



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**  
Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente  
en Zonas Áridas

## **RESPUESTA HIDROLÓGICA DE CUENCAS EN ZONAS ÁRIDAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

**TESIS**

**Que como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en  
Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas  
Áridas**



**APROBADA**



Presenta:

**Alejandro Cruz González**

Bajo la supervisión de:

Director: Dr. Ignacio Sánchez Cohen

CoDirector: Dr. Miguel A. Velásquez Valle

Asesor: Dr. Ricardo Trejo Calzada

Bermejillo, Durango a 8 de Diciembre de 2020

**RESPUESTA HIDROLÓGICA DE CUENCAS EN ZONAS ÁRIDAS ANTE EL  
CAMBIO CLIMÁTICO**

Tesis realizada por **ALEJANDRO CRUZ GONZÁLEZ** bajo la supervisión del  
Comité

Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para  
obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE  
EN ZONAS ÁRIDAS**



DIRECTOR: \_\_\_\_\_

Dr. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN



CO-DIRECTOR: \_\_\_\_\_

Dr. MIGUEL A. VELÁSQUEZ VALLE



ASESOR: \_\_\_\_\_

Dr. RICARDO TREJO CALZADA

## CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE ECUACIONES .....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
RESUMEN GENERAL.....	ix
ABSTRACT .....	x
CAPITULO I. ....	1
1. Introducción general.....	1
1.1. Importancia.....	4
1.2. Justificación .....	4
1.3. Antecedentes.....	5
1.4. Objetivo general.....	6
1.5. Objetivo específicos.....	6
1.6. Hipótesis.....	7
CAPITULO II. ....	7
2.1. Revisión de literatura .....	7
2.2. Literatura citada.....	17
CAPÍTULO III. APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN EN LA CUENCA DEL RIO YAQUI ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO .....	24
3.1. INTRODUCCIÓN .....	27
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.2.1. Zona de estudio.....	29

3.2.2. Procesamiento de los insumos de entrada.....	29
3.2.3. Aplicación del modelo y parametrización .....	30
3.2.4. Calibración y validación.....	31
3.2.5. Evaluación del modelo .....	32
3.2.6. Escenarios de cambio climático .....	33
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
3.3.1. Calibración y validación.....	34
3.3.2. Escenarios de cambio climático .....	35
3.3.3. Porcentaje de cambio en el escurrimiento superficial.....	36
3.4. CONCLUSIÓN.....	37
3.5. REFERENCIAS.....	38

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la modelación (IICA, 2015).....	8
Tabla 2. Escenarios de RCP del Quinto informe del IPCC (IPCC, 2014). .....	16
Tabla 3. Modelos de Circulación General. ....	16
Tabla 4. Insumos para la modelación en SWAT en la Cuenca del Río Yaqui. ..	43
Tabla 5. Parámetros de calibración para la escorrentía superficial.....	43
Tabla 6. Desempeño del modelo hidrológico, periodo de calibración y validación en las tres subcuencas. ....	44
Tabla 7. Cambio porcentual anual en la disponibilidad total de escurrimiento en las tres subcuencas bajo escenarios RCP.....	44

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de modelos hidrológicos por criterios. ....	10
Figura 3. Climograma para la Cuenca del Río Yaqui. ....	45
Figura 4. Representación espacial subcuencas del Río Yaqui. ....	46
Figura 5. Diagrama de flujo para la modelación hidrológica del Rio Yaqui. ....	47
Figura 6. Escurrimiento observado vs simulado por SWAT para la calibración y validación, subcuencas La Angostura (a), El Novillo (b) y El Oviachic (c). ....	48
Figura 7. Gráfica escalada del flujo observado y simulado para calibración y validación. La Angostura (a), El Novillo (b) y El Oviachic (c). ....	49
Figura 8. Relación lineal del escurrimiento observado vs precipitación, subcuencas La Angostura (a), El Novillo (b) y El Oviachic (c). ....	50

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Correlación de Pearson.....	32
Ecuación 2. Eficiencia de Nash-Suttcliffe.....	32
Ecuación 3. Sesgo Porcentual.....	33

## **AGRADECIMIENTO**

A mis Codirectores de Tesis, Dr. Ignacio Sánchez Cohen y Dr. Miguel Á. Velásquez Valle, así como a mi revisor el Dr. Ricardo Trejo Calzada, por su orientación, confianza y apoyo para poder concluir este trabajo. Aprecio el tiempo que dedicaron en mi investigación.

Gracias en especial a la Dra. Maritza Argelia Macías Corrales, por sus acertadas correcciones y sugerencias en la elaboración del Artículo Científico, su determinación y amor por la ciencia me motiva a seguir preparándome en este camino, y tomar su ejemplo como base para lograr nuevas metas.

Al CENID-RASPA INIFAP, por facilitar el equipo y material, así como sus instalaciones para la realización del presente estudio. Especialmente al M.C. Gerardo Esquivel Arriaga, que con mucho profesionalismo y empatía, brindo asesoría y compartió sus conocimientos durante todo el proceso de mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por haber otorgado la beca número 958625 para la realización de estudios de posgrado.

Mi gratitud a la Unidad Regional de Zonas Áridas (URUZA) por ofrecerme todas las facilidades para poder estudiar su programa de posgrado y a los profesores de esta institución que dedicaron su tiempo en transmitir su conocimiento.

A la universidad Autónoma Chapingo, por ser el órgano rector del posgrado, por brindarme el apoyo y respaldo incondicional durante mi formación como Maestro en Ciencias.



## **DATOS BIOGRÁFICOS**

### **Datos personales**

Nombre: Alejandro Cruz González

Fecha de nacimiento: 24 de Abril de 1993

Lugar de nacimiento: Atlacomulco, Estado de México, México

No. Cartilla militar: D-2073412

CURP: CUGA930424HMCRNL09

Profesión: Licenciado en Geología Ambiental y Recursos Hídricos

Cédula profesional: 11472952



### **Desarrollo académico**

Bachillerato: Técnico Agropecuario, CBT “Maximiliano Ruiz Castañeda”.

Licenciatura: Licenciado en Geología Ambiental y Recursos Hídricos,  
Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM).

### **Desarrollo profesional**

Profesor de Asignatura, Universidad de Atlacomulco, UDA.

## **RESUMEN GENERAL**

**Respuesta hidrológica de cuencas en zonas áridas ante el Cambio Climático**  
**Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma Chapingo**  
**Alejandro Cruz González**  
**Ph. D. Ignacio Sánchez Cohen**

Actualmente, la demanda del recurso hídrico se encuentra en continuo crecimiento, lo que aumenta la presión y escases de las fuentes de agua dulce a nivel global. Asimismo, la reducción proyectada de las aportaciones al ciclo del agua, consecuencia del cambio climático, supone un nuevo nivel de incertidumbre. Los modelos hidrológicos constituyen herramientas vitales para planificar y gestionar el recurso hídrico. Su correcta aplicación resulta esencial en áreas con elevado estrés hídrico, principalmente en zonas áridas y semiáridas. El distrito de riego No. 41 "Valle del Yaqui" desempeña un papel importante en la producción de alimentos en el noroeste de México, lo cual demanda una gran cantidad de agua para abastecer este sistema agroindustrial. En esta región existen riesgos potenciales sobre el futuro en respuesta a la disminución de agua para riego agrícola. Los impactos del cambio climático al caudal de las tres subcuencas que conforman al Río Yaqui, fueron estudiados utilizando la Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (SWAT), para cuantificar la magnitud potencial de futuras alteraciones hidrológicas, principalmente sobre el flujo superficial que alimenta a los grandes embalses de la cuenca. LARS-WG es un generador de clima estocástico, que permite generar escenarios climáticos regionales, el cual, incorpora modelos de circulación general (GCM), probados en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Fase 5 (CMIP5) del IPCC (Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático), entre ellos el modelo HadGEM2-ES, a partir del cual se proyectaron las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP), con las cuales, se forzó el modelo hidrológico SWAT, proyectando el flujo superficial para los escenarios propuestos durante los períodos en estudio 2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080. Los resultados que se generaron en esta investigación, servirán como base en la gestión del recurso hídrico y una pronta mitigación ante el cambio climático en la cuenca.

## **ABSTRACT**

**Hydrological response of basins in arid zones to Climate Change**  
**Master of Science Thesis, Universidad Autónoma Chapingo**  
**Alejandro Cruz González**  
**Ph. D. Ignacio Sánchez Cohen**

Currently, the demand for water resources is constantly growing, which increases the pressure and scarcity of fresh water sources globally. Likewise, the projected reduction in contributions to the water cycle, a consequence of climate change, represents a new level of uncertainty. Hydrological models are vital tools for planning and managing water resources. Their correct application is essential in areas with high water stress, mainly in arid and semi-arid zones. Irrigation district No. 41 "Valle del Yaqui" plays an important role in food production in northwestern Mexico, which requires a large amount of water to supply this agro-industrial system. This region will face potential risks by the decreasing availability of water for agricultural irrigation. The impacts of climate change on the flow of the three sub-basins that make up the Yaqui River were studied using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), to quantify the potential magnitude of future hydrological alterations, mainly on the surface flow that feeds the great reservoirs of the basin. LARS-WG is a stochastic climate generator, which allows generating regional climate scenarios, which incorporates general circulation models (GCM), tested in the Intercomparison of Models Phase 5 Project (CMIP5) of the IPCC (Intergovernmental Group of experts on Climate Change), including the HadGEM2-ES model, from which the Representative Concentration Trajectories (RCP) were projected, with which the SWAT hydrological model was forced, projecting the surface flow for the proposed scenarios during the periods under study 2021-2040, 2041-2060 and 2061-2080. The results generated in this research will serve as a basis for the management of water resources and prompt mitigation of climate change in the basin.

## **CAPITULO I.**

### **1. Introducción general**

El distrito de riego 041 (DR 041) “Río Yaqui” es a nivel nacional uno de los valles agrícolas más grandes en superficie sembrada (234, 057 ha) y representa un valor de cosecha por ciclo de \$6.7 miles de millones de pesos (MXN); en la labranza intensiva de trigo, maíz y cártamo, entre otros (CONAGUA, 2015; SIAP, 2018). La cuenca hidrográfica Río Yaqui soporta y alimenta al DR 041, el cual está constituido por un sistema de infraestructura hidráulica conformado por las presas Lázaro Cárdenas “Angostura” (703.4 hm<sup>3</sup>), Plutarco Elías Calles “El Novillo” (2,833.1 hm<sup>3</sup>) y Álvaro Obregón “El Oviachic” (3,023.1 hm<sup>3</sup>), que de acuerdo al nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO), almacenan agua para administrar los riegos requeridos (CONAGUA, 2019).

Es en esta región del árido mexicano, en donde se presentan las condiciones naturales más estresantes en la producción de cultivos; el problema de la aridez se agrava por el cambio climático global, el comportamiento errático del clima y el cambio de cobertura edáfica, las cuales aceleran la tasa de desertificación (Flores Ortiz, 2016). Estas condiciones requieren de escenarios de modelación precisos, dada la fragilidad del sector agrícola a su dependencia de los recursos hídricos, lo cual define por mucho la capacidad productiva o potencial productivo de las especies cultivadas (Sánchez Cohen et al., 2013).

En la planificación del uso y manejo de los recursos naturales ha sido necesario el desarrollo de modelos de simulación; estas herramientas son empleadas para representar de diferentes maneras los procesos físicos, químicos y biológicos de los ecosistemas y son útiles para proyectar su respuesta ante situaciones y condiciones particulares, así mismo, sirven como apoyo en la planificación y toma de decisiones en el manejo de los recursos naturales (Asseng et al., 2014; Candelaria et al., 2011).

Cuando se considera a la cuenca hidrológica como unidad base de la planeación de las cadenas productivas, es necesario caracterizar el aspecto hidrológico de

la misma (Sánchez-Cohen et al., 2015). Esto se hace mediante un modelo hidrológico, el cual en este caso, se define como una herramienta que intenta simular los diferentes procesos del ciclo del agua dentro de una cuenca (Pereira de Andrade & de Melo Rieiro, 2020).

Algunos de estos modelos son llevados a cabo mediante una plataforma SIG, para considerar la disposición espacial de las propiedades físicas y bióticas que definen el comportamiento hidrológico en la cuenca (Sánchez-Cohen et al., 2015). Con ello se pueden interpretar y predecir los efectos continuos del uso del suelo y la variabilidad climática sobre los parámetros directamente relacionados con las características de la superficie terrestre (Gholami et al., 2016).

Cada modelo hidrológico tiene sus propias características y parámetros de las variables de acuerdo a su complejidad y operación (Gayathri et al., 2015). Los modelos requieren como entrada principalmente; datos climatológicos (Temperatura y precipitación) y de las características del suelo, como: la topografía, el tipo de suelo y vegetación, la hidrogeología y otros parámetros físicos de la cuenca (Gayathri et al., 2015; Sánchez et al., 2013).

Una opción para gestionar y planificar en la cuenca hidrográfica es el modelo SWAT (por sus siglas en inglés, Soil & Water Assessment Tool). Es un modelo hidrológico semi-distribuido, de tiempo continuo y basado en procesos, el cual es considerado una potente herramienta de evaluación en los efectos del manejo del suelo y de los recursos hídricos a escala de una cuenca hidrográfica, se ha implementado en prácticamente todo el mundo, tanto su uso en agencias gubernamentales como en el sector privado, abarcando una amplia gama de propósitos y escenarios (Arnold et al., 2012; Luo et al., 2011; Gassman et al., 2007). Por lo tanto, el modelo SWAT tiene la capacidad de evaluar los impactos temporales de las perturbaciones antropogénicas; así como, las producidas por el cambio climático global.

La preocupación de los gobiernos por los fenómenos naturales extremos, como los climáticos y sus consecuencias han proliferado en los últimos años, como lo demuestra el gran esfuerzo del Panel Intergubernamental sobre Cambio

Climático (IPCC), sobre todo ante sequías prolongadas e inundaciones extremas (IPCC, 2019). Los cambios en el sistema climático global resultantes del impacto antropogénico en el sistema atmosférico y la superficie terrestre, son descritas como "crisis climáticas progresivas", por lo que sus principales síntomas se desarrollan lentamente y, por lo tanto, quizás no se hagan evidentes hasta que sus efectos negativos estén peligrosamente muy avanzados (McGuffie & Henderson-Sellers, 2001).

Los eventos hidrológicos extremos se pueden obtener combinando modelos de circulación general a escala reducida (GCM) con un modelo hidrológico. El modelado climático es una herramienta indispensable para comprender la interacción de procesos atmosféricos y terrestres (Chen et al., 2019). Estos modelos se pueden forzar a partir de (RCP) Trayectorias de Concentración Representativas, las cuales indican un nivel de emisiones continuas de Gases de Efecto Invernadero (GEI), con la finalidad de conocer un posible escenario (Fernández et al., 2015).

Los diversos modelos de circulación general (GCM) representan los procesos físicos en la atmosfera, el océano y la superficie terrestre. Son considerados como las herramientas numéricas más avanzadas para simular la respuesta futura del clima global ante una exposición de concentración de GEI (Kour et al., 2016).

Los cambios globales del clima que se están presentando, amenazan el equilibrio de las condiciones bajo las cuales la vida ha evolucionado y se mantiene actualmente, las temperaturas están aumentando, la radiación ultravioleta está aumentando en la superficie y los niveles de contaminantes del aire están aumentando (McGuffie & Henderson-Sellers, 2001), por lo cual se debe presentar una pronta respuesta de adaptación y mitigación ante este fenómeno global.

En esta investigación se presenta una modelación en el modelo SWAT para la cuenca del Rio Yaqui, con el fin de simular la mejor representación de los procesos hidrológicos dentro de la cuenca, ante forzamientos de futuros escenarios regionales de cambio climático.

### **1.1. Importancia**

La cuenca hidrográfica Río Yaqui, significa el soporte hídrico para el riego en el distrito agrícola 041, el cual está constituido por un complejo sistema de infraestructura hidráulica, tanto como canales de distribución y presas de almacenamiento (Lázaro Cárdenas, Plutarco Elías Calles y Álvaro Obregón), en las cuales año tras año varía su nivel de almacenamiento, por lo cual implica ajustar la superficie cultivada (CONAGUA, 2018).

Históricamente la Cuenca del Yaqui, ha soportado una gran presión social y el uso consultivo de los cultivos ha aumentado durante el tiempo, las actividades agroindustriales han sido la base del desarrollo en la cuenca, causando un gran deterioro ambiental, sumando a esto, la mala gestión y la desigual distribución del agua, se ha vuelto este recurso cada vez más escaso e inaccesible (Mounir et al., 2019; Padilla Calderón, 2017).

### **1.2. Justificación**

Las condiciones de sequía en el Noroeste de la República Mexicana han sido persistentes y los recursos hídricos han presentado una alta demanda, debido al aumento poblacional (Martínez Austria et al., 2014). La cuenca del Río Yaqui se ubica en los estados de Sonora y Chihuahua, donde los recursos hídricos están bajo presión, no solo por su clima árido-semiárido sino también por la demanda de agua dulce para actividades agrícolas, cuya principal fuente con más del 80% es el agua superficial para el riego (Muñoz-Arriola et al., 2009). Las presas de almacenamiento son abastecidas por el afluente del Río Yaqui, cuyo escurrimiento depende de la precipitación pluvial, por lo que sus variaciones temporales impactan en la disponibilidad de los volúmenes de agua almacenados en las presas (Sánchez Cohen et al., 2020).

El área que conforma de la cuenca del Río Yaqui, se considera climatológicamente frágil y vulnerable, sujeta a pedidos de sequías frecuentes, las más severas con periodos de retorno de alrededor de 50 y 100 años, que de acuerdo a los escenarios de cambio climático habrían de incrementarse, afectando de manera importante las actividades agropecuarias, base y sustento

económico de la zona (Martínez et al., 2014). En este contexto, se requieren herramientas científicas que permitan la evaluación del efecto causado por el cambio climático en la disponibilidad del agua en el futuro de la cuenca. Los escenarios climáticos son de interés para los encargados de administrar y manejar los recursos hídricos en la cuenca y podrían servir como punto de partida para la planificación y gestión del agua.

### **1.3. Antecedentes**

El modelo hidrológico SWAT (Herramienta de evaluación del suelo y el agua) desarrollada por Neitsch et al. (2011) y Arnold et al. (1998), es uno de los modelos más utilizados a nivel mundial y se ha aplicado para una amplia variedad de problemas donde se involucran los recursos hídricos, principalmente a escala de cuenca y diversas condiciones ambientales, como lo demuestran aproximadamente 4000 artículos documentados publicados en revistas de alto impacto científico y tecnológico (Tan et al., 2020).

El cambio climático hoy en día se está presentando de manera acelerada, debido en gran medida al aumento de las actividades humanas. Este cambio en las variables climáticas puede ocurrir en diferentes formas, en diferentes escalas de tiempo y en diferentes entornos geográficos debido al forzamiento interno y externo del planeta (Boru et al., 2019). Es por ello, que numerosas investigaciones se han realizado en todo el mundo, con la finalidad de comprender este fenómeno y generar una resiliencia ante la vulnerabilidad de muchos sectores, en especial de los recursos naturales.

La revisión de aplicaciones del modelo SWAT en temas hidroclimáticos, es muy amplia y se enfoca al cambio climático. Uno de los primeros estudios fue realizado por Eheart & Tornil (1999), en el cual evaluó la variación del flujo para riego agrícola ante varios escenarios de cambio climático. Gurung & Bharati. (2012), cuantificó los efectos aguas abajo del desvío de un escurrimiento, tanto con escenarios climáticos actuales como futuros. Zhang et al. (2014), propone una metodología capaz de interpretar la incertidumbre en la simulación de un caudal extremo, bajo situaciones de cambio climático. Vu et al. (2015), realizaron



evaluaciones de la sequía hidrometeorológica con proyecciones climáticas, de un modelo climático regional. Chen et al. (2017), evaluaron el efecto potencial del calentamiento global de 1.5 °C y 2 °C en la descarga del río, bajo proyecciones climáticas corregidas de cinco modelos de circulación general (MCG) y dos vías de concentración representativas (RCP2.6 y RCP4.5) y Boru et al. (2019) realizaron un análisis de la respuesta del caudal de los arroyos y la cantidad de agua que puede presentarse debido al cambio climático utilizando GCM.

En la cuenca del Río Yaqui, se han llevado a cabo varios estudios relacionados con el cambio climático y el manejo de los recursos hídricos, tal es el caso como lo presentan Muñoz-Arriola et al. (2009), estudiaron la sensibilidad del caudal a la variabilidad climática y los cambios de cobertura edáfica, posteriormente Martínez Austria et al. (2014), analizaron las tendencias meteorológicas observadas, para verificar la existencia en los hechos de la variabilidad del comportamiento climático, por otra parte, Mounir et al. (2019), desarrollaron un modelo de operación diaria de reservorios a fin de ayudar a los operadores en el proceso de gestión y toma de decisiones, para poder distribuir el agua para riego y también Sánchez Cohen et al. (2020), proponen un protocolo para el análisis de información climática e hidrológica, para lograr una planificación racional de la asignación del agua de riego agrícola en condiciones de incertidumbre de lluvia.

#### **1.4. Objetivo general**

Evaluar los impactos producidos por el cambio climático sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del Río Yaqui, Sonora, empleando el modelo SWAT.

#### **1.5. Objetivo específicos**

Calibrar y validar el modelo de simulación SWAT con datos observados en la Cuenca del Río Yaqui.

Generar escenarios de cambio climático mediante el software LARS-WG.

Evaluar la capacidad de predicción del modelo hidrológico SWAT ante escenarios de cambio climático con diferentes Trayectorias de Concentración Representativas (RCP).

### **1.6. Hipótesis**

El modelo SWAT, es capaz de predecir adecuadamente los impactos temporales de las perturbaciones antropogénicas; así como, aquellas producidas por el Cambio Climático en la cuenca del Río Yaqui.

## **CAPITULO II.**

### **2.1. Revisión de literatura**

#### *Modelos de simulación*

El concepto de modelo puede establecerse como la representación simplificada de un sistema, en el cual se describen las variables dependientes e independientes que lo integran. Los modelos pueden ser descriptivos o de simulación, en los primeros modelos se representan los componentes de un sistema real, mientras que en los segundos se simula el proceso del sistema y se generan predicciones, a manera de datos numéricos o gráficos (Candelaria et al., 2011).

El proceso de simulación consiste en representar un modelo a partir de conocimiento teórico sobre un sistema real, para experimentar con él y poder entender el comportamiento de ese sistema, de modo que en el futuro sea posible predecirlo, la simulación se considera una analogía con la realidad, siendo común en muchas áreas científicas principalmente en ciencias ambientales (IICA, 2015; Dourado-Neto et al., 1998).

Los modelos de simulación establecen una herramienta funcional para entender y dimensionar la complejidad que caracteriza a los sistemas ecológicos y ambientales. Esto es debido a que son la única herramienta disponible para interpretar una serie de hipótesis acerca de procesos naturales en una representación de cómo el ecosistema funciona con sus elementos (Hernández et al., 2009).

De acuerdo con Asseng et al. (2014), el modelado es una manera de representar un conocimiento cuantitativo y cualitativo mediante algoritmos numéricos. Los cuales permiten simular condiciones reales de la dinámica de los ecosistemas antropogénicos y naturales, en la Tabla 1 se presentan ventajas y desventajas de la modelación.

**Tabla 1. Ventajas y desventajas de la modelación (IICA, 2015).**

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite un experimento controlado.</li> <li>• Permite disminuir el tiempo al experimentar.</li> <li>• Permite el análisis de parámetros sensibles del sistema ante determinados cambios.</li> <li>• Evita altos costos o riesgos, no es necesario interrumpir el desarrollo del sistema para estudiar su comportamiento.</li> <li>• No es necesario modificar al sistema si se desea investigar los límites de resistencia.</li> <li>• Puede ayudar a simplificar procesos productivos.</li> <li>• En ocasiones es el único método disponible para analizar un sistema.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El desarrollo del modelo puede ser costoso, laborioso y lento.</li> <li>• El experimento se lleva a cabo con un modelo y no con el sistema verdadero, por lo que si el modelo es erróneo o se cometen errores en su manejo, los resultados también serán incorrectos.</li> <li>• No permite conocer el nivel de imprecisión de los resultados.</li> <li>• Es la última opción, cuando otras técnicas no son factibles para analizar un sistema.</li> <li>• Es experimental e iterativa, es decir, se acerca a un resultado por aproximación, mediante la reiteración de un ejercicio.</li> </ul>

### *Modelo hidrológico*

Un modelo hidrológico se considera como una representación simple de un sistema real (Moriassi et al., 2007). El modelado hidrológico es una herramienta que intenta simular los procesos hidrológicos dentro de un sistema (Cuenca, río, cultivo, etc.). Una parte integral de cualquier modelo hidrológico, es estimar las variables del ciclo del agua y su comportamiento a partir de datos meteorológicos reales, como temperatura, precipitación, radiación solar, velocidad del viento y hasta humedad relativa (Pereira de Andrade & de Melo Rieiro, 2020).

El modelo con mejor representación es el que permite obtener los resultados más cercanos a la realidad, con el uso de parámetros mínimos y menor complejidad de manejo. Estos modelos se utilizan para predecir la variabilidad espacial y

temporal del sistema y comprender varios procesos del ciclo hidrológico (Gayathri et al., 2015).

### *Tipos de modelos hidrológicos*

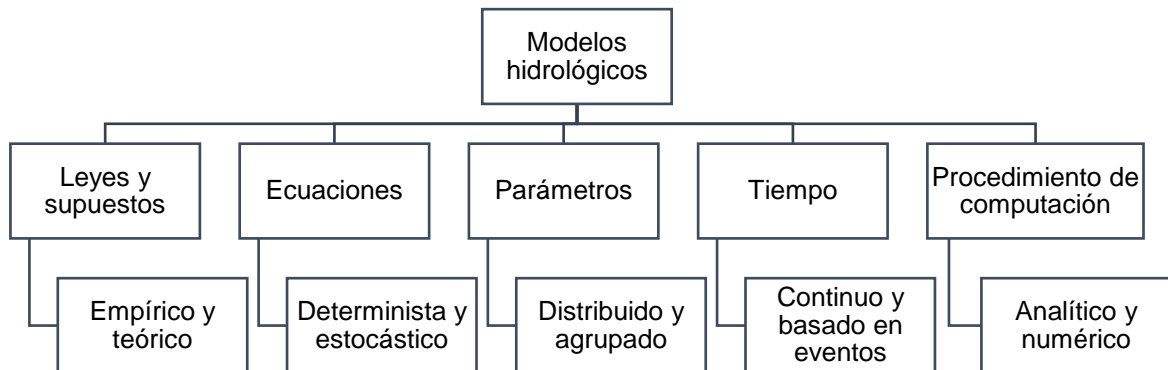
Los modelos de cuencas hidrográficas se pueden agrupar en varias categorías basado en los enfoques de modelado utilizados (Daniel et al., 2011). Gayathri et al. (2015), agrupa a los modelos hidroeinformáticos como físicos y matemáticos, estos últimos se pueden dividir en; modelos deterministas (métrico) donde incluye información empírica, conceptual o teórica, y modelos indeterministas (Estocásticos) que incluyen modelos probabilísticos y de inteligencia artificial.

1. **Modelo empírico o de caja negra:** Está orientado a la observación, consideran solo la información de datos existentes sin considerando las características y procesos del sistema hidrológico y, por lo tanto. Implica ecuaciones matemáticas derivadas de series de tiempo de entrada y salida, y no considera los procesos físicamente basados presentados en la cuenca.
2. **Modelo conceptual:** Este modelo describe todos los componentes del proceso hidrológicos. Consiste en una conceptualización de una serie de elementos y procesos físicos que caracterizan a la cuenca. Se utilizan ecuaciones semi empíricas, el método y los parámetros utilizados se evalúan a partir de datos recolectados en campo y también a través de la calibración.
3. **Modelo físico:** Ésta es una representación matemáticamente idealizada del fenómeno real. Estos también se llaman mecánicos. Utiliza variables medibles en tiempo y espacio.

Los modelos deterministas se desarrollan mediante un conjunto de procesos conocidos, por ejemplo, procesos hidrológicos incluidos en la transformación de lluvia-escorrentía, acumulación de contaminantes en la cuenca, crecimiento de vegetación y contaminación e impacto hidrológico, etc. Mientras que los modelos indeterministas se desarrollan típicamente a partir de datos medidos. Los

modelos se desarrollan a partir de datos (minería de datos) y el conocimiento previo (Daniel et al., 2011; Gayathri et al., 2015).

Jajarmizadeh et al. (2012), proponen una clasificación de los diferentes modelos hidrológicos con base a en criterios, aplicaciones y necesidades en el proceso de modelación en la cuenca, así mismo considera los diversos elementos de cada tipo de modelo, esta agrupación se puede verificar en la Figura 1.



**Figura 1. Clasificación de modelos hidrológicos por criterios.**

En años recientes, por el desarrollo de los sistemas computacionales y procesamiento de datos, las plataformas de Sistemas de Información Geográficas (SIG), han permitido el desarrollo e implementación de diversos modelos hidrológicos espacialmente los de carácter distribuido; los cuales se han utilizado ampliamente para apoyar la gestión, planificación y toma de decisiones del agua y del ecosistema dentro de la cuenca, hasta la seguridad pública en eventos extremos como inundaciones o sequías (Yasir et al., 2020; Waseem et al., 2017; Abbaspour et al., 2015).

### *Modelo SWAT*

Entre los numerosos modelos que se han empleado para la gestión y planificación de cuencas hidrográficas, se destaca el modelo SWAT (Herramienta de evaluación de suelos y aguas), el cual es de dominio público apoyado activamente por el Servicio de Investigación Agrícola del USDA, E.U.A y por la Universidad de Texas A&M, el cual consiste en un modelo conceptual matemático semi-físico, semi-distribuido y de tiempo continuo, cuya operación es

a través de datos diarios, que permiten la interacción de los distintos fenómenos físicos que se presentan en una cuenca a través de una plataforma SIG; (Arnold et al., 2012; Luo et al., 2011; Gassman et al., 2007).

El modelo está estructurado en los diferentes componentes físicos de la cuenca, tales como: hidrología, clima, edafología, vegetación y uso de suelo, sedimentos, nutrientes, manejo agrícola, entre otros. Aunque el modelo opera en un periodo de tiempo diario, es eficiente para simular una serie extensa de años, y se usa para predecir el comportamiento futuro del ciclo del agua (Figura 2), así mismo para reconstruir el pasado hidrológico en la cuenca (Arnold et al., 2012; Ahl et al., 2008; Arnold et al., 1998).

La herramienta de evaluación de suelo y agua (SWAT) desarrollada por Neitsch et al. (2011 y Arnold et al. (1998), requiere para la modelación, un conjunto de información espacial como: un modelo digital de elevación (DEM), un mapa de uso del suelo y vegetación y un mapa edafológico. Además, también se requiere alimentar el modelo con datos meteorológicos como precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa.

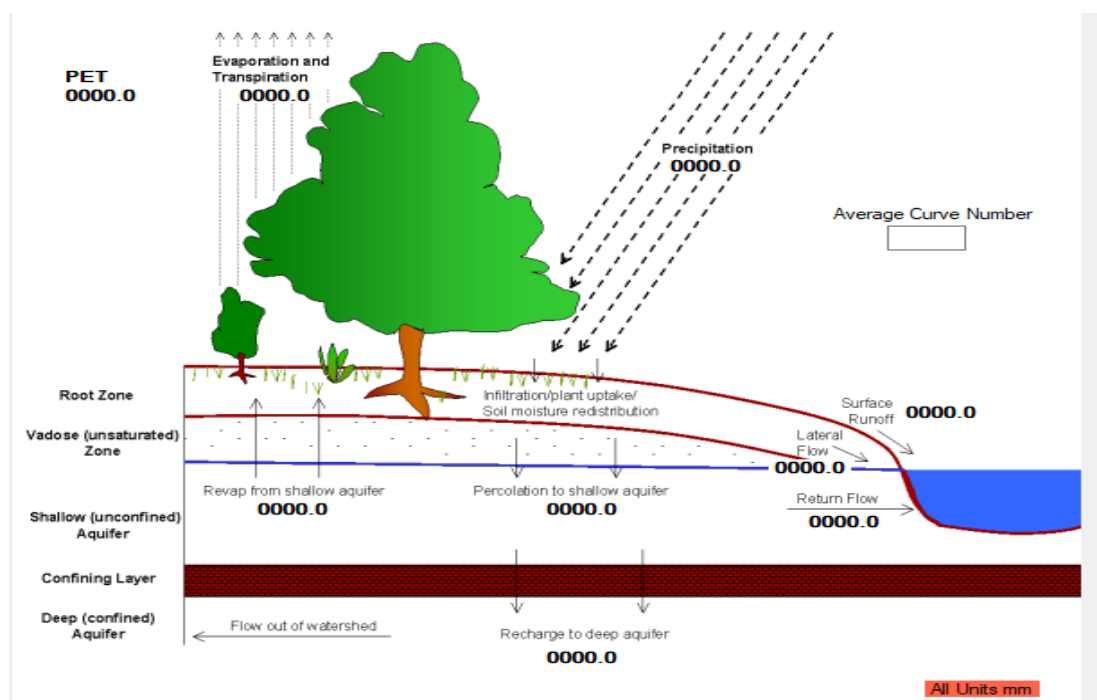


Figura 2. Representación esquemática del ciclo del agua en SWAT.

### *Cambio climático*

El cambio climático es un tema de gran relevancia actualmente y que nos concierne a todos. Se han venido estudiando sus causas y efectos al igual que sus posibles soluciones con el fin de preservar la vida del planeta y de todos los seres existentes en él. Respecto al concepto de Cambio Climático, a continuación, se presentan algunas definiciones del término:

En la CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) llevada a cabo en Rio de Janeiro en 1992, se define por primera vez al cambio climático como un “cambio del clima por causas directas o indirectas a la actividad antropogénica, que modifica la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima presentada durante lapsos de tiempo comparables” (ONU, 1992).

SEMARNAT (2009), define al cambio climático como todo cambio que ocurre en el clima a través del tiempo, resultado de la variabilidad natural o de las actividades humanas.

Quintero-Angel et al. (2012), define al cambio climático como la alteración del clima a grandes escalas de tiempo, normalmente décadas, debido a causas externas o internas a la tierra, naturales o antropogénicas, y con ocurrencias en el pasado de la tierra.

### *Manifestaciones del cambio climático*

Para el IPCC (2014), los fenómenos más importantes del cambio climático es el aumento de temperatura y la variabilidad en precipitación, la tendencia lineal que se proyectó a cien años (1906-2005), es de 0.7 (0.56° C y 0.92° C) entre el periodo 1956 y 2005, el calentamiento lineal (0.13 por decenio) ha sido prácticamente el doble del experimentado en un periodo de cien años presentados desde 1906 hasta 2005. En este contexto el IPCC (2019), menciona que se ha presentado a la par el derretimiento de hielo y nieve así como un gran aumento de intensidad y frecuencia, de la actividad ciclónica tropical en el Atlántico Norte desde aproximadamente 1970. También se tiene registro de una

mayor ocurrencia de valores atípicos y extremos de aumento de nivel del mar, episodios de lluvia intensa, períodos cálidos y olas de calor.

Los efectos adversos en los ecosistemas naturales son evidentes con la variabilidad estacional y el desplazamiento hacia diferentes latitudes y hacia mayores altitudes del espacio geográfico de la flora y de la fauna; se han presentado emigraciones poco comunes de especies, lo cual está directamente asociado al reciente calentamiento del planeta tierra. Los sistemas hídricos, están padeciendo los siguientes efectos: aumento de la escorrentía superficial y aumento de caudales máximos, aumento de la temperatura de lagos y ríos en muchas regiones, con efectos sobre la vida acuática, regulada por la estructura térmica y la calidad del agua. El aumento de nivel del mar y el avance de la mancha urbana, están contribuyendo a la pérdida de ecosistemas marinos; como lo son los humedales costeros y manglares, lo cual favorece al él un creciente riesgo de inundaciones costeras (Boru et al., 2019; Díaz Cordero, 2012).

#### *Los escenarios futuros*

El Grupo Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) propuso diferentes escenarios, con la necesidad de plasmar una proyección sobre los principales efectos y consecuencias del Cambio Climático. Con respecto a la temperatura media registrada durante el período 1850-1900, es probable que en 2100 la temperatura media aumente 1.5 °C. El incremento de la temperatura podría superar los 4 °C, si se contempla el peor escenario, en el cual el sistema productivo se sigue basando en las fuentes de energías contaminantes (fósiles) y en el que se produce un crecimiento económico acelerado. Además, es probable que se presenten temperaturas altas con una mayor incidencia y temperaturas frías menos recurrentes en la mayoría de las zonas continentales. De acuerdo a esta información será muy probable que se presenten olas de calor con mayor frecuencia e intensidad. Continuarán los extremos de temperatura, principalmente frías durante el invierno de manera ocasional (IPCC, 2014).

Los posibles cambios proyectados en el comportamiento del clima incluyen el aumento de la temperatura media, variabilidad espacial en la precipitación,



aumento en el nivel del mar, y el aumento de la recurrencia y fuerza de los fenómenos climáticos extremos. Los impactos observados y proyectados de estos cambios en el clima, incluyen alteraciones de diversos aspectos de la biodiversidad y en regímenes de las modificaciones (Frecuencia de incendios, plagas y enfermedades). Las medidas para el proceso de adaptación y mitigación podrían mitigar y controlar algunos de estos impactos, se percibe como sistemas vulnerables y en peligro, los que se encuentran expuestos y son altamente sensibles al cambio climático (IPCC, 2014; IPPC, 2002).

### *Modelos Climáticos*

El modelo climático se considera una representación del clima global, construidas por cálculos que surgen de una caracterización basada en ecuaciones físicas física, químicas y de la dinámica de fluidos (McGuffie & Henderson-Sellers, 2001). Los modelos que se utilizan específicamente para el estudio e interpretación del clima y los cambios asociados, están sustentados en leyes físicas y pueden simular las características registradas y observadas del clima presente y del pasado. La certidumbre que se presenta en los cálculos estimados de los modelos, para algunas variables climáticas es mayor que para otras, como el caso de la temperatura y la precipitación (IICA, 2015).

El incremento de la temperatura media mundial se estima a partir de ensayos llevados a cabo con los Modelos Climáticos Globales (MCG). Estos modelos son una representación numérica del complejo sistema climático, mediante la aplicación de un software informático que produce los fenómenos físicos presentes en las capas de la atmósfera, y por lo tanto, permite identificar y evaluar los efectos que diversas concentraciones de GEI influirán en el clima global (Velázquez-Zapata et al., 2017). Los MCG se han desarrollado con la finalidad de simular el comportamiento del clima actual y modelar los cambios climáticos futuros, con lo que se podrá realizar estudios de impacto global a nivel cuenca hidrográfica (Chen et al., 2019; Kour et al., 2016).

Se han desarrollado varios métodos estadísticos y dinámicos de regionalización (Reducción de escala o downscaling) para resolver el problema de baja

resolución espacial de los modelos. Estos métodos estadísticos de re-escalamiento se desarrollan para encontrar relaciones entre gran escala y escalas locales o regionales, las cuales se aplican a las salidas de los modelos de circulación general para poder generar representaciones a escalas más detalladas (Kour et al., 2016)

McGuffie & Henderson-Sellers. (2001). Estos autores han clasificado a los modelos climáticos en cuatro tipos:

1. Modelos de balance energético (MBE): los cuales predicen la temperatura superficial con base al balance energético de la tierra.
2. Modelos RC unidimensionales: son modelos tipo radiativo-convectivos, que permite estimar la temperatura vertical de la atmósfera en equilibrio, entre el calentamiento o enfriamiento radiativo y el flujo de calor vertical.
3. Bidimensional: este modelo es de características estadístico-dinámico (SDM), que unen la dimensión latitudinal de MBE con la dimensión vertical del modelo unidimensional radiativo-convectivo.
4. Modelo Circulación General (MCG): este modelo incorpora la naturaleza tridimensional de la atmósfera y el océano.

#### *Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero*

Las emisiones gases de efecto invernadero (GEI) generadas por actividades antropogénicas, dependen de diversos factores como; el tamaño de la población, la actividad económica, hábitos vida, energías fósiles, uso del suelo, desarrollo tecnológico y la política climática (IPCC, 2014). El termino forzamiento radiativo ha sido empleado por el IPCC con el contexto particular de un proceso que modifica el equilibrio energético del sistema climático global. Las diferentes trayectorias de concentración representativas (RCP), representan un nivel de emisiones de GEI, los cuales se expresan en  $W/m^2$  (Fernández et al., 2015).

Durante la presentación del quinto informe del IPCC, se definieron cuatro trayectorias RCP (Tabla 2), las cuales integran un escenario de forzamiento bajo (RCP 2.6), dos escenarios con niveles de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un

escenario de mayor forzamiento con un alto nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5) (Semenov & Stratonovitch, 2015; (IPCC, 2014; Semenov & Stratonovitch, 2010). Los horizontes que se utilizan para realizar las proyecciones de forzamiento radiativo consideran los siguientes periodos: futuro cercano (2015-2039), futuro medio (2045-2069) y futuro lejano (2075-2099) (Fernández et al., 2015).

**Tabla 2. Escenarios de RCP del Quinto informe del IPCC (IPCC, 2014).**

RCP	FR (W/m <sup>2</sup> )	Tendencia FR en 2100	CO <sub>2</sub> en 2100	Aumento de T (°C)
RCP2.6	2.6	Decreciente	421 ppm	0.3-1.7
RCP4.5	4.5	Estable	538 ppm	1.1-2.6
RCP6.0	6	Creciente	670 ppm	1.4-3.1
RCP8.5	8.5	Creciente	936 ppm	2.6-4.8

*Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP),*

Este proyecto surge en el año de 1995, como una iniciativa de los programas de Variabilidad Climática y Predictibilidad (CLIVAR) y el Programa Mundial de Investigaciones del Clima (WCRP) (Meehl et al., 2000). Cuya finalidad ha sido avanzar en la comprensión del clima pasado, presente y futuro mediante la implementación de MCG acoplados océano-atmósfera-tierra (Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017).

La quinta fase del CMIP (CMIP5), se establece con el propósito de mejorar la comprensión del clima, participaron 20 grupos de modelización, incluyendo más de 50 modelos climáticos (Tabla 3), colaborando en conjunto en proporcionar información precisa, principalmente en zonas de mayor incertidumbre y vulnerabilidad Fernández et al. (2015).

**Tabla 3. Modelos de Circulación General.**

Modelo	Institución	País
BCC_CSM1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	China
CAnESM	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadá

<b>CNRMCM5</b>	Centre National de Recherches Météorologiques	Francia
<b>CSIRO_Mk3</b>	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	Australia
<b>GFDL_CM3</b>	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	Estados Unidos
<b>GISS_E2_R</b>	NASA Goddard Institute for Space Studies (NASA-GISS)	Estados Unidos
<b>HADGEM2_ES</b>	Met Office Hadley Centre (MOHC)	Reino Unido
<b>INM</b>	Russian Institute for Numerical Mathematics	Rusia
<b>MIROC_esm</b>	Atmosphere and Ocean Research Institute	Japón
<b>MPI_ESM_LR</b>	Max Planck Institute for Meteorology	Alemania

## 2.2. Literatura citada

- Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve, B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Ahl, R. S., Woods, S. W., & Zuuring, H. R. (2008). Hydrologic calibration and validation of SWAT in a snow-dominated Rocky Mountain watershed, Montana, U.S.A. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(6), 1411–1430. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00233.x>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508.
- Arnold, J. G., Moriasi, N. D., Gassman, W. P., Abbaspour, C. K., & White, J. M. (2012). Model use, calibration, and validation. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*, 406.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part i : model development. *Journal of the American Water Resources Association*. 1. 34(1), 73–89.
- Asseng, S., Zhu, Y., Basso, B., Wilson, T., & Cammarano, D. (2014). Simulation Modeling: Applications in Cropping Systems. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 5, 102–112. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00233-3>
- Bonilla-Ovallos, C. A., & Mesa Sánchez, O. J. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Ciencias de La Tierra*, 41(158), 107. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.427>
- Boru, G. F., Gonfa, Z. B., & Diga, G. M. (2019). Impacts of climate change on stream flow and water availability in Anger sub-basin, Nile Basin of Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 5(4), 1755–1764. <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00327-0>
- Candelaria, M. B., Rosado, O. R., Felipe, G., Hernández, P. P., Becerra, Á. M., & Vargas, L. L. (2011). Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3), 999–1010.
- Chen, J., Gao, C., Zeng, X., Xiong, M., Wang, Y., Jing, C., Krysanova, V., Huang, J., Zhao, N., & Su, B. (2017). Assessing changes of river discharge under

global warming of 1.5 °C and 2 °C in the upper reaches of the Yangtze River Basin: Approach by using multiple- GCMs and hydrological models. *Quaternary International*, 453, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.01.017>

Chen, Q., Chen, H., Wang, J., Zhao, Y., Chen, J., & Xu, C. (2019). Impacts of climate change and land-use change on hydrological extremes in the Jinsha River Basin. *Water (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/w11071398>

CONAGUA, Comision Nacional del Agua. (2018). Estadísticas del Agua en México (Issue 1). <https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004>

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2015). Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. In CONAGUA: Vol. Edición 20. <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/147019/ea2011-2012.pdf>

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2019). Información hidrométrica, climatológica y de presas de la región. 1.

Daniel, E. B., Camp, J. V., LeBoeuf, E. J., Penrod, J. R., Dobbins, J. P., & Abkowitz, M. D. (2011). Watershed Modeling and its Applications: A State-of-the-Art Review. *The Open Hydrology Journal*, 5, 26–50.

Díaz Cordero, G. (2012). EL CAMBIO CLIMÁTICO. *Ciencia y Sociedad*, 2, 183–197.

Dourado-Neto, D., Teruel, D. A., Reichardt, K., Nielsen, D. R., Frizzone, J. A., & Bacchi, O. O. S. (1998). Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. *Scientia Agricola*, 55(spe), 46–50. <https://doi.org/10.1590/s0103-90161998000500008>

Eheart, J. W., & Tornil, D. W. (1999). Low-flow frequency exacerbation by irrigation withdrawals in the agricultural Midwest under various climate change scenarios. *WRPMD 1999: Preparing for the 21st Century*, 35(7), 2237–2246. [https://doi.org/10.1061/40430\(1999\)252](https://doi.org/10.1061/40430(1999)252)

Fernández Eguarte, A., Zavala Hidalgo, J., Romero Centeno, R., Conde Álvarez, A. C., Irma Trejo Vázquez, R., Calderón Bustamante, O., Mata Cruz, M. A., Bautista Durán, Á. V., Castelán Hernández, Carolina Ivonne Flores Espinosa, M. Á., & Herrera Moro, D. R. (2015). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación. (U. Centro de Ciencias de la Atmósfera & S. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (eds.); 1st ed.). <http://atlasclimatico.unam.mx/AECC/servmapas/>

- Flores Ortiz, C. M. (2016). Zonas Áridas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(1), 7–8. [https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/39-1/reunion\\_zonas\\_aridas.pdf](https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/39-1/reunion_zonas_aridas.pdf)
- Gassman P, W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Gayathri, K. D., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Gayathri K, D., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4(Icwrcoe), 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Gholami, A., Habibnejad Roshan, M., Shahedi, K., Vafakhah, M., & Solaymani, K. (2016). Hydrological stream flow modeling in the Talar catchment (central section of the Alborz Mountains, north of Iran): Parameterization and uncertainty analysis using SWAT-CUP. *Journal of Water and Land Development*, 30(1), 57–69. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0022>
- Gurung, P., & Bharati, L. (2012). Downstream Impacts of the Melamchi Inter-Basin Water Transfer Plan (MIWTP) Under Current and Future Climate Change Projections. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment*, Figure 1, 23–29. <https://doi.org/10.3126/hn.v11i1.7199>
- Hernández, N., Soto, F., & Caballero, A. (2009). Revisión bibliográfica Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. *Cultivos Tropicales*, 30(1), 73–82.
- IICA, (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). (2015). Modelos de simulación y herramientas de modelaje.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. In *Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
- IPCC. (2019). Calentamiento Global de 1,5 °C. In *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPPC, G. I. de E. sobre el C. C. (2002). Cambio climático y biodiversidad. In *Biodiversidad 2014. Reporte de estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. <https://doi.org/10.21068/b001.2014.208>
- Jajarmizadeh, M., Harun, S., & Salarpour, M. (2012). A Review on Theoretical Consideration and Types of Models in Hydrology. *Journal of*

Environmental Science and Technology, 5, 249–261.  
<https://doi.org/10.3923/jest.2012.249.261>

- Kour, R., Patel, N., & Krishna, A. P. (2016). Climate and hydrological models to assess the impact of climate change on hydrological regime: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(9). <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2561-0>
- Luo, P., Takara, K., He, B., Cao, W., Yamashiki, Y., & Nover, D. (2011). Calibration and Uncertainty Analysis of Swat Model in a Japanese River Catchment. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 67(4), I\_61-I\_66. [https://doi.org/10.2208/jscejhe.67.i\\_61](https://doi.org/10.2208/jscejhe.67.i_61)
- Martínez Austria, P. F., Patiño Gómez, C., & Tamayo Escoba, J. E. (2014). Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, V(6), 135–149.
- McGuffie, K., & Henderson-Sellers, A. (2001). Forty years of numerical climate modelling. *International Journal of Climatology*, 21(9), 1067–1109. <https://doi.org/10.1002/joc.632.abs>
- Meehl, G. A., Boer, G. J., Covey, C., Latif, M., & Stouffer, R. J. (2000). The Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) Gerald. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 313–318.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Mounir, A., Che, D., Gonzalez-Parra, C., & Robles-Morua, A. (2019). Development of a Reservoir System Operation Model for Water Sustainability in the Yaqui River Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(9), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001098](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001098)
- Muñoz-Arriola, F., Avissar, R., Zhu, C., & Lettenmaier, D. P. (2009). Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. *Water Resources Research*, 45(11), 1–13. <https://doi.org/10.1029/2007WR006783>
- Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. ., & Williams, J. . (2011). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute, 1–647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>



- ONU, O. de las N. U. (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. 62301.
- Padilla Calderón, E. (2017). Los Yaquis y las crecientes del Río. Una historia de control hidráulico del Río Yaqui. *Revista Culturales*, 5(2), 67–106. <https://doi.org/10.22234/recu.20170502.e316>
- Pereira de Andrade, M., & de Melo Rieiro, C. B. (2020). Impacts of land use and cover change on paraíba do sul watershed streamflow using the swat model. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190034>
- Quintero-Angel, M., Carvajal-Escobar, Y., & Alcunce, P. (2012). Adaptación a La Variabilidad Y El Cambio Climático: Intersecciones Con La Gestión Del Riesgo. *Luna Azul*, 34, 257–271. <https://doi.org/10.17151/luaz.2012.34.15>
- Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A., Esquivel-Arriaga, G., Bueno-Hurtado, P., & Pedroza-Sandoval, A. (2015). Minimum hydrologic characterization for research in experimental watersheds with limited availability of information in arid lands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XIV(2), 185–208. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2015.07.007>
- Sánchez Cohen, I., Macías-Corral, M. A., Arriaga Esquivel, G., Paredes Cerano, J., Cabrera Carbajal, F., E. Borlaug, N., Inzunza Ibarra, M. A., Díaz Padilla, G., & Guajardo Panes, R. (2020). Rainfall uncertainty and water availability: elements for planning water allocation to users in irrigation districts of Mexico. Study case Irrigation District 041 Yaqui River. *Atmósfera*, 0–23. <https://doi.org/10.20937/ATM.52792>
- Sánchez Cohen, I., Velásquez Valle, M. A., Inzunza Ibarra, M. A., Esquivel-Arriaga, G., Bueno Hurtado, P., & Díaz Padilla, G. (2013). Modelo de balance hídrico como apoyo a toma de decisiones en zonas agrícolas bajo incertidumbre climática. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- SEMARNAT. (2009). Cambio climático. Una guía didáctica. Cambio climático: ciencia, evidencia y acciones (Vol. 1).
- Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41(1), 1–14. <https://doi.org/10.3354/cr00836>
- Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2015). Adapting wheat ideotypes for climate change: Accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Climate Research*, 65, 123–139. <https://doi.org/10.3354/cr01297>

- Serrão, E. A. de O., Silva, M. T., de Sousa, F. de A. S., de Lima, A. M. M., Dos Santos, C. A., de Ataíde, L. C. P., & da Silva, V. de P. R. (2019). Four decades of hydrological process simulation of the Itacaiúncas River Watershed, Southeast Amazon. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 25(3), 0–3. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000300018>
- SIAP, (2018). Avance de Siembras y Cosechas Resumen por estado. 10/03/2019, de SADER Sitio web: [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/ResumenProducto.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do) (acceso 20/11/2019).
- Tan, M. L., Gassman, P., Yang, X., & Haywood, J. (2020). A Review of SWAT Applications, Performance and Future Needs for Simulation of Hydro-Climatic Extremes. *Advances in Water Resources*, 103662. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103662>
- Velázquez-Zapata, J. A., Troin, M., & Dávila-Ortiz, R. (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos de una cuenca del centro de México con base en un ensamble de modelos climáticos y en el modelo hidrológico SWAT. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(3), 341–351. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.030>
- Vu, M. T., Raghavan, V. S., & Liang, S. Y. (2015). Ensemble Climate Projection for Hydro-Meteorological Drought over a river basin in Central Highland, Vietnam. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(2), 427–433. <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0506-x>
- Waseem, M., Mani, N., Andiego, G., & Usman, M. (2017). A review of criteria of fit for hydrological models. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(11), 1765–1772. [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- Yasir, M., Hu, T., & Hakeem, S. A. (2020). Simulating reservoir induced lhasa streamflow variability using ArcSWAT. *Water (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/w12051370>
- Zhang, X., Xu, Y. P., & Fu, G. (2014). Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change. *Journal of Hydrology*, 515, 205–222. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.064>

1 **CAPÍTULO III. APLICACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT COMO**  
2 **HERRAMIENTA DE GESTIÓN EN LA CUENCA DEL RIO YAQUI ANTE EL**  
3 **CAMBIO CLIMÁTICO**

4 Alejandro Cruz-González<sup>1</sup>; Ignacio Sánchez-Cohen<sup>2\*</sup>; Maritza Argelia Macías-  
5 Corral<sup>3</sup>; Miguel A. Velásquez Valle<sup>2</sup>; Trejo Ricardo Trejo-Calzada<sup>1</sup>

6 <sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria Zonas Áridas.  
7 Dom. Conocido, Bermejillo, Durango.

8 <sup>2</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Centro  
9 Nacional de Investigación. Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta  
10 Atmósfera. Canal Sacramento km. 6.5, Gómez Palacio Durango. C.P. 35140. Tel:  
11 (871) 1490105.

12 <sup>3</sup>Universidad Autónoma de Coahuila. Av. Morelos 900 Oriente, Primero de Cobián  
13 Centro. Torreón, Coahuila. México. C.P. 27000

14 Correo-e: sanchez.ignacio@inifap.gob.mx (\*Autor para correspondencia)

15 **Revista: Chapingo Serie Zonas Áridas**

16 **RESUMEN**

17 Los impactos del cambio climático son cada vez más evidentes a nivel global.  
18 Actualmente este fenómeno amenaza con la seguridad hídrica de la población y sus  
19 actividades económicas, por lo que se considera fundamental la generación de  
20 conocimiento climático para su pronta gestión. El presente estudio se centró en  
21 analizar el comportamiento del flujo superficial en la cuenca del Río Yaqui debido al  
22 cambio climático. Mediante el modelo de circulación general HadGEM2-ES, se  
23 proyectaron Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) con las cuales  
24 se forzó el modelo SWAT simulando el flujo superficial durante los períodos 2021-

25 2040, 2041-2060 y 2061-2080. El modelo se trabajó en las tres subcuencas que  
26 alimentan al río; en La Angostura, se espera un cambio de -67% para el periodo  
27 2021-2040 (RCP2.6) y un aumento de 60% durante el periodo 2041-2060 (RCP  
28 8.5); para El Novillo, se predice una disminución de -65% para el periodo 2061-2080  
29 (RCP4.5) y un aumento de 42% durante el periodo 2061-2080 (RCP2.6) y para El  
30 Oviachic se pronostica una disminución de -63% para el periodo 2041-2060  
31 (RCP2.6 y 4.5) y un aumento de 47% en el periodo 2041-2060 (RCP4.5). A partir  
32 de estos resultados se podrían realizar prácticas de mitigación y adaptación en el  
33 sector agrícola.

34 **Palabras clave:** Cuenca del Río Yaqui, cambio climático, SWAT, RCP, flujo  
35 superficial.

## 36 **ABSTRACT**

37 The global impacts of climate change are markendly increasing. Currently, this  
38 phenomenon threatens the water security of the population and its economic  
39 activities. Therefore the generation of climate knowledge is considered essential for  
40 its prompt management and mitigation. The present study focused on analyzing the  
41 behavior of surface flow in the Yaqui River basin due to climate change. Using the  
42 HadGEM2-ES general circulation model, Representative Concentration Trajectories  
43 (RCP) were projected with which the SWAT model was forced to simulate surface  
44 flow during the 2021-2040, 2041-2060 and 2061-2080 periods. The model was  
45 worked on in the three sub-basins that feed the river; in Angostura, a change of -  
46 67% is expected for the period 2021-2040 (RCP2.6) and an increase of 60% during  
47 the period 2041-2060 (RCP 8.5); for El Novillo, a decrease of -65% is predicted for

48 the period 2061-2080 (RCP4.5) and an increase of 42% during the period 2061-  
49 2080 (RCP2.6) and for El Oviachic a decrease of - 63% for the 2041-2060 period  
50 (RCP2.6 and 4.5) and an increase of 47% in the 2041-2060 period (RCP4.5). Based  
51 on these results, mitigation and adaptation practices could be carried out in the  
52 agricultural sector.

53 **Keywords:** Yaqui River Basin, climate change, SWAT, RCP, surface flow.

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

### 3.1. INTRODUCCIÓN

64

65 El clima en el planeta ha presentado cambios significativos a consecuencia del  
66 calentamiento global (IPCC, 2019). Este fenómeno se agrava a partir de las  
67 actividades antropogénicas y la modificación del entorno natural; dichas  
68 alteraciones climáticas, han sido mayormente pronunciadas en las últimas décadas  
69 (Boru et al., 2019; IPCC, 2014). Se espera que el incremento de la temperatura  
70 media global con mayor probabilidad para fines del siglo XXI sea de 1.7 °C en el  
71 escenario de emisiones más bajas o de 4.8 °C en el escenario de emisiones más  
72 altas. Asimismo, con la proyección de la precipitación se observan cambios  
73 importantes en los patrones de distribución, esperando fenómenos meteorológicos  
74 con mayor intensidad y frecuencia (IPCC, 2014).

75 Con el aumento de la temperatura y precipitación, se pronostica en la cuenca de  
76 estudio un aumento del caudal del Río Yaqui, provocando posibles inundaciones  
77 durante el periodo húmedo y sequías prolongadas durante el periodo seco (Sánchez  
78 et al., 2020). En esta cuenca, históricamente la presión y uso consultivo ha  
79 aumentado con el paso del tiempo; aunado a esto, la mala gestión y la desigual  
80 distribución del agua, ha vuelto este recurso cada vez más escaso e inaccesible  
81 (Mounir et al., 2019; Padilla Calderón, 2017).

82 Lo anterior representa una amenaza para la seguridad hídrica y plantea desafíos  
83 para lograr la sostenibilidad de las actividades humanas, principalmente en la  
84 industria agroalimentaria (Chen et al., 2019; López & Hernández, 2016). Es en esta  
85 región del noreste mexicano en donde se presentan las condiciones naturales más  
86 estresantes para la producción de cultivos. El problema de la aridez se agrava por

87 el cambio climático global, el comportamiento errático del clima y el cambio de uso  
88 de suelo, factores que aceleran la tasa de desertificación (Flores Ortiz, 2016). Estas  
89 condiciones requieren de escenarios de modelación precisos, dada la vulnerabilidad  
90 del sector agrícola a su dependencia de los recursos hídricos, lo cual define por  
91 mucho el potencial productivo de las especies cultivadas (Sánchez et al., 2013). En  
92 este contexto, cuando se considera a la cuenca hidrológica como unidad base de  
93 planeación en las cadenas productivas, es necesario caracterizar el aspecto  
94 hidrológico de la misma (Sánchez-Cohen et al., 2015).

95 Los modelos hidrológicos son herramientas poderosas para simular el efecto de los  
96 procesos y planificación del recurso hídrico, para cumplir con sus diferentes usos  
97 consultivos y necesidades ecológicas dentro de la misma unidad (Gholami et al.,  
98 2016). Una opción para gestionar y planificar en la cuenca hidrográfica es la  
99 herramienta de evaluación suelo y agua SWAT, un modelo hidrológico semi-  
100 distribuido, de tiempo continuo y basado en procesos, el cual es considerado una  
101 potente herramienta de evaluación de los efectos del manejo del suelo y del agua a  
102 nivel subcuenca (Arnold et al., 2012; Luo et al., 2011; Gassman et al., 2007). Por lo  
103 tanto, tiene la capacidad de estudiar y predecir tanto los impactos temporales de las  
104 perturbaciones antropogénicas como los producidos por el cambio climático global.

105 En esta investigación se presenta la modelación en SWAT para la cuenca del Río  
106 Yaqui, con el fin de proporcionar una representación del flujo superficial ante  
107 escenarios de cambio climático.

## 3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.2.1. Zona de estudio

El sitio de estudio se enfoca en la cuenca del Río Yaqui, perteneciente a la Región Hidrológica número 9, ubicada en la porción central del estado de Sonora, México, la cual drena al río con el mismo nombre, considerado como el más grande en el noroeste de México (CNA, 2018). Este río tiene su origen en el sur de Arizona E.U.A y desemboca en el Océano Pacífico, formando un delta costero que se aprovecha como área agrícola en diferentes municipios del sur de Sonora, lo que se conoce hoy en día como “Valle del Yaqui” (Padilla Calderón, 2017; Enríquez y Durán, 2017), Basado en 32 años de datos meteorológicos (1972-2003), como se observa en la Figura 3, la precipitación promedio anual es de 609 mm, presentándose durante los meses junio a octubre; la temperatura media anual es de 16.8 °C, mientras que la temperatura máxima anual es de 33 °C y la temperatura mínima anual es de -0 °C (CICESE, 2020). El clima se puede considerar de semiárido a árido (Mounir et al., 2019).

La cuenca del Río Yaqui se compone en tres subcuencas hidrológicas (Figura 4), las cuales constituyen las áreas de captación a los embalses La Angostura, El Novillo y El Oviáchic (Mounir et al., 2019), por lo que, en este estudio, se realiza la modelación del escurrimiento superficial para cada subcuenca.

### 3.2.2. Procesamiento de los insumos de entrada

La herramienta de evaluación de suelos y agua (SWAT) desarrollada por Arnold et al. (1998) y Neitsch et al. (2011), se ha utilizado para la modelación hidrológica en la cuenca del Río Yaqui, la variable empleada es el escurrimiento superficial, la



131 escala temporal de esta información es mensual. En la Figura 5 se describe a detalle  
132 este proceso, el cual aborda aspectos sobre los insumos del modelo, calibración y  
133 validación, así como el forzamiento ante escenarios de cambio climático.

134 Arnold et al. (2012) reportan los diferentes insumos digitales que alimentan al  
135 modelo hidrológico SWAT para realizar la simulación, por lo que es necesario tener  
136 un orden y referencia en éstos en cuanto a su escala, coordenadas y unidades de  
137 medida. Para ello, se contó con información muy precisa y actualizada como se  
138 detalla en la Tabla 4.

### 139 **3.2.3. Aplicación del modelo y parametrización**

140 Para este estudio se utilizó la interfaz QSWAT 2012 para software libre QGIS 2.6.1,  
141 en el cual se permitió realizar la aplicación y parametrización del modelo hidrológico.  
142 Los insumos fueron procesados al tamaño de la cuenca del Río Yaqui a partir de un  
143 polígono oficial proporcionado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) al  
144 cual se le asignó el sistema de coordenadas Datum WGS84, proyección UTM zona  
145 12. El programa determinó la red de drenaje y las subcuencas que componen a la  
146 cuenca hidrográfica. Se estableció un punto de salida en cada presa ya que cada  
147 una es reguladora del escurrimiento aguas arriba. Al mismo tiempo, se crearon para  
148 cada subcuenca unidades de respuesta hidrológica (HRU) las cuales presentan  
149 homogeneidad en cuanto a sus características físicas como tipo de suelo,  
150 vegetación y topografía. En este contexto, cada HRU tendrá en su matriz variables  
151 diferentes que influirán en la modelación (Luo et al., 2011).

152 Al correr el modelo es necesario indicar el periodo de simulación; para el caso en  
153 estudio, se utilizó un conjunto de datos meteorológicos de 34 años (1970-2003),

154 reportados diariamente, los cuales se emplearon para el calentamiento (1970-  
155 1971), calibración (1972-1993) y validación (1994-2003). El periodo de  
156 calentamiento es necesario al inicio del modelo ya que éste tiende a presentar gran  
157 incertidumbre debido a que no conoce las condiciones iniciales de simulación  
158 (Daggupati et al. 2015).

#### 159 **3.2.4. Calibración y validación**

160 La calibración consiste en el proceso de estimar los parámetros de un modelo  
161 hidrológico y comparar los datos generados contra los datos observados (Moriassi et  
162 al., 2007). Para tal efecto se utilizó el software SWAT-CUP 2019 (Calibration and  
163 Uncertainty Programs), siguiendo el protocolo de calibración automatizada  
164 recomendado por Arnold et al. (2012) y Abbaspour et al. (2015), en el cual se  
165 menciona que la parametrización correcta es un paso importante en el modelo de  
166 calibración y debe basarse en el conocimiento de los procesos hidrológicos y  
167 variabilidad del suelo, uso de la tierra, la pendiente y la ubicación de la subcuenca.

168 Se seleccionó el algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2), con el objetivo  
169 de ajustar los parámetros de la modelación, a partir de la disponibilidad de  
170 parámetros relacionados con el modelado del balance hídrico. Ejecutando entre  
171 varios coeficientes de evaluación permitidos el Nash-Sutcliffe (NSE). Para cada  
172 subcuenca, se ejecutaron 1,500 simulaciones, las cuales fueron divididas en tres  
173 periodos de iteraciones de 500 simulaciones cada una, reajustando manualmente  
174 los parámetros después de cada iteración (Montecelos-Zamora et al., 2018).

175 Los parámetros de sensibilidad que se utilizaron en el proceso de calibración (Tabla  
176 5), representan los procesos de escorrentía superficial en la subcuenca hidrográfica

177 (Norman et al., 2019; Norman & Niraula, 2016; Niraula et al., 2015; Niraula et al.,  
178 2012 y Veith et al., 2010).

### 179 **3.2.5. Evaluación del modelo**

180 Para evaluar el rendimiento del modelo hidrológico se emplean métodos  
181 estadísticos comunes en las aplicaciones hidrológicas, ello con la finalidad de  
182 obtener el grado de semejanza entre los datos observados y los generados. En el  
183 presente estudio, se empleó el Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el cual describe  
184 la proporción de la varianza en los datos observados y simulados.  $R^2$  varía de 0 a 1  
185 y se consideran aceptables valores mayores a 0.5. La Correlación de Pearson (R)  
186 presenta variaciones de 0 a 1 (Ecuación 1), donde 0 indica que no hay correlación  
187 y 1 representa una correlación perfecta (Abbaspour et al., 2015; Arnold et al., 2012;  
188 Moriasi et al., 2007).

#### 189 **Ecuación 1. Correlación de Pearson.**

$$190 \quad R = \frac{[\sum(O - \bar{O})(S - \bar{S})]^2}{[\sum(O - \bar{O})^2][\sum(S - \bar{S})^2]} \quad (1)$$

191 Donde O (valores observados) y S (valores simulados).

192 De igual manera se evaluó con el coeficiente de Eficiencia de Nash-Suttcliffe (NSE),  
193 el cual varía de  $-\infty$  a 1. Los valores entre 0 y 1 indican una buena predicción por  
194 parte del modelo sobre los valores observados. Moriasi et al. (2007) clasifican el  
195 NSE: < 0.2 insuficiente, 0.2 - 0.4 satisfactorio, 0.4 - 0.6 bueno, 0.6 - 0.8 muy bueno  
196 y >0.8 excelente (Ecuación 2).

#### 197 **Ecuación 2. Eficiencia de Nash-Suttcliffe.**

198 
$$NSE = 1 - \frac{\sum(O - S)^2}{\sum(O - \bar{O})^2} \quad (2)$$

199 Y como último indicador estadístico se consideró el Sesgo Porcentual (PBIAS) como  
200 medida cuantitativa, la cual evalúa si los valores simulados por el modelo fueron  
201 mayores o menores que los valores observados en el punto de aforo (Ecuación 3).  
202 El valor óptimo es el 0, con valores cercanos a cero representan simulaciones con  
203 errores mínimos en el balance de masa, y un valor positivo de PBIAS indica que el  
204 modelo está subestimando los valores medidos, mientras que un valor negativo  
205 indica que el modelo sobreestima lo medido en el punto de aforo (Abbaspour et al.,  
206 2015; Moriasi et al., 2007).

207 **Ecuación 3. Sesgo Porcentual.**

208 
$$PBIAS (\%) = \frac{\sum S - \sum O}{\sum O} * 100 \quad (3)$$

### 209 **3.2.6. Escenarios de cambio climático**

210 Con la propuesta de forzar el modelo SWAT ante escenarios de cambio climático,  
211 se generaron mediante la interfaz de LARS-WG 6.0, la cual incorpora predicciones  
212 de 18 modelos climáticos globales del conjunto CMIP5 (Proyecto de  
213 intercomparación de modelos fase 5), utilizadas en el Quinto Informe de Evaluación  
214 del IPCC (Semenov & Stratonovitch, 2010; Semenov & Stratonovitch, 2015). Se  
215 utilizó el modelo HadGEM2-ES para proyectar las trayectorias de concentración  
216 representativas (RCP 2.6, 4.5 y 8.5) a escala local, durante tres periodos de tiempo  
217 2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080 (IPCC, 2014).

### 3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

218

#### 3.3.1. Calibración y validación

219

220 Los resultados obtenidos en las tres subcuencas (La Angostura, El Novillo y El  
221 Oviachic), muestran que los parámetros estadísticos de rendimiento para la  
222 calibración y validación de los modelos están en rangos bastante aceptables ( $>0.5$ ),  
223 de acuerdo con los criterios de rendimiento analizados por Abbaspour et al. (2015)  
224 y Moriasi et al. (2007). Así, los parámetros estadísticos prueban que existe una  
225 buena relación entre el flujo observado y simulado, después de ajustar los  
226 parámetros más sensibles del modelo, asumiendo las incertidumbres resaltadas por  
227 Arnold et al. (2012). Con respecto a la evaluación del modelo hidrológico, se  
228 obtuvieron los resultados que se presentan en el Tabla 6 de acuerdo con el periodo  
229 de calibración y validación, respectivamente.

230 Como se observa en la Figura 6, los hidrogramas de calibración y validación para  
231 las tres subcuencas muestran que el flujo observado está ligeramente por encima  
232 de las estimaciones simuladas, y en algunos eventos es lo contrario. Júnior &  
233 Montenegro, (2019), observaron que estas diferencias son resultado de los  
234 principales eventos de precipitación y que preceden a los impulsos de flujo  
235 superficial, porque la cuencas con régimen árido son intermitentes en los meses  
236 húmedos y suelen presentar eventos de flujos efímeros en los meses secos, cuando  
237 hay periodos con escurrimiento igual a cero.

238 El rendimiento del modelo también se verificó a partir de un gráfico de línea de  
239 regresión y una función de identidad (1:1), comparando el flujo simulado contra el  
240 flujo observado para los dos periodos calibración y validación, ubicando la línea de

241 identidad como referencia para observar la tendencia de los puntos de dispersión.  
242 Como se puede observar en la Figura 7a y 7b, la línea de regresión se encuentra  
243 por debajo de la línea de identidad, con lo que se verifica que el modelo subestima  
244 los datos observados en las subcuencas La Angostura y El Novillo, mientras que en  
245 la subcuenca El Oviachic la línea de regresión se encuentra por encima a la línea  
246 de identidad, por lo que se evidencia que el modelo sobrestima los datos  
247 observados en ambos periodos (Figura 7c).

248 Es evidente que durante algunos años en la simulación utilizando SWAT ocurrieron  
249 algunos fenómenos extremos en la subcuenca en los cuales el modelo no obtuvo  
250 una buena respuesta de simulación, bajo esta circunstancia, Serrão et al. (2019),  
251 menciona que el modelo no reproduce con precisión algunos periodos de flujo,  
252 principalmente los resultantes de fenómenos atípicos.

### 253 **3.3.2. Escenarios de cambio climático**

254 En la subcuenca La Angostura, el flujo superficial y la precipitación mantuvieron una  
255 relación lineal (Figura 8a), con  $R^2= 0.80$  (RCP 2.6),  $R^2= 0.73$  (RCP 4.5) y  $R^2= 0.66$   
256 (RCP 8.5); se puede observar que el escurrimiento presenta una disminución en el  
257 escenario con RCP 8.5. Para la subcuenca del Novillo  $R^2= 0.78$  (RCP 2.6),  $R^2= 0.79$   
258 (RCP 4.5) y  $R^2= 0.73$  (RCP 8.5), mostrándose una reducción de la escorrentía en  
259 este último nivel de forzamiento (Figura 8b). Finalmente, para la subcuenca del  
260 Oviachic se obtuvo  $R^2= 0.69$  (RCP 2.6),  $R^2= 0.68$  (RCP 4.5) y  $R^2= 0.65$  (RCP 8.5),  
261 pudiéndose observar una disminución de estos factores en el escenario 8.5 (Figura  
262 8c).

### 263 **3.3.3. Porcentaje de cambio en el escurrimiento superficial**

264 Para las tres subcuencas en estudio se presentan cambios en el escurrimiento muy  
265 importantes; en la subcuenca La Angostura, considerando el promedio anual, el  
266 cambio negativo con mayor impacto es de -67% para el periodo 2021-2040 (RCP  
267 2.6) y se espera un aumento de 60% durante el periodo 2041-2060 (RCP 8.5),  
268 mientras que para la subcuenca El Novillo se predice una disminución promedio  
269 anual de hasta -65% para el periodo 2061-2080 (RCP 4.5) y un aumento de 42%  
270 durante el periodo 2061-2080 (RCP 2.6) y finalmente, en la subcuenca El Oviachic  
271 se espera una disminución de flujo de hasta -63% para el periodo 2041-2060 (RCP  
272 2.6 y 4.5) y un aumento de 47% en el periodo 2041-2060 (RCP 4.5).

273 Estos resultados contrastan con lo observado por Boru et al. (2019), al identificar un  
274 cambio porcentual en el caudal del Río Nilo, entre -24.3 y +49.5% (Periodo 2021-  
275 2040), y -29 a +20% (Periodo 2081-2100) para escenarios RCP 4.5. Del mismo  
276 modo, el cambio proyectado en el caudal es entre -18 y 31.9% (Periodo 2021-2040)  
277 y -33% a 22.3% (Periodo 2081-2100) para RCP 8.5.

278 Como se observa en la Tabla 7, en las tres subcuencas la disminución porcentual  
279 del flujo es mayor que el aumento de éste. Se espera un periodo seco más  
280 prolongado, afectando el escurrimiento superficial, la subcuenca más afectada es  
281 El Oviachic, seguido de La Angostura y El Novillo como lo menciona Sánchez et al.  
282 (2020). Además Chen et al. (2017), menciona que la frecuencia de ocurrencia y la  
283 fuerza de las sequías en la estación seca aumentará por el calentamiento global,  
284 mientras que las inundaciones en la estación húmeda tienden a aumentar.

285 El uso del modelo SWAT para predecir los posibles impactos producidos por el  
286 cambio climático hacia los recursos hídricos, se ha recomendado como apoyo para  
287 la toma de decisiones en diferentes partes del mundo (Abbaspour et al., 2015). Por  
288 lo cual se considera una herramienta importante para la predicción de posibles  
289 escenarios futuros en la cuenca del Río Yaqui.

### 290 **3.4. CONCLUSIONES**

291 Fue posible implementar el modelo hidrológico SWAT para identificar cambios  
292 futuros en el escurrimiento superficial de la cuenca del Río Yaqui. Con base en los  
293 indicadores estadísticos o índices de eficiencia, se considera que la capacidad  
294 predictiva del modelo como buena y satisfactoria. El escenario con mayor impacto  
295 en la subcuenca La Angostura es el RCP8.5, para el periodo 2041-2060, con un  
296 cambio de -57% y 60%. Para el Novillo, el mayor cambio se presenta en el periodo  
297 2061-2080 durante el forzamiento RCP4.5, presentando cambios de -65% y 34%  
298 mientras que para el Oviachic el mayor cambio de escurrimiento se presenta en el  
299 periodo 2041-60 RCP4.5 con -63% y 47%.

300 El modelo SWAT proporciona un medio efectivo para evaluar la hidrología de la  
301 cuenca del Río Yaqui de forma espacial y temporal. Específicamente, permite  
302 conocer la variabilidad el escurrimiento superficial del cual dependen los grandes  
303 embalses que contienen el recurso hídrico para el Distrito de Riego 41. Con los  
304 datos obtenidos en este modelo, se pueden generar estrategias de adaptación y  
305 mitigación para mejorar el uso eficiente del agua que se obtiene en la cuenca y  
306 proponer alternativas de manejo sustentable con el uso de suelo y vegetación a  
307 largo plazo.



**3.5. REFERENCIAS**

- 309 Abbaspour, K. C., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & Kløve,  
310 B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe:  
311 Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of*  
312 *Hydrology*, 524, 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- 313 Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J.,  
314 Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., Van Liew, M. W.,  
315 Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation.  
316 *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508.
- 317 Arnold, J. G., Moriasi, N. D., Gassman, W. P., Abbaspour, C. K., & White, J. M.  
318 (2012). Model use, calibration, and validation. *Biological Systems Engineering:*  
319 *Papers and Publications*, 406.
- 320 Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area  
321 hydrologic Modeling and Assessment part I: Model development. *Journal of the*  
322 *American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
- 323 Boru, G. F., Gonfa, Z. B., & Diga, G. M. (2019). Impacts of climate change on stream  
324 flow and water availability in Anger sub-basin, Nile Basin of Ethiopia. *Sustainable*  
325 *Water Resources Management*, 5(4), 1755–1764. [https://doi.org/10.1007/s40899-](https://doi.org/10.1007/s40899-019-00327-0)  
326 [019-00327-0](https://doi.org/10.1007/s40899-019-00327-0)
- 327 Chen, J., Gao, C., Zeng, X., Xiong, M., Wang, Y., Jing, C., Krysanova, V., Huang,  
328 J., Zhao, N., & Su, B. (2017). Assessing changes of river discharge under global  
329 warming of 1.5 °C and 2 °C in the upper reaches of the Yangtze River Basin:  
330 Approach by using multiple- GCMs and hydrological models. *Quaternary*  
331 *International*, 453, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.01.017>
- 332 Chen, Q., Chen, H., Wang, J., Zhao, Y., Chen, J., & Xu, C. (2019). Impacts of climate  
333 change and land-use change on hydrological extremes in the Jinsha River Basin.  
334 *Water (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/w11071398>
- 335 Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

336 2020. Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM). [http://clicom-](http://clicom-mex.cicese.mx/)  
337 [mex.cicese.mx/](http://clicom-mex.cicese.mx/) (15 de julio 2020).

338 CNA. Comisión Nacional del Agua. 2018. Estadísticas del agua en México.  
339 (Statistics of water in Mexico). Disponible en:  
340 [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf) (acceso 2 de Abril 2020).

341 Daggupati, P., Pai, N., Ale, S., Douglas-Mankin, K. R., Zeckoski, R. W., & .IJeong,  
342 J. (2015). A recommended calibration and validation strategy for hydrologic and  
343 water quality models. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1705-1719. [https://](https://doi.org/10.13031/trans.58.10712)  
344 [doi.org/10.13031/trans.58.10712](https://doi.org/10.13031/trans.58.10712)

345 Enríquez Licón, D. E., & Lorenzana Durán, G. (2017). Las grandes presas en el Río  
346 Yaqui (Sonora, México) y sus efectos socio-ambientales. *Revista de Sociología y*  
347 *Antropología*, 19(1), 165–188. <https://doi.org/10.17151/rasv.2017.19.1.9>

348 Flores Ortiz, C. M. (2016). Zonas Áridas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(1), 7–8.  
349 <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/39->  
350 [1/reunion\\_zonas\\_aridas.pdf](https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/39-1/reunion_zonas_aridas.pdf)

351 Gholami, A., Habibnejad Roshan, M., Shahedi, K., Vafakhah, M., & Solaymani, K.  
352 (2016). Hydrological stream flow modeling in the Talar catchment (central section of  
353 the Alborz Mountains, north of Iran): Parameterization and uncertainty analysis using  
354 SWAT-CUP. *Journal of Water and Land Development*, 30(1), 57–69.  
355 <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0022>

356 IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. In *Contribución de los*  
357 *Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo*  
358 *Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.

359 IPCC. (2019). Calentamiento Global de 1,5 °C. In *Intergovernmental Panel on*  
360 *Climate Change*.

361 Júnior, R. F., & Montenegro, A. (2019). Impact of land use change on the water  
362 balance in a representative watershed in the Semiarid of the State of Pernambuco  
363 using the Swat Model. *Engenharia Agrícola*, 39(1), 110–117.

364 <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n1p110-117/2019>

365

366 López, F. A. J. Hernández, C. D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión  
367 de la literatura con énfasis en América Latina. *El Trimestre Económico*, LXXXIII  
368 (4(332), 459–496. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31347950001>

369 Luo, P., Takara, K., He, B., Cao, W., Yamashiki, Y., & Nover, D. (2011). Calibration  
370 and Uncertainty Analysis of Swat Model in a Japanese River Catchment. *Journal of*  
371 *Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 67(4), I\_61-I\_66.  
372 [https://doi.org/10.2208/jscejhe.67.i\\_61](https://doi.org/10.2208/jscejhe.67.i_61)

373 Montecelos-Zamora, Y., Cavazos, T., Kretzschmar, T., Vivoni, E. R., Corzo, G., &  
374 Molina-Navarro, E. (2018). Hydrological modeling of climate change impacts in a  
375 Tropical River Basin: A case study of the Cauto River, Cuba. *Water (Switzerland)*,  
376 10(9). <https://doi.org/10.3390/w10091135>

377 Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., & Veith,  
378 T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in  
379 watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*,  
380 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

381 Mounir, A., Che, D., Gonzalez-Parra, C., & Robles-Morua, A. (2019). Development  
382 of a Reservoir System Operation Model for Water Sustainability in the Yaqui River  
383 Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(9), 1–9.  
384 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001098](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001098)

385 Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. ., & Williams, J. (2011). Soil & Water Assessment  
386 Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute, 1–  
387 647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>

388 Niraula, R., Meixner, T., & Norman, L. M. (2015). Determining the importance of  
389 model calibration for forecasting absolute/relative changes in streamflow from LULC  
390 and climate changes. *Journal of Hydrology*, 522, 439–451.  
391 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.007>

392 Niraula, R., Norman, L. M., States, U., Survey, G., & Meixner, T. (2012). Air , Soil  
393 and Water Research Multi-gauge Calibration for modeling the Semi-Arid Santa Cruz  
394 Watershed in Arizona-Mexico Border Area Using SWAT. *Air, Soil and Water*  
395 *Research*, 5(2014), 41–57. <https://doi.org/10.4137/ASWR.S9410>

396 Norman, L. M., Callegary, J. B., Lacher, L., Wilson, N. R., Fandel, C., Forbes, B. T.,  
397 & Swetnam, T. (2019). Modeling riparian restoration impacts on the hydrologic cycle  
398 at the Babacomari Ranch, SE Arizona, USA. *Water (Switzerland)*, 11(2).  
399 <https://doi.org/10.3390/w11020381>

400 Norman, L. M., & Niraula, R. (2016). Model analysis of check dam impacts on long-  
401 term sediment and water budgets in Southeast Arizona, USA. *Ecohydrology and*  
402 *Hydrobiology*, 16(3), 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2015.12.001>

403 P. W. Gassman, M. R. Reyes, C. H. Green, & J. G. Arnold. (2007). The Soil and  
404 Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research  
405 Directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250.  
406 <https://doi.org/10.13031/2013.23637>

407 Padilla Calderón, E. (2017). Los yaquis y las crecientes del río. Una historia de  
408 control hidráulico del río Yaqui. *Revista Culturales*, 5(2), 67–106.  
409 <https://doi.org/10.22234/recu.20170502.e316>

410 Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M. A., Esquivel-Arriaga, G., Bueno-Hurtado,  
411 P., & Pedroza-Sandoval, A. (2015). Minimum hydrologic characterization for  
412 research in experimental watersheds with limited availability of information in arid  
413 lands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XIV(2), 185–208.  
414 <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2015.07.007>

415 Sánchez, I., Velásquez, M., Catalán, E., Inzunza, M. A., Esquivel, G., Bueno, P., &  
416 Díaz, G. (2013). Modelo de Balance Hídrico Como Apoyo a Toma de Decisiones en  
417 Zonas Agrícolas Bajo Incertidumbre Climática. In Folleto Técnico No. 28. INIFAP  
418 CENID RASPA. Gómez Palacio. Durango.

419 Sánchez, C. I., Macías-Corral, M, A, Esquivel, A. G., Cerano, P. J., Cabrera, C. F.,  
420 Borlaug, N., Inzunza, I. M, A., Díaz, P. G., & Guajardo, P. R, A. (2020). Rainfall

421 uncertainty and water availability: elements for planning water allocation to users in  
422 irrigation districts of Mexico. Study case Irrigation District 041 Yaqui River,  
423 *Atmósfera*. <https://doi.org/10.20937/ATM.52792>

424 Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from  
425 global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*,  
426 41(1), 1–14. <https://doi.org/10.3354/cr00836>

427 Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2015). Adapting wheat ideotypes for climate  
428 change: Accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Climate*  
429 *Research*, 65, 123–139. <https://doi.org/10.3354/cr01297>

430 Serrão, E. A. de O., Silva, M. T., de Sousa, F. de A. S., de Lima, A. M. M., Dos  
431 Santos, C. A., de Ataíde, L. C. P., & da Silva, V. de P. R. (2019). Four decades of  
432 hydrological process simulation of the itacaiúnas river watershed, Southeast  
433 Amazon. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 25(3), 0–3.  
434 <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000300018>

435 Veith, T. L., Liew, M. W. Van, Bosch, D. D., & Arnold, J. G. (2010). Usda-ars w.  
436 *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1477–1486.

437

438

439

440

441

442

443

444

445

446

447 **Tablas**448 **Tabla 4. Insumos para la modelación en SWAT en la Cuenca del Río Yaqui.**

Dato	Localización	Periodo de año	Agencia proveedora
Modelo digital de elevación	Río Yaqui	2019	INEGI (90 metros)
Edafología	Río Yaqui	1995	INIFAP y CONABIO (Serie VI)
Uso de suelo y vegetación	Río Yaqui	2016	INEGI (Serie I)
Datos climáticos	12 estaciones	1970 -2003	CICESE-CLICOM
Datos observados	3 estaciones	1964 - 2018	CONAGUA

449

450 **Tabla 5. Parámetros de calibración para la escorrentía superficial.**

			Min	Max
<b>CH_K2.rte</b>	Conductividad hidráulica efectiva en el canal principal	mm/hr	0.01	250
<b>CN2.mgt</b>	Valor de curva numérica	-	35	95
<b>SURLAG.bsn</b>	Superficie de escurrimiento en tiempo de retraso	días	0.05	10
<b>ESCO.bsn</b>	Factor de compensación de evaporación del suelo	-	0.01	0.95
<b>SOL_AWC.sol</b>	Capacidad de agua disponible en la capa de suelo	mm	0	1
<b>GW_REVAP.gw</b>	Coefficiente de renovación de agua subterránea	-	0.02	0.2
<b>GWQMN..gw</b>	Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial	mm	0	1000
<b>REVAPMN.wg</b>	Umbral de profundidad de agua en acuíferos poco profundos	mm	0	1
<b>ALPHA_BF.gw</b>	Flujo base de factor alfa	días	.048	.95
<b>GW_DELAY.gw</b>	Retraso del agua subterránea	días	0	31
<b>RCHRG_DP.gw</b>	Fracción de percolación de acuíferos profundos	-	0	1

451

452

453

454

455

456

457 **Tabla 6. Desempeño del modelo hidrológico, periodo de calibración y validación en las tres**  
 458 **subcuencas.**

<b>Subcuenca La Angostura</b>				
	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>NSE</b>	<b>PBIAS</b>
<i>Calibración</i>	0.85	0.72	0.69	-19.85
<i>Validación</i>	0.75	0.43	0.55	-0.54
<b>Subcuenca El Novillo</b>				
	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>NSE</b>	<b>PBIAS</b>
<i>Calibración</i>	0.8	0.63	0.59	-28.3
<i>Validación</i>	0.71	0.53	0.41	-20.3
<b>Subcuenca El Oviachic</b>				
	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>NSE</b>	<b>PBIAS</b>
<i>Calibración</i>	0.7	0.48	0.03	-37.8
<i>Validación</i>	0.53	0.32	-0.09	-32.9

459

460 **Tabla 7. Cambio porcentual anual en la disponibilidad total de escurrimiento en las tres**  
 461 **subcuencas bajo escenarios RCP.**

<b>Periodo</b>	<b>RCP</b>	<b>Cnc La Angostura</b>		<b>Cnc El novillo</b>		<b>Cnc El Oviachic</b>	
		<b>-</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>+</b>	<b>-</b>	<b>+</b>
<b>2021-2040</b>	2.6	-45	45	-32	35	-53	28
	4.5	-67	47	-49	40	-55	30
	8.5	-49	40	-24	40	-56	22
<b>2041-2060</b>	2.6	-51	54	-41	39	-63	23
	4.5	-57	53	-46	40	-63	47
	8.5	-57	60	-52	34	-46	34
<b>2061-2080</b>	2.6	-49	45	-28	42	-59	19
	4.5	-64	56	-65	34	-56	29
	8.5	-61	51	-53	39	-61	16

462

463

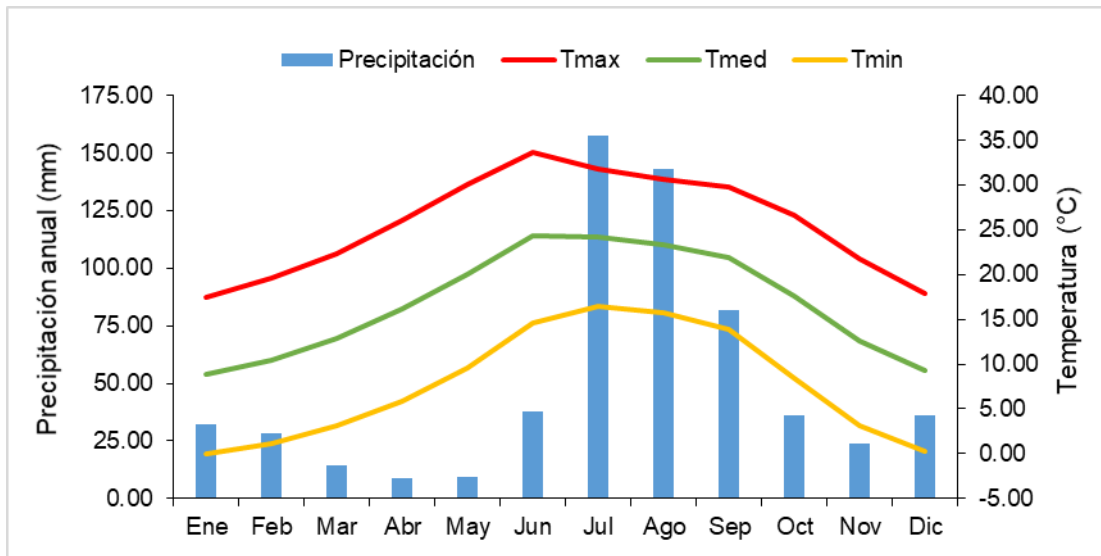
464

465

466

467

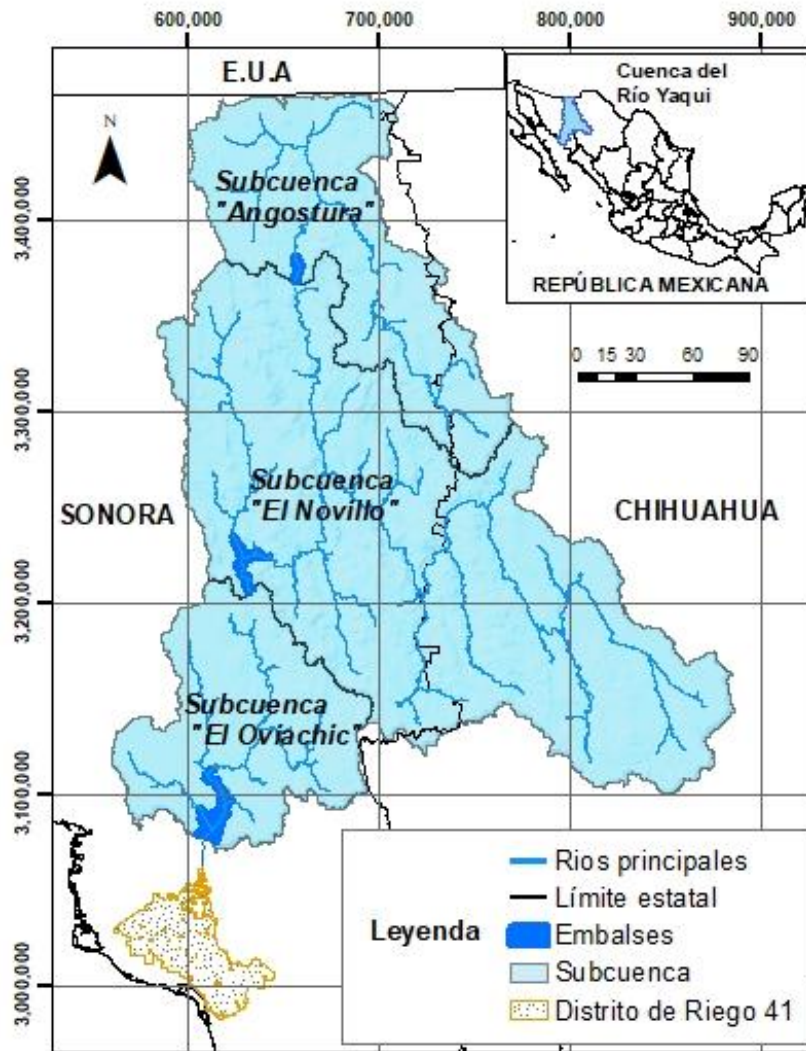
468 **Figuras**



469

470 **Figura 3. Climograma para la Cuenca del Río Yaqui.**

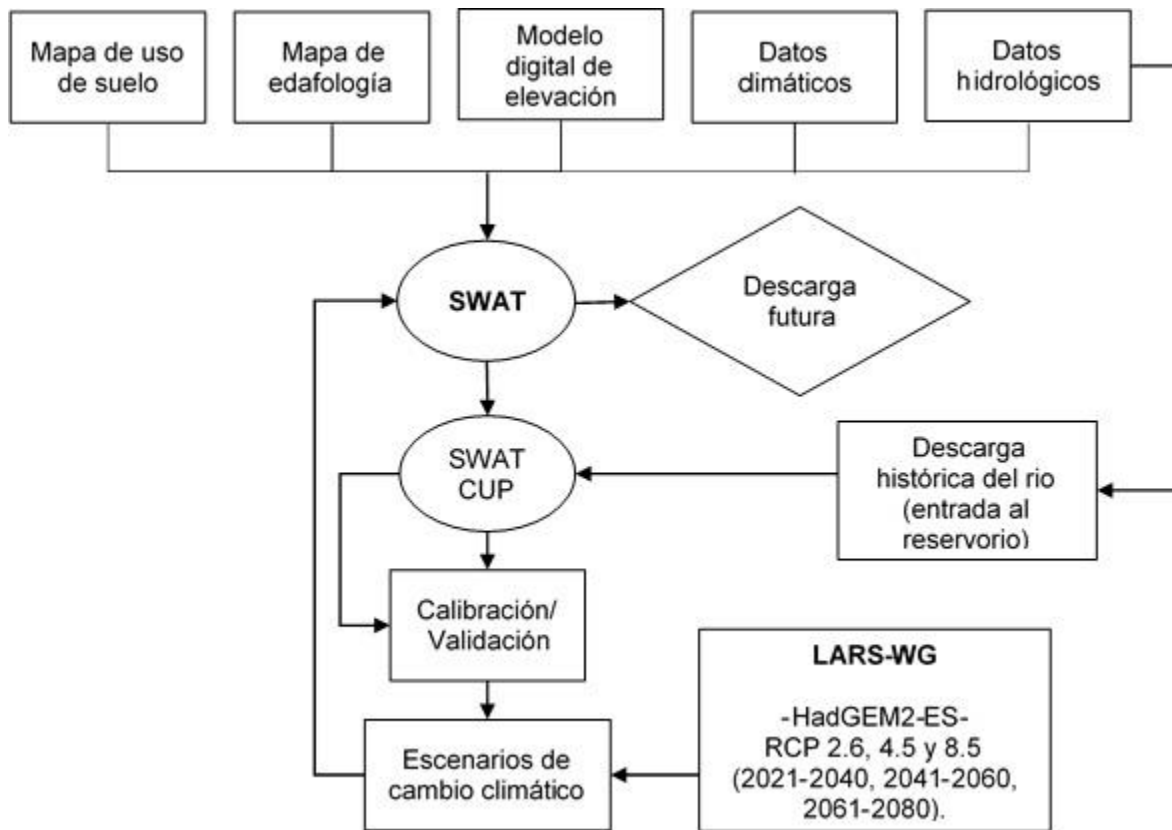




471

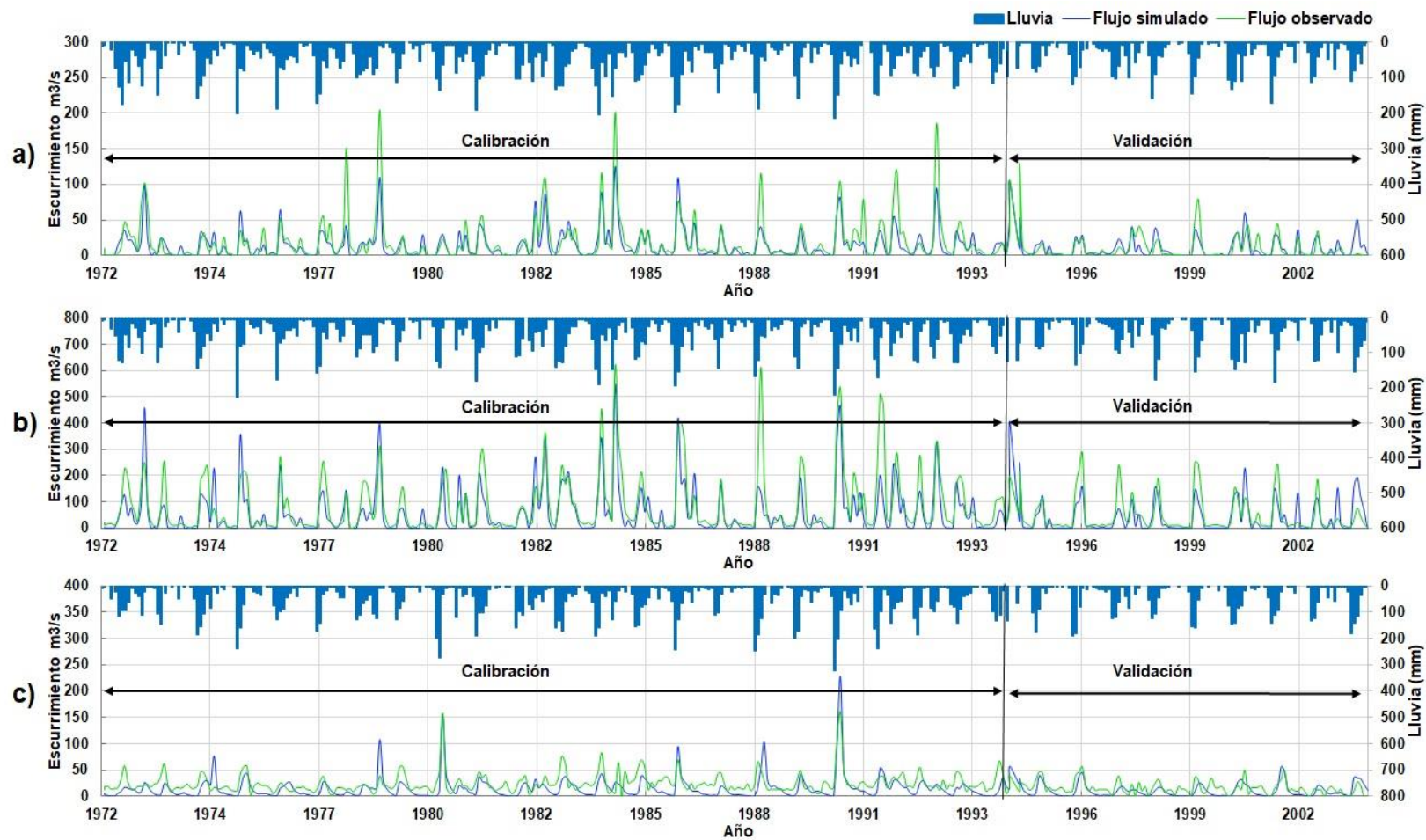
472 **Figura 4. Representación espacial subcuencas del Río Yaqui.**

473 .



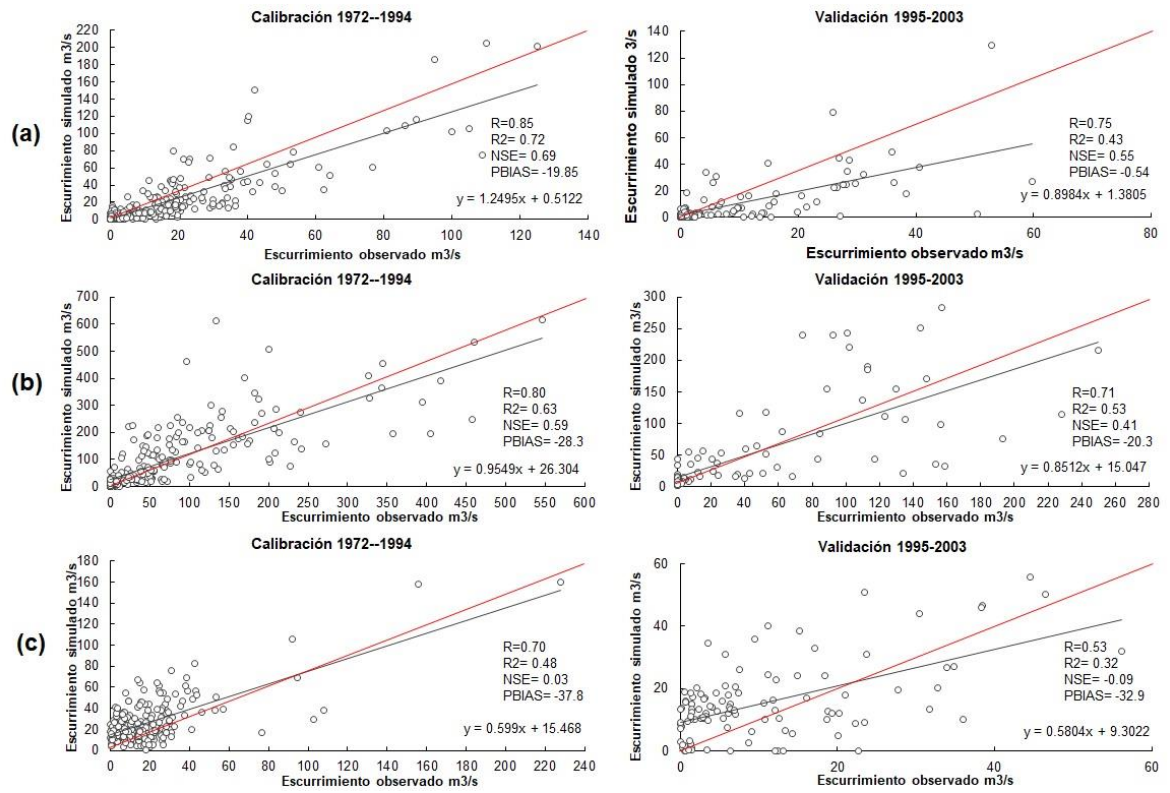
474

475 **Figura 5. Diagrama de flujo para la modelación hidrológica del Rio Yaqui.**



476

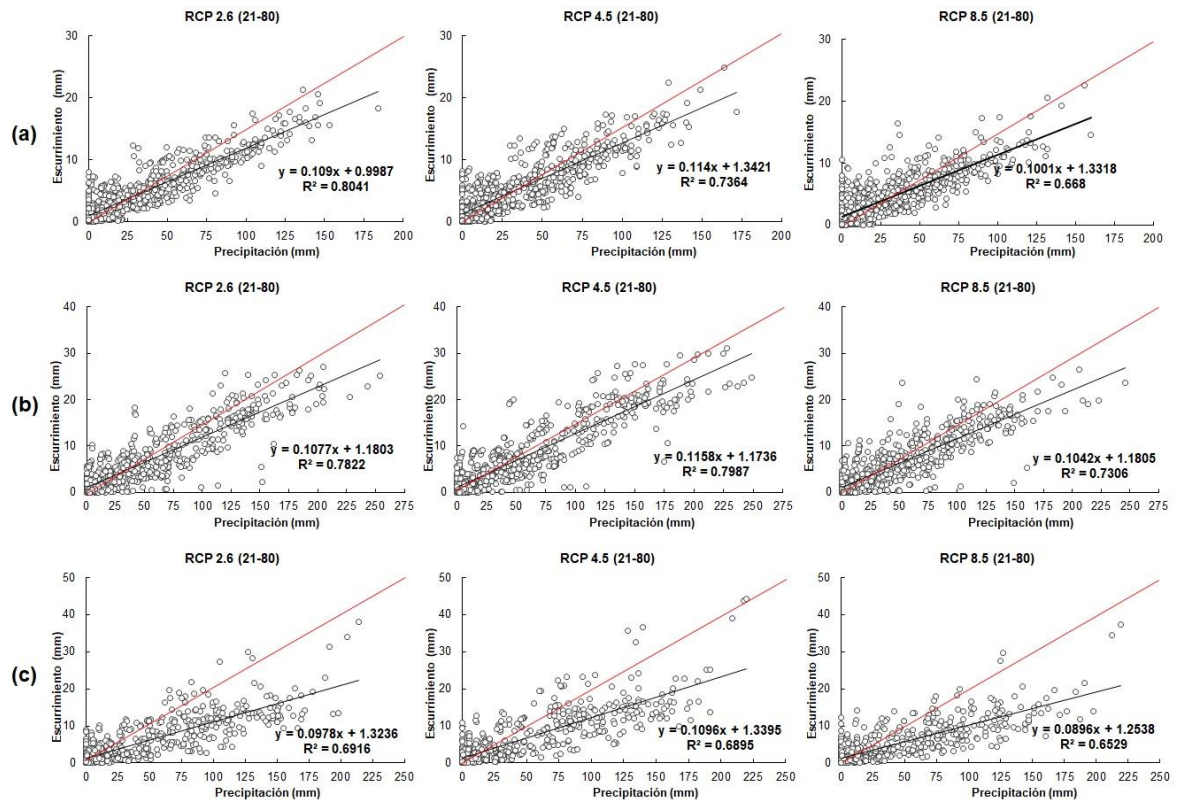
477 **Figura 6. Escorrimento observado vs simulado por SWAT para la calibración y validación, subcuencas La Angostura (a), El Novillo (b) y**  
 478 **El Oviachic (c).**



479

480 **Figura 7. Gráfica escalada del flujo observado y simulado para calibración y validación. La**  
 481 **Angostura (a), El Novillo (b) y El Oviachic (c).**

482



483

484 **Figura 8. Relación lineal del escurrimiento observado vs precipitación, subcuencas La**  
 485 **Angostura (a), El Novillo (b) y El Oviachic (c).**