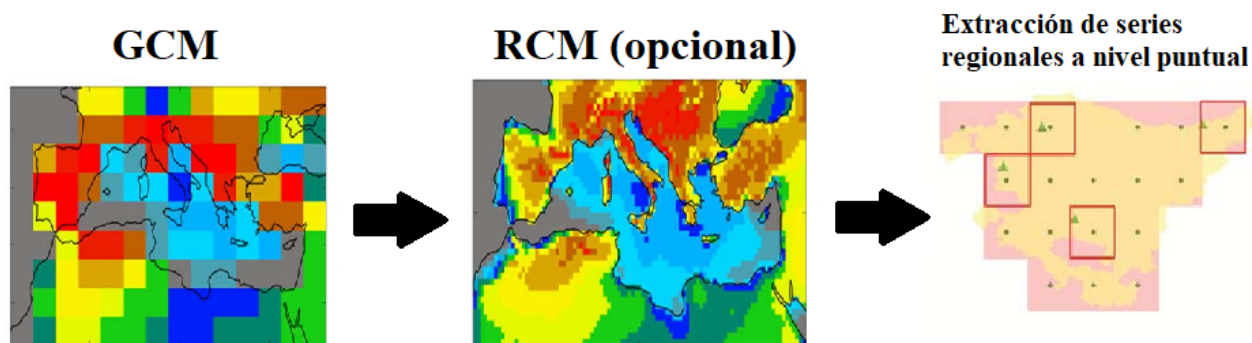
Figura 5-38 Ejemplo de un GCM



Actualmente existen una serie de GCM desarrollados por diferentes instituciones y organismos, y donde aquellos más desarrollados están contemplados en el WCRP Coupled Model Intercomparison Project - Phase 5 (CMIP5), dichos modelos climáticos son la base para la elaboración de los reportes del IPCC (<https://www.ipcc.ch/reports/>), el cual es el organismo de las Naciones Unidas para atender los temas relacionados al cambio climático.

Sin embargo, los GCM al ser modelos globales su escala de resolución es muy extensa, donde cada celda de modelado puede oscilar en un rango espacial de 100-500 kilómetros, lo cual no es lo ideal en áreas de estudio de menor dimensión ya que derivaría en pérdida de precisión de los escenarios. Es por ello que se requiere escalar la información a nivel regional (RCM) o local (Downscaling), como se observa en la **Figura 5-39**.

Figura 5-39 Procedimiento para el escalamiento de información a partir de GCM

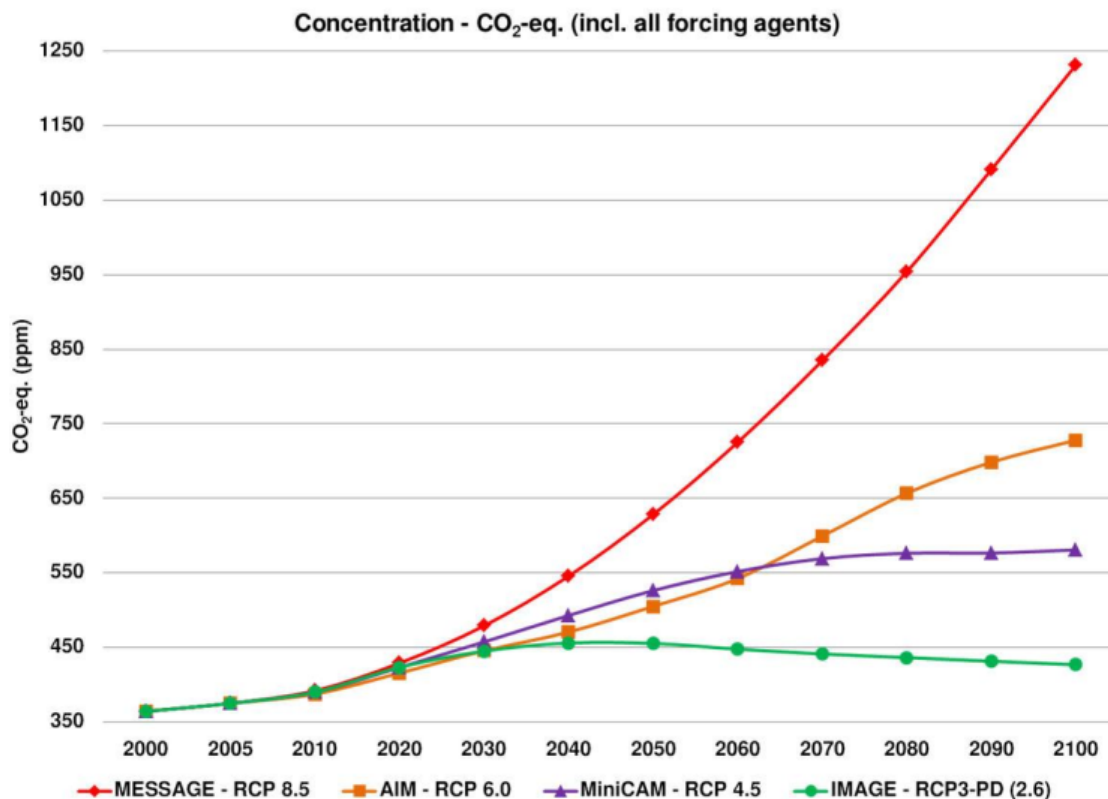


Fuente: Modificado de Meteorological data for RES-E integration studies - State of the art reviewtitle Technical Report (González-Aparicio, 2015)

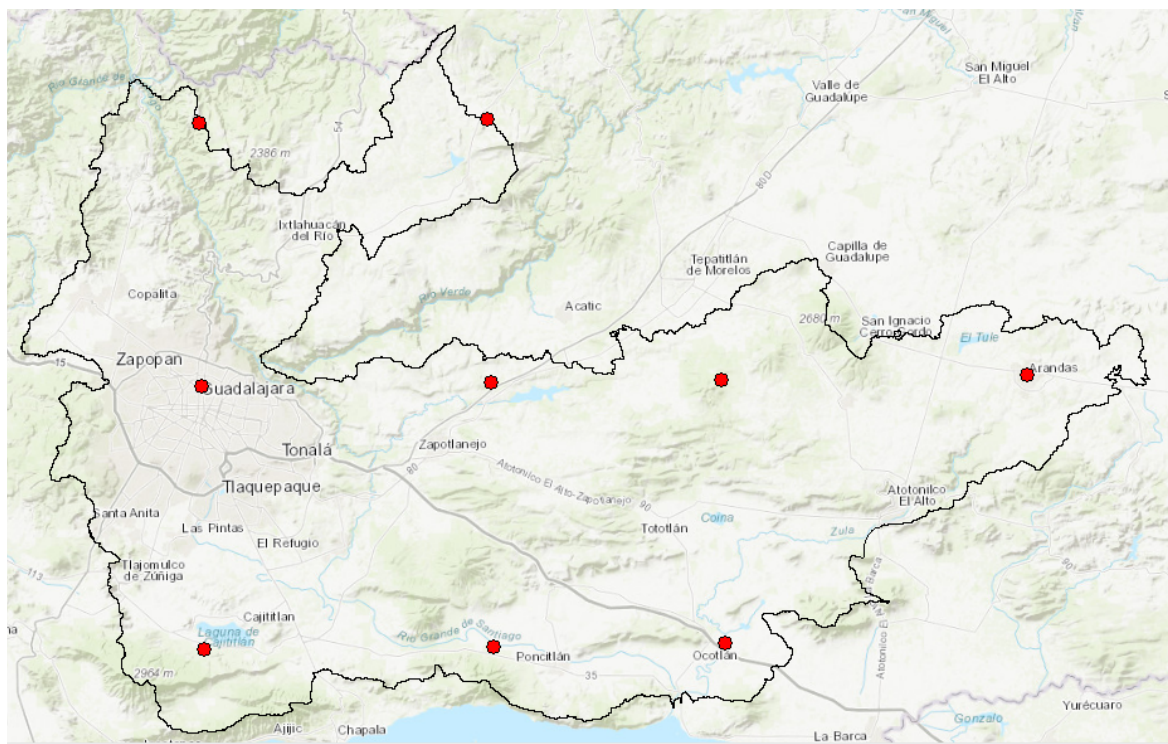


Los GCM más recientes contemplan 4 escenarios establecidos por el IPCC, esto con la finalidad de poder homogenizar los resultados de cada uno de los modelos, estos escenarios son conocidos como Sendas Representativas de Concentración (RCP, de sus siglas en inglés). Y se identifican como RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, y se designan de esta manera por el nivel del forzamiento radiativo total en la atmósfera para el año 2100 (que van desde los 2.6 a 8.5 W/m²) y están establecidos según sea la concentración de CO₂ en la atmósfera.

Figura 5-40 Concentración de CO₂ en la Atmósfera según los Escenarios RCP



Por lo que para generar los escenarios de cambio climático fue necesario escalar la información de los GCM para utilizarla a nivel regional. Esto se realizó a partir del uso del software MARKSIM GCM desarrollado por el Programa de Investigación de CGIAR en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS, 2014), este modelo utiliza información de 17 modelos de circulación global (GCM) contemplados en el CMIP5. Generando la información de manera puntual. Para la cuenca de estudio se contemplaron 9 puntos distribuidos equidistantemente para la generación de información como se observa en la **Figura 5-41**.

Figura 5-41 Puntos de Generación de Información por Cambio Climático

Fuente: Elaboración propia.

Con el software MARKSIM GCM, a partir de los puntos seleccionados, se generó la información de cambio climático considerando únicamente los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 por ser el más positivo y el más crítico, para el año 2050, ya que un periodo menor no genera demasiada diferencia entre escenarios y un periodo más extenso en el futuro pierde su objetivo del estudio en ser una herramienta de planeación a corto y mediano plazo.

En la **Tabla 5-28** se presenta de forma resumida los escenarios de cambio climático para temperatura máxima y mínima, así como para precipitación, tanto para cada uno de los puntos como de forma general en la cuenca de estudio.

Tabla 5-28 Resumen de los Escenarios de Cambio Climático en la Zona de Estudio

Escenario RCP2.6					Escenario RCP8.5				
Punto de Referencia	Año	TMA X (°C)	TMIN (°C)	PP (mm)	Punto de Referencia	Año	TMA X (°C)	TMIN (°C)	PP (mm)
Arandas	2020	26.8	10.6	1256.4	Arandas	2020	26.7	10.6	1225.9
	2035	27.1	10.8	1245.6		2035	27.3	11.1	1142.7
	2050	27.2	10.9	1247.8		2050	28.2	11.7	1124.8
Tepatitlán	2020	27.9	10.9	1051.0	Tepatitlán	2020	27.9	10.9	963.6



Escenario RCP2.6					Escenario RCP8.5				
Punto de Referencia	Año	TMA X (°C)	TMIN (°C)	PP (mm)	Punto de Referencia	Año	TMA X (°C)	TMIN (°C)	PP (mm)
	2035	28.2	11.2	955.8		2035	28.5	11.4	1142.9
	2050	28.4	11.3	1049.5		2050	29.3	12.1	867.6
Presa Calderón	2020	28.3	11.1	991.5	Presa Calderón	2020	28.3	11.1	940.4
	2035	28.6	11.3	957.2		2035	28.8	11.6	1073.0
	2050	28.7	11.5	977.0		2050	29.6	12.3	1060.8
ZMG	2020	29.1	12.7	1164.8	ZMG	2020	29.2	12.8	1136.4
	2035	29.5	13.0	1085.6		2035	29.8	13.3	982.6
	2050	29.6	13.1	1131.4		2050	30.5	14.0	1169.6
Cajititlán	2020	30.5	14.0	1169.6	Cajititlán	2020	28.5	13.1	878.7
	2035	28.8	13.4	965.1		2035	29.1	13.6	842.7
	2050	28.9	13.5	1070.3		2050	29.8	14.3	910.5
Poncitlán	2020	29.1	13.3	893.3	Poncitlán	2020	29.1	13.3	992.2
	2035	29.4	13.6	1030.0		2035	29.6	13.8	920.1
	2050	29.5	13.7	1029.7		2050	30.4	14.5	922.6
San Martin de Zula	2020	29.4	13.4	972.3	San Martin de Zula	2020	29.5	13.4	1077.3
	2035	29.8	13.7	922.9		2035	30.0	13.9	1048.9
	2050	29.9	13.8	1065.0		2050	30.8	14.6	843.1
San Cristóbal de la Barranca	2020	29.6	12.4	1078.3	San Cristóbal de la Barranca	2020	29.6	12.4	1200.9
	2035	29.9	12.7	1065.1		2035	30.2	12.9	1034.9
	2050	30.1	12.8	1061.6		2050	30.9	13.6	1111.9
Cuquío	2020	27.4	10.5	1068.4	Cuquío	2020	27.3	10.5	929.3
	2035	27.7	10.7	974.4		2035	27.9	11.0	903.2
	2050	27.8	10.8	966.3		2050	28.8	11.6	859.3
Cuenca Global	2020	28.7	12.1	1071.7	Cuenca Global	2020	28.4	12.0	1038.3
	2035	28.8	12.3	1022.4		2035	29.0	12.5	1010.1
	2050	28.9	12.4	1066.5		2050	29.8	13.2	985.6
	Dif.	0.2	0.3	-5.2		Dif.	1.4	1.2	-52.7



Escenario RCP2.6					Escenario RCP8.5				
Punto de Referencia	Año	TMA X (°C)	TMIN (°C)	PP (mm)	Punto de Referencia	Año	TMA X (°C)	TMIN (°C)	PP (mm)
	%	0.8%	2.5%	-0.5%		%	4.8%	9.9%	-5.1%

A partir de estos escenarios se cargaron en el modelo SWAT las variaciones observadas entre los años 2020 y 2050 a los valores de temperatura y precipitación, obtenidas de la modelación de cambio climático. Posteriormente se corrió el modelo SWAT bajo las mismas condiciones contempladas para el armado del modelo, y así poder observar los efectos propios del cambio climático.

El impacto hidrológico por los escenarios de cambio climático lo consideramos observar en el cauce del río Santiago previo a su confluencia con el río Verde, para así evitar que los resultados se superpongan con esta entrada a nuestro modelo, el punto a analizar es la salida de la cuenca 33 (previo a su confluencia con la cuenca del Calderón, en puente Matatlán).

En este punto se observa que en el escenario actual (el cual es el promedio de los 25 años de simulación del modelo hidrológico) el caudal medio anual es de 11.8 m³/s y en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 es de 12.0 m³/s y 9.6 m³/s respectivamente. En la Tabla 5-29 y en la Figura 5-42 se muestra el caudal anualizado obtenido para cada escenario. Como se puede observar no se presentan cambios significativos en comparación con el escenario actual en el RCP 2.6, pero si en el RCP 8.5, sobre todo en el mes de septiembre donde el caudal estimado se reduce casi un 50%, y que de forma anual esto representa una disminución de 2.2 m³/s.

Tabla 5-29 Impacto sobre el Caudal de Salida de la Cuenca 33* en m³/s

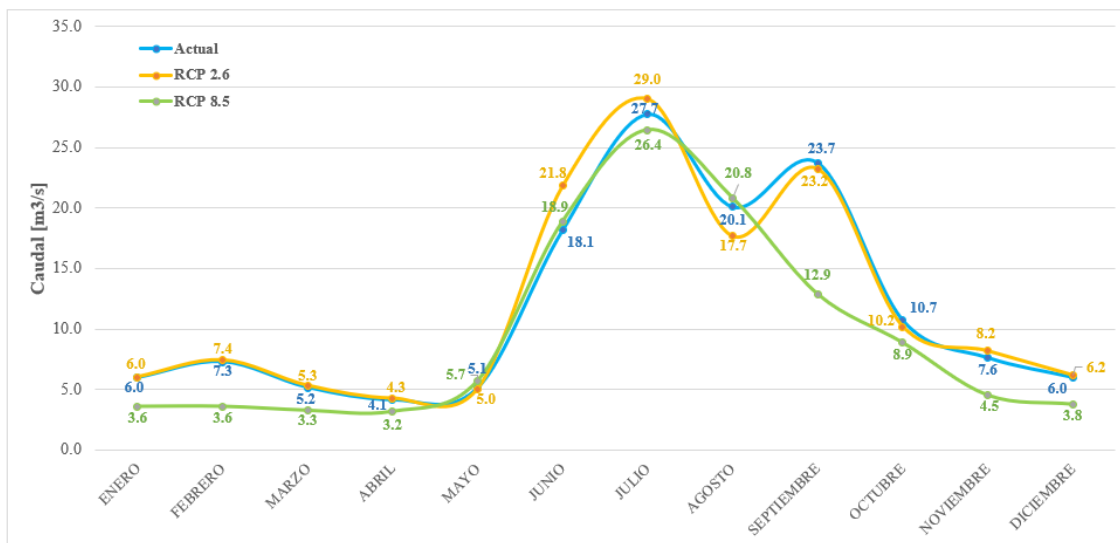
Mes	Escenario Actual (1993-2017)	RCP 2.6 (2050)	RCP 8.5 (2050)
Enero	6.0	6.0	3.6
Febrero	7.3	7.4	3.6
Marzo	5.2	5.3	3.3
Abril	4.1	4.3	3.2
Mayo	5.1	5.0	5.7
Junio	18.1	21.8	18.9
Julio	27.7	29.0	26.4
Agosto	20.1	17.7	20.8
Septiembre	23.7	23.2	12.9
Octubre	10.7	10.2	8.9
Noviembre	7.6	8.2	4.5



Mes	Escenario Actual (1993-2017)	RCP 2.6 (2050)	RCP 8.5 (2050)
Diciembre	6.0	6.2	3.8
Promedio	11.8	12.0	9.6

*En puente Matatlán.

Figura 5-42 Impacto sobre el Caudal de Salida de la Cuenca 33



Fuente: Elaboración propia.

El impacto en la evapotranspiración (normal y potencial) en los escenarios modelados se presenta en la **Tabla 5-30**. De forma general el impacto se ve reflejado en una disminución en la evapotranspiración normal pasando de 667.4 mm de evapotranspiración normal en el escenario actual de forma global para la cuenca, así como de 666.1 mm y 624.4 mm para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 respectivamente (ver **Figura 5-43**). Y un aumento en la evapotranspiración potencial en la cuenca, pasando de 1753.5 mm en el escenario actual a 1765.4 mm en el RCP 2.6 y 1836.7 mm en el RCP 8.5 (ver **Figura 5-44**). Esta diferencia entre la evapotranspiración normal y potencial refleja la disminución en la disponibilidad del agua en la cuenca como efecto del cambio climático.

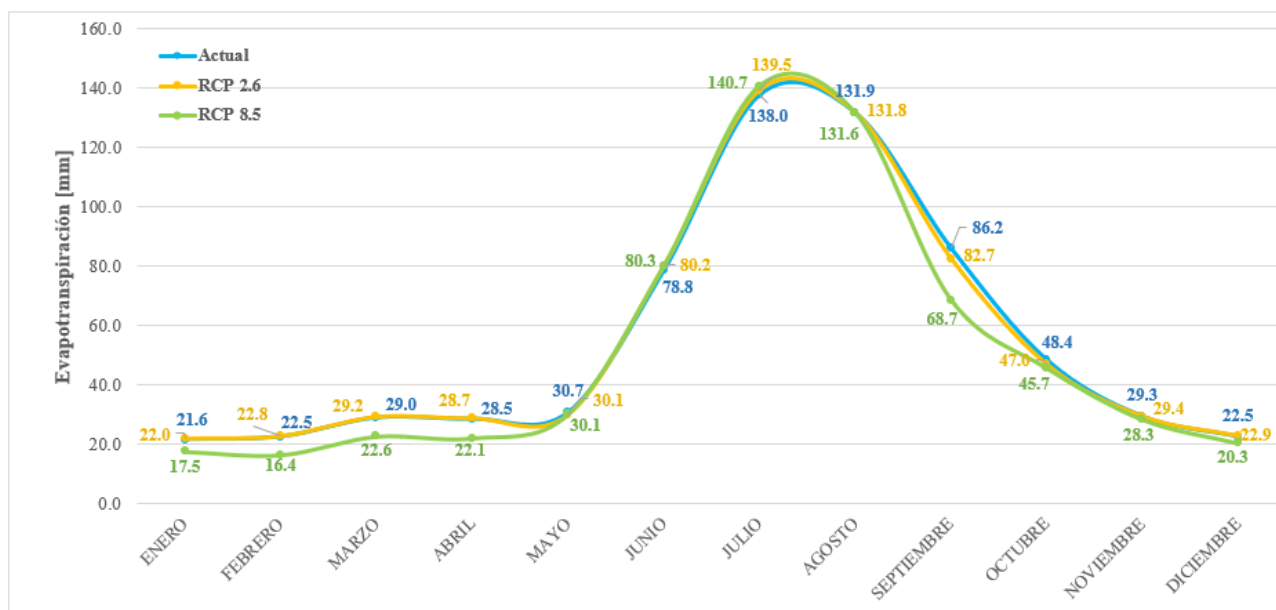
Tabla 5-30 Impacto en la Evapotranspiración Normal y Potencial (en mm)

Mes	Escenario Actual (1993-2017)		RCP 2.6 (2050)		RCP 8.5 (2050)	
	Normal	Potencial	Normal	Potencial	Normal	Potencial
Enero	21.6	107.9	22.0	108.7	17.5	114.9
Febrero	22.5	120.9	22.8	121.8	16.4	128.8



Mes	Escenario Actual (1993-2017)		RCP 2.6 (2050)		RCP 8.5 (2050)	
	Normal	Potencial	Normal	Potencial	Normal	Potencial
Marzo	29.0	171.2	29.2	172.5	22.6	180.9
Abril	28.5	194.7	28.7	196.1	22.1	204.5
Mayo	30.7	214.7	30.1	216.2	30.1	222.7
Junio	78.8	163.1	80.2	164.1	80.3	169.4
Julio	138.0	162.2	139.5	163.1	140.7	168.8
Agosto	131.9	154.4	131.8	155.3	131.6	160.8
Septiembre	86.2	120.0	82.7	120.8	68.7	125.2
Octubre	48.4	127.9	47.0	128.8	45.7	133.3
Noviembre	29.3	112.0	29.4	112.8	28.3	116.8
Diciembre	22.5	104.4	22.9	105.2	20.3	110.6
Total	667.4	1753.5	666.1	1765.4	624.4	1836.7

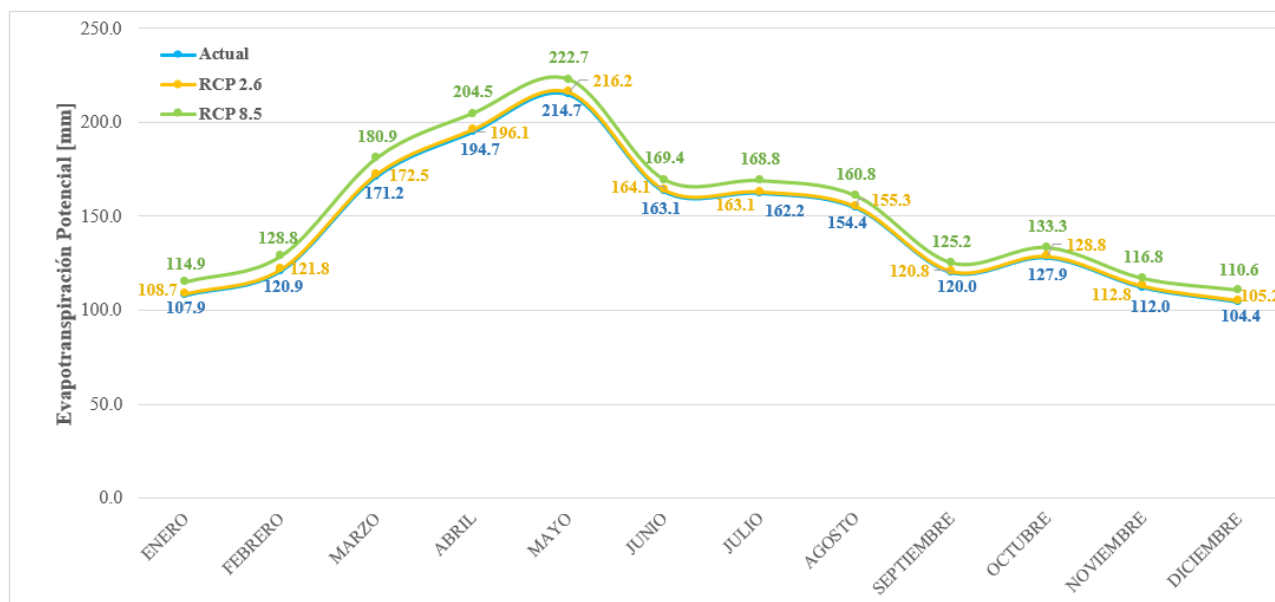
Figura 5-43 Impacto en la Evapotranspiración Potencial (mm)



Fuente: Elaboración propia



Figura 5-44 Impacto en la Evapotranspiración Potencial (mm)



Fuente: Elaboración propia

El impacto del cambio climático en la precipitación en la cuenca se presenta en la **Tabla 5-31**. De forma general el impacto se ve reflejado pasando de 891.9 mm de precipitación en el escenario actual de forma global para la cuenca, a 896.3 mm y 799.8 mm para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 respectivamente (ver **Figura 5-45**).

El mayor impacto se puede observar, como es de esperarse, en el escenario RCP 8.5 donde la precipitación se reduce significativamente, sobre todo en el mes de septiembre, lo cual impacta en el caudal presentado en el cauce del río Santiago.

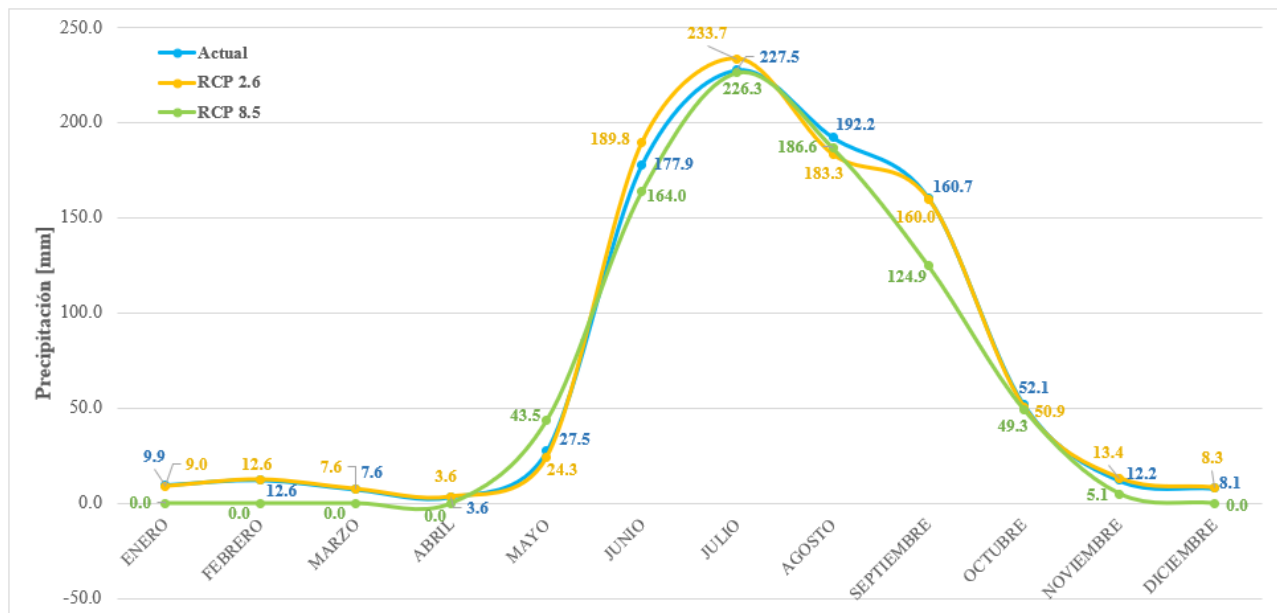
Tabla 5-31 Impacto en la Precipitación (en mm)

Mes	Escenario Actual (1993-2017)	RCP 2.6 (2050)	RCP 8.5 (2050)
Enero	9.9	9.0	0.0
Febrero	12.6	12.6	0.0
Marzo	7.6	7.6	0.0
Abril	3.6	3.6	0.0
Mayo	27.5	24.3	43.5
Junio	177.9	189.8	164.0
Julio	227.5	233.7	226.3
Agosto	192.2	183.3	186.6



Mes	Escenario Actual (1993-2017)	RCP 2.6 (2050)	RCP 8.5 (2050)
Septiembre	160.7	160.0	124.9
Octubre	52.1	50.9	49.3
Noviembre	12.2	13.4	5.1
Diciembre	8.1	8.3	0.0
Total	891.9	896.3	799.8

Figura 5-45 Impacto en la Precipitación (mm)



Fuente: Elaboración propia

El cambio climático tendrá sus efectos en toda la extensión de la cuenca del río Lerma, incluyendo el lago de Chapala, lo cual afectaría al río Santiago en particular como fuente de abastecimiento para la ZMG y del distrito de riego 13, sin embargo, el determinar estos efectos y sus afectaciones en la zona de estudio quedan fuera de los alcances del estudio, por lo que se requiere integrar estudios de impacto climático en la cuenca del Lerma para poder observar el impacto probable en el río Santiago.

Adecuaciones como cambios poblacionales o en el uso de suelo por mencionar algunos, aunque resultan adecuados para modelar y analizar el posible impacto en la cuenca en un futuro, no se consideran en este apartado sino en el de calidad del agua en la siguiente sección, como parte de los escenarios de modelación de calidad del agua.



5.13 REFERENCIAS

- Abbaspour, K., Vejdani, M., & Haghighat, S. (2007). SWATCUP Calibration and Uncertainty Programs for SWAT. *Proc. Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'07)*, 1603-1609.
- Arnold, J. W., & Maidment, D. (1995). Continuous-Time Water and Sediment Routing Model for Large Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, V.121, N.2, 171-183.
- Arnold, J., & Williams, J. (1987). Validation of SWRRB: Simulator for Water Resources in Rural Basins. *Journal of Water Resources Planning and Management*, V.113, N.2, 243-256.
- Arnold, J., Gassman, P., & White, M. (2010). New Developments in the SWAT Ecohydrology Model. *Proc. 21st Watershed Technology Conference: Improving Water Quality and Environment*. ASABE Publication No. 701P0210.
- Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., . . . Jha, M. (2012). SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*. Paper 406.
- Arnold, J., Srinivasan, R., Muttiah, R., & Williams, J. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 34, no. 1, pp. 73-89.
- Arnold, J., Srinivasan, R., Muttiah, R., & Williams, J. (1998). Large-area Hydrological Modeling and Assessment: Part I. Model Development. *Journal of American Water Resource Associaton*, V. 34, N.1, 73-89.
- ASCE. (1993). Criteria for Evaluation of Watershed Models. *J. Irrig. Drainage ENG.*, V. 119, N.03, 429-442.
- Bagnold, R. (1977). Bedload Transport in Natural Rivers. *Water Resources Res*, V.13, N.02, 303-312.
- Boyle, D., Gupta, H., & Sorooshian, S. (2000). Toward Improved Calibration of Hydrologic Models: Combining the Strenghts of Manual and Automatic Methods. *Water Resources Res.*, V.36, N.12, 3663-3674.
- Brown, L., & Barnwell, J. T. (1987). *The Enchanced Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual*. Athens, Ga: EPA Document EPA/600/3-87/007.
- CEA Jalisco. (2019). *Historial de Calidad del Agua PTAR*.
- CEA Jalisco. (2020). *Monitoreo del Río Santiago*.
- Chapra, S. (1989). Water Quality Modeling of Toxic Organics in Lakes. *CADSWES Workin Paper No. 4*, University of Colorado, Boulder, Colorado.
- CONAGUA. (2016). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales - Bases de Datos de Presas*. Obtenido de conagua.gob.mx: <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- CONAGUA. (2018). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales - Bases de Datos Hidrométricas*. Obtenido de conagua.gob.mx: <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>



- CONAGUA. (2019). *Servicio Meteorológico Nacional - Información Estadística Climática*. Obtenido de SMN: <https://smn.conagua.gob.mx>
- CONAGUA. (2019). *Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)*. Obtenido de sina-conagua.gob.mx: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/>
- CONAPO. (2019). *Proyecciones de la Población de los Municipios de México, 2015-2030*.
- Cuervo-Robayo, A., Majarez-García, F. J., Sanchez-Sanchez, H., & Martinez.Meyer, E. (2014). *Fortalecimiento del Análisis de Cambio Climático en la Aplicación de los Modelos de Distribución Potencial*. AP Universidad Autonoma del Estado de México.
- Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., & Arabi, M. (2007). A Hydrologic/Water Quality Model Application Protocol. *Journal of American Water Resource Assoc.*, V.43, N.05, 1223-1236.
- FAO . (28 de 02 de 2007). *Digital Soil Map of the World*. Obtenido de Formato ESRI Shape: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show%3Fid=14116>
- Gan, T., Dlamini, E., & Biftu, G. (1997). Effects of Model Complexity and Structure, Data Quality, and Objective Functions on Hydrologic Modeling. *Journal of Hydrology*, V.192, N.01, 81-103.
- Gassman, P., Reyes, M., & Green, C. A. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Directions. *Transactions of the ASAE* V.50, N.04, 1211-1250.
- González-Aparicio, I. (2015). *Meteorological data for RES-E integration studies - State of the art review*title Technical Report.
- INEGI. (2008). *VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007*.
- INEGI. (2010). *Red Hidrográfica Edición 2.0. Cuenca R.Santiago-Guadalajara. (Archivo en formato shapefile)*.
- INEGI. (2011). *XIII Censo de Población y Vivienda 2010. Resultados Definitivos*. Obtenido de INEGI: www.inegi.org.mx
- INEGI. (2013). *"Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación", Escala 1:250 000, Serie V (Capa Unión)*. .
- INEGI. (2013). *CEM Jalisco a 15m*. Obtenido de Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0): <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INIFAP. (2017). *Agenda Técnica Agrícola de Jalisco*.
- Izaurrealde, R. W., McGill, W., Rosenberg, N., & Quiroga Jakas, M. (2006). Simulating Soil C Dynamics with EPIC: Model Description and Testing against long-term data. *Ecological Modelling*, V.192, N. 3-4, 362-384.
- Jones, C. (1985). *C-4 Grasses and Cereals*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- Knisel, W. (1980). *CREAMS, A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*. . U.S. Dept. Agric. Conserv. Res. Report No. 26.
- Legates, D., & McCabe, G. (1999). Evaluating the Use of "Goodness-of-fit" Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation . *Water Resources Res.*, V.31, N.01, 233-241.



- Leonard, R., Knisel, W., & Still, D. (1987). GLEAMS: Groundwater Loading Effects Agricultural Management Systems. . *Transactions of the ASAE* V.30, N.05, 1403-1418.
- Ma, L., Ascough II, J., Ahuja, L., Shaffer, M., Hanson, J., & Rojas, K. (2000). Root Zone Water Quality Sensitivity Analysis using Monte Carlo Simulation . *Transactions of the ASAE*, V.43, N.04, 883-895.
- McElory, A., Chiu, S., Nebgen, J., Aletic, A., & Bennett, R. (1976). *Loading Functions for Assessment of Water Pollution from Nonpoint Sources*. Environ. Protection Tech. Serv., EPA 600/2-76-151.
- Monsi, M., & Sakei, T. (1953). Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japan J. Bot*, V.14, 22-52.
- Monteith, J. (1977). Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain. *Trans. Res. Soc. London Ser. B*. V. 281, 277-329.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations . *Transactions of the ASAE*, V.50, N.03, 885-900.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2005). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation, Version 2005*.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2011). *Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Theoretical Documentation. Version 2009*. Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory- Agricultural Research Service.
- Nguyen Duy, L., & Nguyen Kim, L. (2012). Assessing Water Discharge in Be River Basin, Vietnam Using SWAT Model. *International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences*. Ho Chi Minh City, Vietnam.
- Nicks, A. (1974). Stochastic Stochastic Generation of the Occurrence, Pattern, and Location of Maximum Amount of Daily Rainfall. *Proc. Symp. Statistical Hydrology*, V. Agosto-Septiembre 1971, 154-171.
- NMX-AA-159-SCFI-2012: *Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas*. (2012). Obtenido de Diario Oficial de la Federación, México: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166834/NMX-AA-159-SCFI-2012.pdf>
- ONU. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio Climático*. Ginevra, Suiza.
- Ramanarayanan, T., Srinivasan, R., & Arnold, J. (1996). Modeling Wister Lake Watershed Using a GIS-Linked Basin Scale Hydrologic/Water Quality Model. *Proc. Third International Conference on Integratin Geographical Information Systems and Environmental Modeling* .
- Refsgaard, J. (1997). Parametrisation, Calibration and Validation of Distributed Hydrological Models. *Journal of Hydrology*, V.198, N.01, 69-97.
- Rodríguez, X., Mojica, V., Caballero, M., Franco, N., & Domínguez, V. (2006). *Modelación hidrológica con escenarios de contaminación difusa, para la planificación ambiental en la cuenca del río David*. Universidad Tecnológica de Panamá-Facultad de Ingeniería Civil-



Departamento de Hidráulica, Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Campus Víctor Levi Sasso.

- Santhi, C., Arnold, J., Williams, J., Dugas, W., Srinivasan, R., & Hauck, L. (2001). Validation of the SWAT Model on a Large River Basin with Point and Nonpoint Sources. *Journal of American Water Resources Assoc.*, V.37, N.05, 1169-1188.
- SIAPA. (2014). Criterios básicos de diseño, Tabla 1.1. En *Actualización de los Criterios y Lineamientos Técnicos para Factibilidades en Z.M.G. Guadalajara*.
- Siegrist, McCray, Weintraub, Chen, Bagdol, Lemonds, . . . Rada. (2005). Quantifying Site-Scale Processes and Watershed-Scale Cumulative Effects of Decentralized Wastewater Systems, Project No. WU-HT-00-27. *National Decentralized Resources Capacity Development Project*. Washington University, St. Louis, MO, Colorado School of Mines.
- Stefan, H., & Preud'homme, E. (1993). Stream Temperature Estimation from Air Temperature. *Water Resources Bulletin*, V. 30, N.03, 453-462.
- Thormann, R., & Mueller, J. (1987). *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Nueva York: Harper & Row, Inc.
- Uribe, N. (2010). *SWAT: Conceptos Básicos y Guía Rápida para el Usuario, Versión SWAT 2005*. Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- US EPA. (2019). *Definition and Characteristics of Low Flows*. Obtenido de EPA.gov: epa.gov/ceam/definition-and-characteristics-low-flows
- Van Griensven, A., & Bauwens, W. (2003). Multiobjective Autocalibration for Semidistributed Water Quality Models. *Water Resources Res.*, V.39, N.12, 1348-1356.
- Van Liew, M., Arnold, J., & Bosch, D. (2005). Problems and Potential of Autocalibrating a Hydrologic Model. *Transactions of the ASAE*, V. 48, N.03, 1025-1040.
- Williams, J. (1969). Flood Routing with Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients. *Transactions of the ASAE*, V.12, N.01, 100-103.
- Williams, J. (1980). SPNM, a Model for Predicting Sediment, Phosphorus, and Nitrogen from Agricultural Basins. *Water Resources Bull.*, V.16, N.05, 843-848.
- Williams, J. (1990). The Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) Model: A case History. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, V.329, N.1255, 421-428.
- Williams, J., & Brendt, H. (1977). Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. *Transactions of the ASAE*, V.20, N.6, 1100-1104.
- Williams, J., & Hann, R. (1987). Optimal Operation of Large Agricultural Watershed with Water Quality Constraints. En *Tech. Report No. 96*. Texas Water Resources Institute, Texas A&M University.
- Williams, J., Jones, C., & Dyke, P. (1984). A Modeling Approach to Determining the Relationship Between Erosion and Soil Productivity. *Transactions of the ASAE*, V.27, 129-144.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M., & Arnold, J. (2013). *ArcSWAT Interface for SWAT2012: User's Guide*. Temple, Texas: Texas Agrilife Research and USDA Agricultural Research Service.



Wishmeier, W., & Smith, D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. En *Agricultural Handbook No. 537*. US. Department of Agriculture.

