

Hydrologic modeling to measure the impact of climate change in the Yaqui River basin

Modelación hidrológica para medir el impacto del cambio climático en la cuenca del río Yaqui

Alejandro Cruz-González¹; Ignacio Sánchez-Cohen^{2*}; Maritza Argelia Macías-Corral³; Miguel Agustín Velásquez-Valle²; Trejo Ricardo Trejo-Calzada¹

¹Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria Zonas Áridas. Carretera Gómez Palacio-Ciudad Juárez km 40, Bermejillo, Durango, C. P. 35230, MÉXICO.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Canal Sacramento km 6.5, Gómez Palacio, Durango, C. P. 35140, MÉXICO.

³Universidad Autónoma de Coahuila. Av. Morelos, núm. 900 Oriente, Primero de Cobián Centro, Torreón, Coahuila, C. P. 27000, MÉXICO.

*Corresponding author: ignacio_sanchezcohen@hotmail.com, tel. 871 149 93 36.

Abstract

Introduction: Changes in climate patterns threaten water security of the population and its economic activities.

Objective: To model and analyze the behavior of surface runoff in the Yaqui river basin under climate change scenarios.

Methodology: Representative concentration pathways (RCP) of three sub-basins (La Angostura, El Novillo and El Oviachic) were shown using hydrologic modeling with SWAT, where the simulated variable was surface runoff.

Results: A change in water availability of -67 % is expected in La Angostura for the period 2021-2040 (RCP2.6) and an increase of 60 % from 2041-2060 (RCP8.5), in El Novillo a decrease of 65 % is predicted for the period 2061-2080 (RCP4.5) and a 42 % increase from 2061-2080 (RCP2.6), and in El Oviachic a 63 % decrease is predicted for the period 2041-2060 (RCP2.6 and 4.5) and a 47 % increase from 2041-2060 (RCP4.5).

Limitations: Veracity and impact of basins studies depend on quality hydro-climatic information of unrestricted availability.

Originality: The impact of climate change on the availability of water for agricultural use in the Yaqui River basin was projected. In addition, there is a technological platform for planning processes.

Conclusions: The data collected can be used to generate adaptation and mitigation strategies for efficient water use in the basin and to propose long-term sustainable management alternatives.

Resumen

Introducción: Los cambios en los patrones climáticos amenazan la seguridad hídrica de la población y sus actividades económicas.

Objetivos: Modelar y analizar el comportamiento del escurrimiento superficial de la cuenca del río Yaqui ante escenarios de cambio climático.

Metodología: Se proyectaron trayectorias de concentración representativas (RCP) de tres subcuencas (La Angostura, El Novillo y El Oviachic) mediante la modelación hidrológica con SWAT, donde la variable simulada fue el escurrimiento superficial.

Resultados: En La Angostura se espera un cambio de disponibilidad de agua de -67 % para el periodo 2021-2040 (RCP2.6) y un aumento de 60 % de 2041-2060 (RCP8.5), en El Novillo se predice una disminución de 65 % para el periodo 2061-2080 (RCP4.5) y un incremento de 42 % de 2061-2080 (RCP2.6), y en El Oviachic se pronostica una disminución de 63 % para el periodo 2041-2060 (RCP2.6 y 4.5) y un aumento de 47 % de 2041-2060 (RCP4.5).

Limitaciones: La veracidad e impacto de los estudios de cuencas dependen de información hidroclimática de calidad y de disponibilidad irrestricta.

Originalidad: Se proyectó el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua para uso agrícola en la cuenca del río Yaqui. Además, se cuenta con una plataforma tecnológica para los procesos de planeación.

Conclusiones: Con los datos obtenidos se pueden generar estrategias de adaptación y mitigación para eficientar el uso del agua de la cuenca y proponer alternativas de manejo sustentable a largo plazo.

Keywords: SWAT model, RCP, surface runoff.

Palabras clave: modelo SWAT, RCP, escurrimiento superficial.



Introduction

In recent years, climate has shown changes in weather patterns as a result of global warming (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2019). Climate change phenomenon is aggravated by anthropogenic activities and modification of the natural environment; these climate changes and anomalies have been pronounced mostly in recent decades (Boru *et al.*, 2019; IPCC, 2014). In this sense, the global average temperature increase by the end of the 21st century is expected to be 1.7 °C in the scenario with lower emissions, or 4.8 °C in the scenario with higher emissions. Also, the projection of precipitation shows important changes in distribution patterns, so that meteorological phenomena with greater intensity and frequency are expected (IPCC, 2014).

With the increase in temperature and precipitation, a considerable increase in flow is predicted in the Yaqui River basin, which could lead to flooding during the wet season and prolonged droughts during the dry season (Sánchez-Cohen *et al.*, 2020). This basin has experienced an increase in population pressure and consumptive use; in addition, poor management and unequal distribution of water has made this resource increasingly scarce and inaccessible (Mounir *et al.*, 2019; Padilla-Calderón, 2017). This represents a threat to water security and poses challenges to achieve sustainability of human activities, mainly from the agri-food industry that sustains the Yaqui River basin (Chen *et al.*, 2019; López-Feldman & Hernández-Cortes, 2016).

The northeastern region of Mexico, where the Yaqui River basin is located, has stressful natural conditions for crop production. The problem of aridity becomes more critical due to climate change, erratic weather behavior, and land use change (Flores-Ortiz, 2016). Such conditions require accurate modeling scenarios due to the vulnerability of the agricultural sector towards water resources, which defines the productive potential of cultivated species (Sánchez-Cohen *et al.*, 2013). In this context, when considering the watershed as the base unit for planning production chains, it is necessary to characterize its hydrological aspect.

These conditions require accurate modeling scenarios due to the vulnerability of the agricultural sector to water resources, which defines the productive potential of cultivated species (Sánchez-Cohen *et al.*, 2013). In this context, when considering the basin as the base unit for planning production chains, it is necessary to characterize the hydrological aspect of the basin (Sánchez-Cohen *et al.*, 2015).

Hydrological models are powerful tools to simulate the effect of processes and to plan water resources to meet

Introducción

En los últimos años, el clima ha presentado cambios en los patrones meteorológicos a consecuencia del calentamiento global (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2019). El fenómeno de cambio climático se agrava a partir de las actividades antropogénicas y la modificación del entorno natural; estas alteraciones y anomalías climáticas han sido pronunciadas mayormente en las últimas décadas (Boru *et al.*, 2019; IPCC, 2014). En este sentido, se espera que el incremento de la temperatura media global para finales del siglo XXI sea de 1.7 °C en el escenario con emisiones más bajas, o de 4.8 °C en el escenario con mayores emisiones. Asimismo, en la proyección de la precipitación se observan cambios importantes en los patrones de distribución, por lo que se esperan fenómenos meteorológicos con mayor intensidad y frecuencia (IPCC, 2014).

Con el aumento de la temperatura y la precipitación, se pronostica un considerable aumento de caudal en la cuenca del río Yaqui, lo cual podría provocar inundaciones durante el periodo húmedo y sequías prolongadas durante el periodo seco (Sánchez-Cohen *et al.*, 2020). Históricamente, en esta cuenca han aumentado la presión demográfica y el uso consuntivo; aunado a esto, la mala gestión y distribución desigual del agua ha vuelto este recurso cada vez más escaso e inaccesible (Mounir *et al.*, 2019; Padilla-Calderón, 2017). Lo anterior representa una amenaza para la seguridad hídrica y plantea desafíos para lograr la sostenibilidad de las actividades humanas, principalmente de la industria agroalimentaria que sostiene la cuenca del río Yaqui (Chen *et al.*, 2019; López-Feldman & Hernández-Cortes, 2016).

La región noreste de México, que es donde se encuentra la cuenca del río Yaqui, presenta condiciones naturales estresantes para la producción de cultivos. Además, el problema de la aridez se agrava por el cambio climático, el comportamiento errático del clima y el cambio en el uso de suelo (Flores-Ortiz, 2016). Dichas condiciones requieren escenarios de modelación precisos debido a la vulnerabilidad del sector agrícola hacia los recursos hídricos, lo cual define por mucho el potencial productivo de las especies cultivadas (Sánchez-Cohen *et al.*, 2013). En este contexto, cuando se considera a la cuenca hidrológica como unidad base de planeación en las cadenas productivas, es necesario caracterizar el aspecto hidrológico de la misma (Sánchez-Cohen *et al.*, 2015).

Los modelos hidrológicos son herramientas poderosas para simular el efecto de los procesos y poder planificar los recursos hídricos; esto con la finalidad de cumplir con sus diferentes usos consuntivos y necesidades ecológicas (Gholami *et al.*, 2016). Una opción para

their different consumptive uses and ecological needs (Gholami et al., 2016). One option for managing and planning a basin is to use the Soil and Water Assessment Tool (SWAT), which is a semi-distributed process-based hydrological model. SWAT is a powerful tool, worldwide, that assesses the effects of soil and water management at the sub-watershed level (Arnold et al., 2012; Gassman et al., 2007; Luo et al., 2011). This tool was designed to incorporate numerical and vector input data, which allows the analysis of hydrological processes at a large spatial scale (de Oliveira-Serrão et al., 2019). Its processing is also based on a continuous time scale, allowing land cover and climate changes in the simulations (Arnold et al., 1998).

Montecelos-Zamora et al. (2018) and Velázquez-Zapata et al. (2017) used SWAT in different basins in Mexico to study and predict the impacts of anthropogenic disturbances and climate change on the availability of water resources. The aim of this research was to model and analyze the behavior of surface runoff in the Yaqui river basin under climate change scenarios using SWAT.

Materials and methods

Study area

The Yaqui River basin, which covers an area of 65 024 km², belongs to the hydrological region number 9 and is located in the central area of the state of Sonora, Mexico. This basin drains the Yaqui River, considered the largest river in northwestern Mexico (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018). The Yaqui River originates in southern Arizona, USA, and flows into the Pacific Ocean forming a coastal delta that is exploited as an agricultural area in different municipalities of southern Sonora, which is known today as “Valle del Yaqui” (Enríquez-Licón & Lorenzana-Durán, 2017; Padilla-Calderón, 2017).

Based on daily composites of the CLICOM system of the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), the basin was divided into 12 quadrants and a history of 32 years of meteorological data (1972-2003) was reported. Cumulative precipitation was 609 mm, from June to October were the months that contributed the most to this parameter (75 %) (Figure 1). Mean annual temperature was 16.8 °C, with a maximum of 33 °C (May to September) and a minimum of 0 °C (December to February) (CICESE, 2020), so the climate can be considered semi-arid to arid (Mounir et al., 2019).

The Yaqui River basin is divided into three hydrological sub-watersheds (Figure 2), which

gestionar y planificar una cuenca hidrográfica es utilizar la herramienta de evaluación suelo y agua (SWAT, por sus siglas en inglés), que es un modelo hidrológico semi-distribuido basado en procesos. A nivel global, SWAT es una herramienta potente que evalúa los efectos del manejo del suelo y del agua a nivel subcuenca (Arnold *et al.*, 2012; Gassman *et al.*, 2007; Luo *et al.*, 2011). Dicha herramienta se diseñó para incorporar datos de entrada numéricos y vectoriales, lo cual permite analizar procesos hidrológicos a gran escala espacial (de Oliveira-Serrão *et al.*, 2019). Su procesamiento también se basa en una escala de tiempo continuo, lo que permite cambios en las simulaciones de la cobertura terrestre y del clima (Arnold *et al.*, 1998).

Montecelos-Zamora *et al.* (2018) y Velázquez-Zapata *et al.* (2017) emplearon SWAT en diferentes cuencas de México para estudiar y predecir los impactos de las perturbaciones antropogénicas y del cambio climático sobre la disponibilidad de los recursos hídricos. En esta investigación, el objetivo fue modelar y analizar, mediante SWAT, el comportamiento del escurrimiento superficial de la cuenca del río Yaqui ante escenarios de cambio climático.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La cuenca del río Yaqui, que abarca una superficie de 65 024 km², pertenece a la región hidrológica número 9 y está situada en la zona centro del estado de Sonora, México. Esta cuenca drena al río Yaqui, considerado como el más grande en el noroeste de México (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018). El río Yaqui se origina en el sur de Arizona, EUA, 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” (Enríquez-Licón & Lorenzana-Durán, 2017; Padilla-Calderón, 2017).

A partir de compuestos diarios en malla del sistema CLICOM del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), se dividió la cuenca en 12 cuadrantes y se obtuvo un histórico de 32 años de datos meteorológicos (1972-2003). La precipitación acumulada fue de 609 mm, siendo los meses de junio a octubre los que aportaron más en este parámetro (75 %) (Figura 1). Por su parte, la temperatura media anual fue de 16.8 °C, con un máximo de 33 °C (mayo a septiembre) y mínimo de 0 °C (diciembre a febrero) (CICESE, 2020), por lo que el clima se puede considerar de semiárido a árido (Mounir *et al.*, 2019).

La cuenca del río Yaqui se compone de tres subcuencas hidrológicas (Figura 2), las cuales constituyen las

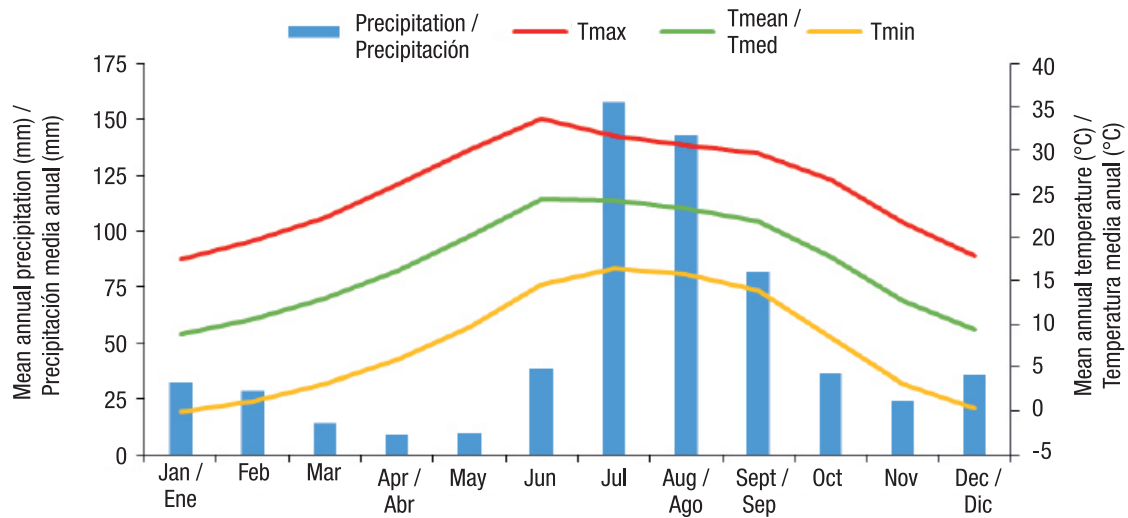


Figure 1. Climogram of the Yaqui river basin, Mexico (statistics 1974-2003).

Figura 1. Climograma de la cuenca del río Yaqui, México (estadísticas 1974-2003).

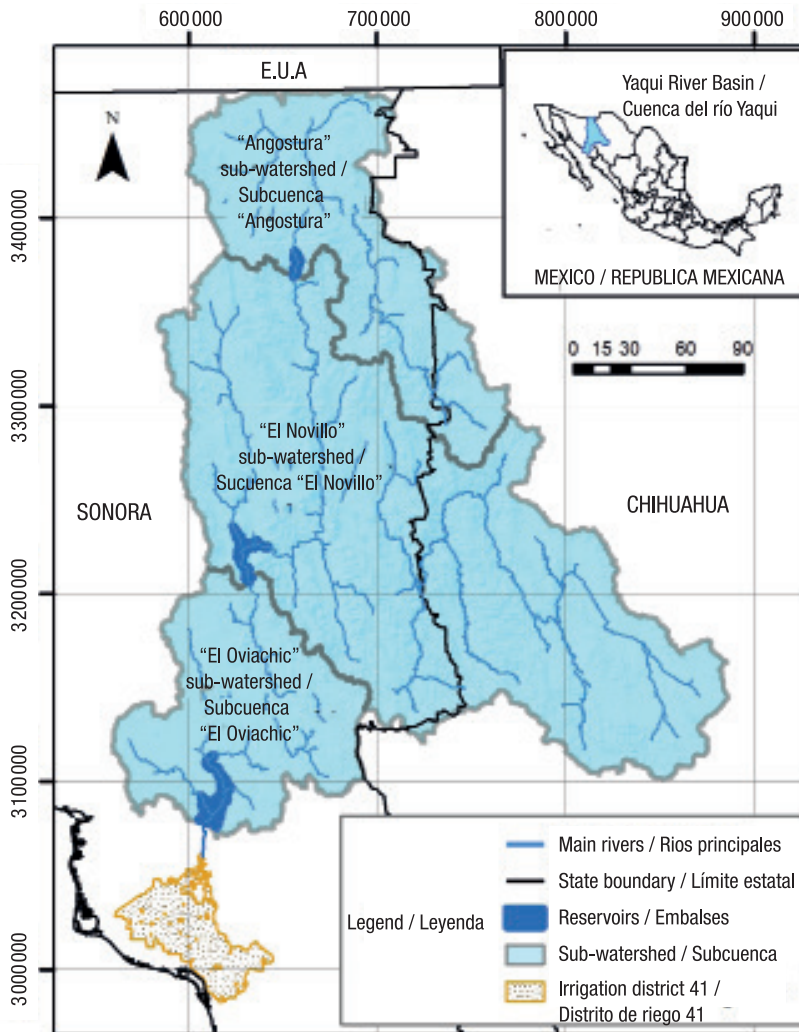


Figure 2. Spatial location of sub-basins of the Yaqui River.

Figura 2. Ubicación espacial de subcuencas del río Yaqui.

represent catchment areas of the reservoirs Lázaro Cárdenas “La Angostura” (13956 km²), Plutarco Elías Calles “El Novillo” (39499 km²) and Álvaro Obregón “El Oviachic” (11569 km²) (Mounir et al., 2019). Surface runoff of each sub-watershed was modeled in this study.

Processing input values

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT), developed by Arnold et al. (1998) and Neitsch et al. (2011) was used for the hydrological modeling of the Yaqui river basin, where the simulated variable was surface runoff, and the time scale of information was monthly. Figure 3 describes in detail the process carried out, which addresses aspects of the model input values, calibration, validation, and climate change scenarios.

Arnold et al. (2012) report the different data that feed the SWAT hydrologic model to perform the simulation (Table 1), so it is necessary to have an order and reference in terms of their scale, coordinates, and units of measurement.

áreas de captación de los embalses Lázaro Cárdenas “La Angostura” (13956 km²), Plutarco Elías Calles “El Novillo” (39499 km²) y Álvaro Obregón “El Oviachic” (11569 km²) (Mounir et al., 2019). En este estudio, se modeló el escurrimiento superficial de cada subcuenca.

Procesamiento de los valores de entrada

La herramienta de evaluación de suelos y agua (SWAT), desarrollada por Arnold et al. (1998) y Neitsch et al. (2011), se utilizó para la modelación hidrológica de la cuenca del río Yaqui, en donde la variable simulada fue el escurrimiento superficial y la escala temporal de información fue mensual. En la Figura 3 se describe a detalle el proceso realizado, el cual aborda aspectos sobre los valores de entrada del modelo, la calibración, la validación y los escenarios de cambio climático.

Arnold et al. (2012) reportan los diferentes datos que alimentan al modelo hidrológico SWAT para realizar la simulación (Cuadro 1), por lo que es necesario tener un orden y referencia en cuanto a su escala, coordenadas y unidades de medida.

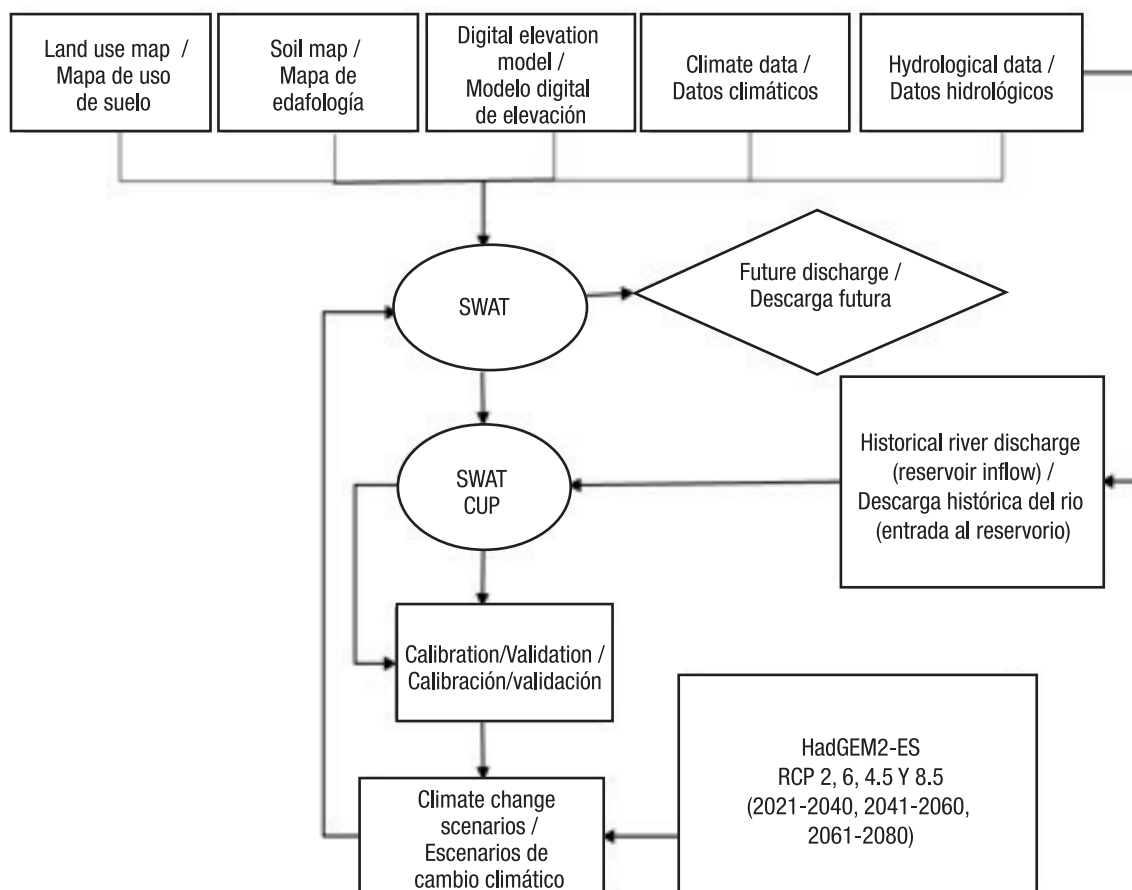


Figure 3. Flow diagram of the hydrological modeling of the Yaqui River using SWAT.

Figura 3. Diagrama de flujo de la modelación hidrológica del río Yaqui mediante SWAT.

Table 1. Input data for hydrologic modeling using SWAT in the Yaqui River basin.**Cuadro 1. Datos de entrada para la modelación hidrológica mediante SWAT en la cuenca del río Yaqui.**

Data / Datos	Site / Localización	Information available / Información disponible	Source / Fuente proveedora
Digital elevation model/ Modelo digital de elevación	Yaqui river/ río Yaqui	2019	INEGI (2019)
Edaphology/ Edafología	Yaqui river/ río Yaqui	1995	INIFAP-CONABIO (1995)
Land use and vegetation/ Uso de suelo y vegetación	Yaqui river/ río Yaqui	2016	INEGI (2016)
Climate data/ Datos climáticos	12 stations/ 12 estaciones	1970-2003	CICESE (2020)
Runoff data measured/ Datos de escurrimientos observados	3 stations/ 3 estaciones	1964-2018	CONAGUA (2018)

INEGI = Instituto Nacional de Estadística y Geografía; CONABIO = Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad; CICESE = Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada; CONAGUA = Comisión Nacional del Agua.

INEGI = Instituto Nacional de Estadística y Geografía; CONABIO = Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad; CICESE = Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada; CONAGUA = Comisión Nacional del Agua.

Model application and parameterization

The QSWAT 2.0 interface of the free QGIS 2.6.1 program was used in this study, in which the application and parameterization of the hydrological model was performed. The input values were processed according to the size of the Yaqui river basin from an official polygon provided by CONAGUA, with the coordinate system Datum WGS84, UTM zone 12 projection. The program determined the drainage network and the sub-watersheds that make up the hydrographic basin. An outlet point was established at each dam, since each one regulates upstream runoff. At the same time, hydrologic response units (HRU) were created for each sub-watershed, which were homogeneous in terms of physical characteristics (soil type, vegetation, and topography). In this context, each HRU had different variables in its matrix that influenced the modeling (Luo et al., 2011).

When parameterizing the model, it is necessary to indicate the simulation period. In this case, a 34-year meteorological data set (1970-2003) was used, which was reported daily and used for the Warm up period (1970-1971), calibration (1972-1993) and validation (1994-2003). The Warm up period is necessary at the beginning of the model, since the model tends to show great uncertainty because initial simulation conditions are unknown (Daggupati et al., 2015).

Calibration and validation

Calibration consists of estimating parameters of a hydrological model and comparing the simulated data

Aplicación del modelo y parametrización

En este estudio se utilizó la interfaz QSWAT 2.0 del programa libre QGIS 2.6.1, en la cual se realizó la aplicación y parametrización del modelo hidrológico. Los valores de entrada se procesaron de acuerdo con el tamaño de la cuenca del río Yaqui a partir de un polígono oficial proporcionado por la CONAGUA, al cual se le asignó el sistema de coordenadas Datum WGS84, proyección UTM zona 12. El programa determinó la red de drenaje y las subcuencas que componen a la cuenca hidrográfica. Se estableció un punto de salida en cada presa, ya que cada una es reguladora del escurrimiento aguas arriba. Al mismo tiempo, se crearon unidades de respuesta hidrológica (HRU) para cada subcuenca, las cuales presentaban homogeneidad en cuanto a sus características físicas (tipo de suelo, vegetación y topografía). En este contexto, cada HRU tenía en su matriz variables diferentes que influyeron en la modelación (Luo *et al.*, 2011).

Al momento de parametrizar el modelo, es necesario indicar el periodo de simulación. En este caso, se utilizó un conjunto de datos meteorológicos de 34 años (1970-2003), los cuales se reportaron diariamente y se emplearon para el periodo de calentamiento (Warm up) (1970-1971), calibración (1972-1993) y validación (1994-2003). El periodo de calentamiento es necesario al inicio del modelo, ya que éste tiende a presentar gran incertidumbre debido a que se desconocen las condiciones iniciales de simulación (Daggupati *et al.*, 2015).

against the data measured (Moriasi et al., 2007). For this purpose, the SWAT-CUP 2019 program (Calibration and Uncertainty Program) was used and the automated calibration protocol recommended by Abbaspour et al. (2015) and Arnold et al. (2012) was followed. That protocol mentioned that parameterization is an important step in the calibration model and should be based on knowledge of hydrological processes and variability of soil type, land use, slope, and location of the sub-watershed. The Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2) algorithm was selected to fit the modeling parameters based on the availability of values related to water balance modeling (Gholami et al., 2016). For each sub-watershed, 1500 simulations were run, which were divided into three iteration periods (500 simulations each) and parameters were manually recalibrated after each iteration (Montecelos-Zamora et al., 2018).

The sensitivity parameters used in the calibration process (Table 2) represent the surface runoff processes in the hydrological sub-watershed (Niraula et al., 2015; Niraula et al., 2012; Norman et al., 2019; Norman & Niraula, 2016; Veith et al., 2010).

Model evaluation

To evaluate the performance of the hydrological model, statistical methods used in hydrological applications are implemented to obtain the degree of similarity between the measured and generated data. In the present study, the coefficient of determination (R^2) was used, which describes the proportion of variance between the measured and simulated data. R^2 varies from 0 to 1, and values greater than 0.5 are considered acceptable (Arnold et al., 2012). The Pearson's correlation coefficient (r) shows variations from 0 to 1 (Equation 1), where 0 indicates no correlation and 1 represents a perfect correlation (Abbaspour et al., 2015; Arnold et al., 2012; Moriasi et al., 2007).

$$r = \frac{[\sum(Q_{obs} - Q_{obs,m})(Q_{sim} - Q_{sim,m})]^2}{[\sum(Q_{obs} - Q_{obs,m})^2][\sum(Q_{sim} - Q_{sim,m})^2]} \quad (1)$$

where Q_{obs} is the measured flow ($m^3 \cdot s^{-1}$), Q_{sim} is the simulated flow ($m^3 \cdot s^{-1}$), $Q_{obs,m}$ is the mean of the measured flow ($m^3 \cdot s^{-1}$) and $Q_{sim,m}$ is the mean of the simulated flow ($m^3 \cdot s^{-1}$).

We also evaluated the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), which varies from $-\infty$ to 1. Values between 0 and 1 indicate a good prediction by the model of the measured values (Nash & Sutcliffe, 1970). Moriasi et al. (2007) classify the NSE as follows: < 0.2 insufficient, 0.2 - 0.4 satisfactory, 0.4 - 0.6 good, 0.6 - 0.8 very good and > 0.8 excellent (Equation 2).

Calibración y validación

La calibración consiste en estimar los parámetros de un modelo hidrológico y comparar los datos simulados contra los datos observados (Moriasi et al., 2007). Para tal efecto, se utilizó el programa SWAT-CUP 2019 (Calibration and Uncertainty Program) y se siguió el protocolo de calibración automatizada recomendado por Abbaspour et al. (2015) y Arnold et al. (2012). En dicho protocolo se menciona que la parametrización es un paso importante en el modelo de calibración, y se debe basar en el conocimiento de los procesos hidrológicos y la variabilidad del tipo de suelo, uso del suelo, pendiente y ubicación de la subcuenca. Se seleccionó el algoritmo *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2) con el fin de ajustar los parámetros de la modelación a partir de la disponibilidad de valores relacionados con el modelado del balance hídrico (Gholami et al., 2016). Para cada subcuenca, se ejecutaron 1500 simulaciones, las cuales se dividieron en tres periodos de iteraciones (500 simulaciones cada una) y se reajustaron manualmente los parámetros después de cada iteración (Montecelos-Zamora et al., 2018).

Los parámetros de sensibilidad que se utilizaron en el proceso de calibración (Cuadro 2) representan los procesos de escurrimiento superficial en la subcuenca hidrológica (Niraula et al., 2015; Niraula et al., 2012; Norman et al., 2019; Norman & Niraula, 2016; Veith et al., 2010).

Evaluación del modelo

Para evaluar el rendimiento del modelo hidrológico se emplean métodos estadísticos utilizados en las aplicaciones hidrológicas; esto con la finalidad de obtener el grado de semejanza entre los datos observados y los generados. En el presente estudio, se empleó el coeficiente de determinación (R^2), el cual describe la proporción de la varianza de los datos observados y simulados. R^2 varía de 0 a 1, y se consideran aceptables valores mayores a 0.5 (Arnold et al., 2012). Por su parte, el coeficiente de correlación de Pearson (r) presenta variaciones de 0 a 1 (Ecuación 1), donde 0 indica que no hay correlación y 1 representa una correlación perfecta (Abbaspour et al., 2015; Arnold et al., 2012; Moriasi et al., 2007).

$$r = \frac{[\sum(Q_{obs} - Q_{obs,m})(Q_{sim} - Q_{sim,m})]^2}{[\sum(Q_{obs} - Q_{obs,m})^2][\sum(Q_{sim} - Q_{sim,m})^2]} \quad (1)$$

donde Q_{obs} es el flujo observado ($m^3 \cdot s^{-1}$), Q_{sim} es el flujo simulado ($m^3 \cdot s^{-1}$), $Q_{obs,m}$ es la media del flujo observado ($m^3 \cdot s^{-1}$) y $Q_{sim,m}$ es la media del flujo simulado ($m^3 \cdot s^{-1}$).

De igual manera, se evaluó el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE, por sus siglas en inglés), el

Table 2. Calibration parameters for surface runoff.

Cuadro 2. Parámetros de calibración para el escurrimiento superficial.

Parameter / Parámetro	Parameter description / Descripción del parámetro	Unit / Unidad	Calibration ranges / Rangos de calibración		Fitted value / Valor ajustado		
			Min.	Max. / Máx.	La Angostura	El Novillo	El Oviachic
CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in the main channel / Conductividad hidráulica efectiva en el canal principal	mm·h ⁻¹	0.01	500	260.108	181.115	182.424
CN2.mgt	Curve number value / Valor de curva numérica	-	35	98	73	77	66
SURLAG.bsn	Runoff surface in time delay / Superficie de escurrimiento en tiempo de retraso	days / días	0.05	24	9.065	5.325	1.758
ESCO.hru	Soil evaporation compensation factor / Factor de compensación de evaporación del suelo	-	0	0.95	0.313	0.95	0.673
SOL_AWC.sol	Available water capacity in the soil layer / Capacidad de agua disponible en la capa de suelo	mm	0	1	0.303	0.193	0.320
GW_REVAP.gw	Groundwater renewal coefficient / Coeficiente de renovación de agua subterránea	-	0.02	0.2	0.199	0.110	0.023
GWQMN.gw	Depth threshold of water in the surficial aquifer / Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial	mm	0	1000	149.982	78.433	23.180
ALPHA_BF.gw	Baseflow alpha factor / Flujo base del factor alfa	days / días	0.048	.95	0.048	0.544	0.048
GW_DELAY.gw	Groundwater retardation / Retraso del agua subterránea	days / días	0	31	8.709	8.421	26.585
RCHRG_DP.gw	Percolation fraction of deep aquifers / Fracción de percolación de acuíferos profundos	-	0	1	0.568	0.435	0.111

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{obs,m})^2} \quad (2)$$

As a last statistical indicator, the percentage bias (PBIAS) was considered as a quantitative measure (Gupta et al., 1999), which evaluates whether the values simulated by the model were higher or lower than the values measured at the gauging point (Equation 3). The optimum value is 0, and values close to this represent simulations with minimal errors in the mass balance; a positive value of PBIAS indicates that the model is underestimating the measured values, while a negative value indicates that the model overestimates that measured at the gauging point (Abbaspour et al., 2015; Moriasi et al., 2007).

$$PBIAS (\%) = \frac{\sum Q_{sim} - Q_{obs}}{\sum Q_{obs}} \times 100 \quad (3)$$

The performance of the model was also verified from a linear regression graph and an identity function (1:1). For this purpose, the simulated flow was compared against the measured flow in the calibration and validation periods, placing the identity line as a reference to observe the trend of the dispersion points.

Climate change scenarios and model configuration

With the purpose to force the SWAT model against climate change scenarios, projections were generated using the LARS-WG 6.0 interface, which incorporates predictions from 18 global climate models from the CMIP5 ensemble used in the IPCC fifth assessment report (Semenov & Stratonovitch, 2010; Semenov & Stratonovitch, 2015). In addition, the HadGEM2-ES model (Hadley Center Global Environment Model ver. 2) was used to project representative concentration trajectories over three time periods: 2021-2040, 2041-2060 and 2061-2080 (RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively) (IPCC, 2014). These climate change scenarios used as input the temperature and precipitation for the SWAT model, previously calibrated and validated, and the simulation of the surface runoff of the Yaqui River in future time periods.

Results and discussion

Calibration and validation

The results reported in the three sub-watersheds (La Angostura, El Novillo and El Oviachic) show that the statistical performance parameters, for model calibration and validation, are in acceptable ranges (> 0.5); this is in accordance with the criteria established by Abbaspour et al. (2015) and Moriasi et

al. (2007) clasifican el NSE de la siguiente manera: < 0.2 insuficiente, 0.2 - 0.4 satisfactorio, 0.4 - 0.6 bueno, 0.6 - 0.8 muy bueno y > 0.8 excelente (Ecuación 2).

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{obs,m})^2} \quad (2)$$

Como último indicador estadístico se consideró el sesgo porcentual (PBIAS, por sus siglas en inglés) como medida cuantitativa (Gupta et al., 1999), el cual evalúa si los valores simulados por el modelo fueron mayores o menores que los valores observados en el punto de aforo (Ecuación 3). El valor óptimo es el 0, y los valores cercanos a éste representan simulaciones con errores mínimos en el balance de masa; un valor positivo de PBIAS indica que el modelo está subestimando los valores medidos, mientras que un valor negativo indica que el modelo sobreestima lo medido en el punto de aforo (Abbaspour et al., 2015; Moriasi et al., 2007).

$$PBIAS (\%) = \frac{\sum Q_{sim} - Q_{obs}}{\sum Q_{obs}} \times 100 \quad (3)$$

El rendimiento del modelo también se verificó a partir de un gráfico de regresión lineal y una función de identidad (1:1). Para ello, se comparó el flujo simulado contra el observado en los periodos de calibración y validación, ubicando la línea de identidad como referencia para observar la tendencia de los puntos de dispersión.

Escenarios de cambio climático y configuración del modelo

Con la propuesta de forzar el modelo SWAT ante escenarios de cambio climático, se generaron proyecciones mediante la interfaz LARS-WG 6.0, la cual incorpora predicciones de 18 modelos climáticos globales del conjunto CMIP5, utilizados en el quinto informe de evaluación del IPCC (Semenov & Stratonovitch, 2010; Semenov & Stratonovitch, 2015). Además, se utilizó el modelo HadGEM2-ES (Hadley Center Global Environment Model ver. 2) para proyectar las trayectorias de concentración representativas durante tres periodos de tiempo: 2021-2040, 2041-2060 y 2061-2080 (RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente) (IPCC, 2014). Estos escenarios de cambio climático utilizaron como entrada la temperatura y la precipitación para el modelo SWAT, previamente calibrado y validado, y la simulación del escurrimiento superficial del río Yaqui en periodos de tiempo futuros.

al. (2007). Thus, the statistical parameters prove that there is a good relationship between the measured and simulated flow after fitting the most sensitive parameters of the model (Arnold et al., 2012). In relation to the evaluation of the hydrological model, Table 3 show the results recorded according to the calibration and validation period.

As shown in Figure 4, the calibration and validation hydrographs for the three sub-watersheds show that

Resultados y discusión

Calibración y validación

Los resultados obtenidos en las tres subcuencas (La Angostura, El Novillo y El Oviachic) muestran que los parámetros estadísticos de rendimiento, para la calibración y la validación de los modelos, están en rangos aceptables (> 0.5); esto de acuerdo con los criterios establecidos por Abbaspour *et al.* (2015) y

Table 3. Performance of the hydrologic model according to the calibration and validation period in the three sub-watersheds.

Cuadro 3. Desempeño del modelo hidrológico de acuerdo con el periodo de calibración y validación en las tres subcuencas.

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

r = Pearson correlation coefficient; R² = coefficient of determination; NSE = Nash-Sutcliffe efficiency coefficient; PBIAS = percentage bias.

r = coeficiente de correlación de Pearson; R² = coeficiente de determinación; NSE = coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe; PBIAS = sesgo porcentual.

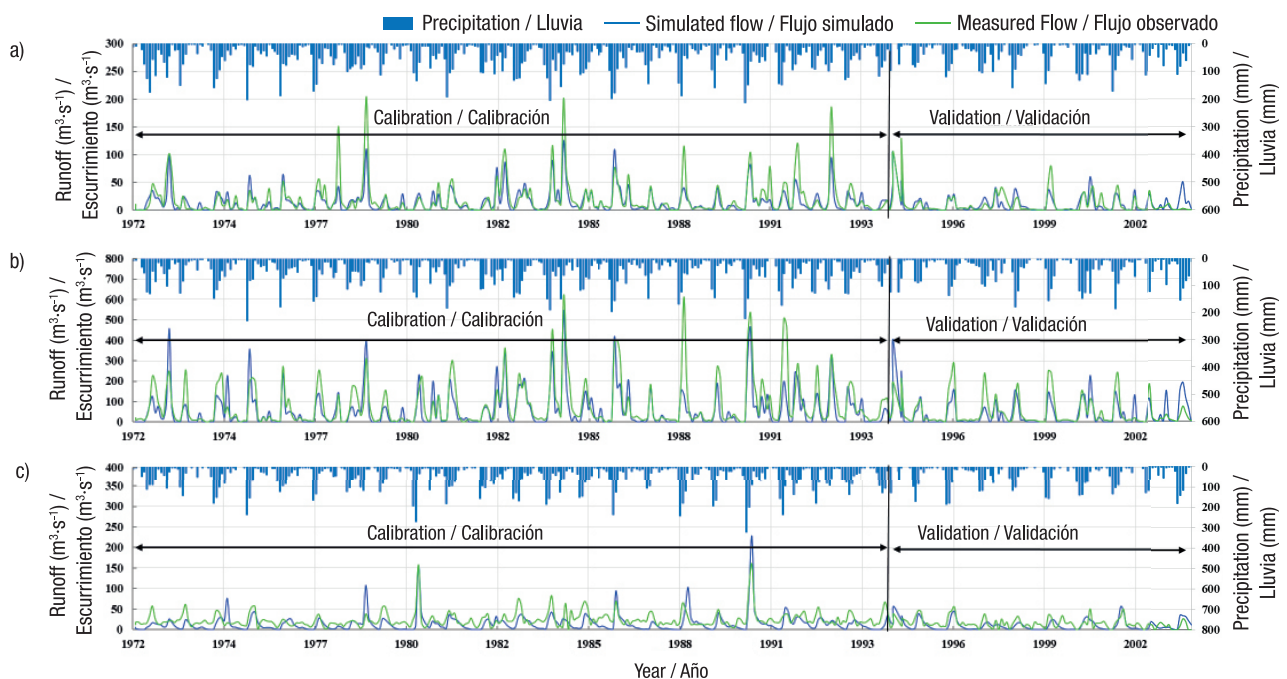


Figure 4. Measured vs simulated runoff by SWAT for the calibration and validation of three sub-watersheds: a) Angostura, b) El Novillo and c) El Oviachic.

Figura 4. Escurrimiento observado vs simulado por SWAT para la calibración y validación de tres subcuencas: a) Angostura, b) El Novillo y c) El Oviachic.

the measured flow is slightly above the simulated estimates, although in some events the opposite is true. Fontes and Montenegro (2019) point out that these differences are a result of the main precipitation events that precede the surface runoff impulses. This is because basins with arid regimes are intermittent in the wet months and usually have ephemeral flow events in the dry months when there is no runoff.

As seen in Figure 5a and 5b, the regression line is below the identity line, which verifies that the model underestimates the data measured in the La Angostura and El Novillo sub-watersheds. On the other hand, the regression line in El Oviachic is above the identity line, which shows that the model overestimates the data measured in both periods (Figure 5c). This figure also shows that the SWAT model tends to be more precise in small flows than in large flows (greater than $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), therefore the lower dispersion in smaller flows.

It is evident that during some years in the simulation with SWAT some extreme phenomena (droughts and floods) occurred in the sub-watershed, so the model

Moriasi *et al.* (2007). Así, los parámetros estadísticos prueban que existe una buena relación entre el flujo observado y simulado después de ajustar los parámetros más sensibles del modelo (Arnold *et al.*, 2012). Con respecto a la evaluación del modelo hidrológico, el Cuadro 3 presenta los resultados obtenidos de acuerdo con el periodo de calibración y validación.

Como se observa en la Figura 4, los hidrogramas de calibración y validación de las tres subcuencas muestran que el flujo observado está ligeramente por encima de las estimaciones simuladas, aunque en algunos eventos es lo contrario. Fontes y Montenegro (2019) señalan que estas diferencias son resultado de los principales eventos de precipitación que preceden a los impulsos de escurrimiento superficial. Lo anterior debido a que las cuencas con régimen árido son intermitentes en los meses húmedos y suelen presentar eventos de flujos efímeros en los meses secos, cuando no hay escurrimiento.

Como se puede observar en la Figura 5a y 5b, la línea de regresión se encuentra por debajo de la línea

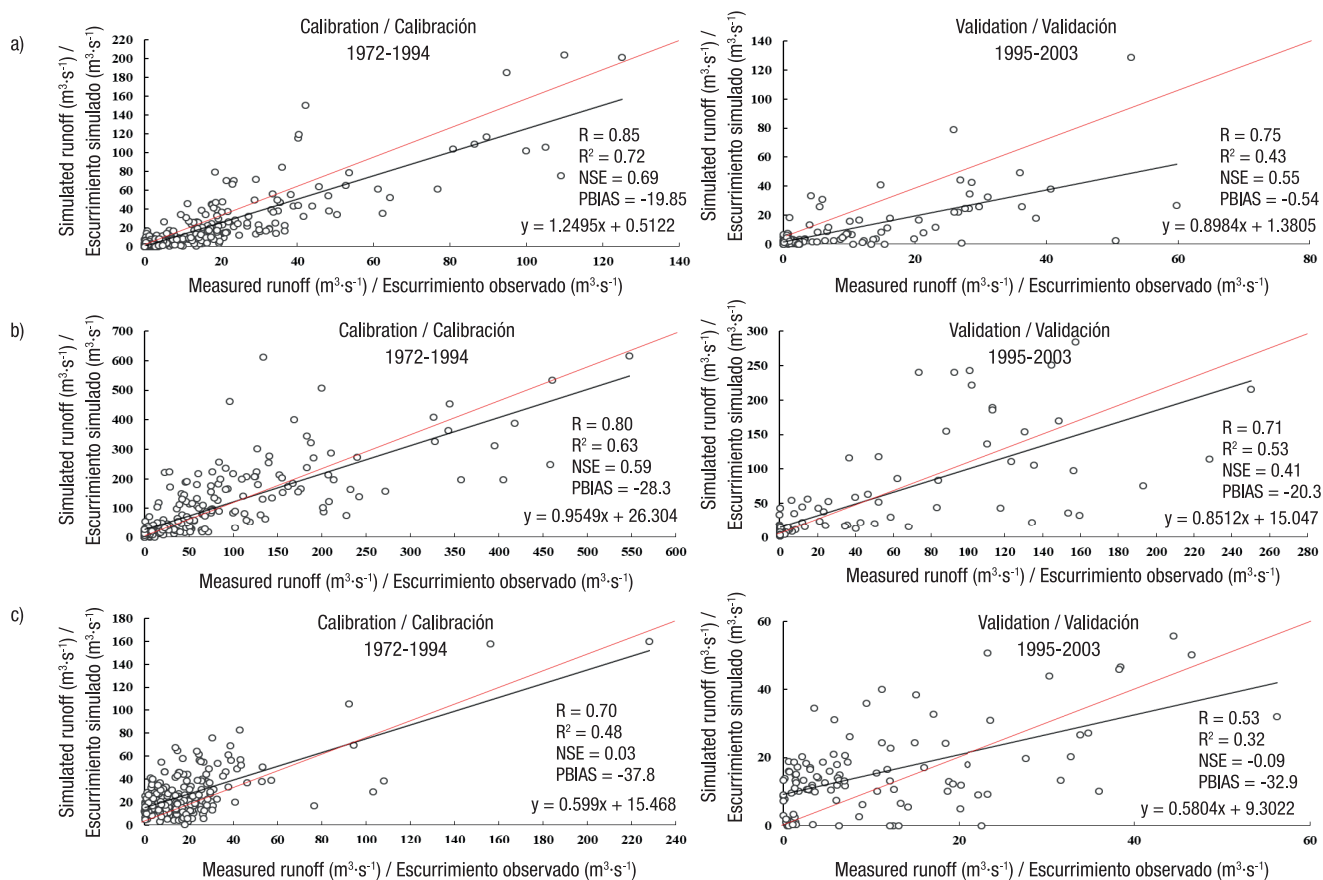


Figure 5. Scaled plot showing the measured and simulated flow for calibration and validation: a) La Angostura, b) El Novillo and c) El Oviachic.

Figura 5. Gráfica escalada del flujo observado y simulado para la calibración y la validación: a) La Angostura, b) El Novillo y c) El Oviachic.

showed a poor simulation response. In this sense, de Oliveira-Serrão et al. (2019) mention that the model does not accurately reproduce some flow periods, mainly those resulting from atypical phenomena.

Climate change scenarios

For La Angostura, surface runoff and precipitation maintained a linear relationship (Figure 6a): $R^2 = 0.80$ (RCP 2.6), $R^2 = 0.73$ (RCP 4.5) and $R^2 = 0.66$ (RCP 8.5), with a decrease in the RCP 8.5 scenario. For El Novillo, R^2 values were 0.78, 0.79 and 0.73, for RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively, showing a reduction in surface runoff at the last level (Figure 6b). Finally, for El Oviachic, R^2 values of 0.69, 0.68 and 0.65 were reported for RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5, respectively, showing a decrease in scenario 8.5 (Figure 6c).

Percentage of change in surface runoff

Changes in surface runoff were reported in the three sub-watersheds studied. For La Angostura, considering the annual average, the negative change with the greatest impact was -67 % for the period 2021-2040 (RCP 2.6), and an increase of 60 %

de identidad, con lo que se verifica que el modelo subestima los datos observados en las subcuencas La Angostura y El Novillo. Por su parte, la línea de regresión en El Oviachic se encuentra por encima a la línea de identidad, lo que evidencia que el modelo sobrestima los datos observados en ambos periodos (Figura 5c). En esta figura también se puede observar que el modelo SWAT tiende a ser más preciso en flujos pequeños que en flujos grandes (mayores a $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), de ahí la menor dispersión en flujos menores.

Es evidente que durante algunos años en la simulación con SWAT ocurrieron algunos fenómenos extremos (sequías e inundaciones) en la subcuenca, por lo que el modelo no obtuvo una buena respuesta de simulación. En este sentido, de Oliveira-Serrão et al. (2019) mencionan que el modelo no reproduce con precisión algunos periodos de flujo, principalmente los resultantes de fenómenos atípicos.

Escenarios de cambio climático

En La Angostura, el escurrimiento superficial y la precipitación mantuvieron una relación lineal

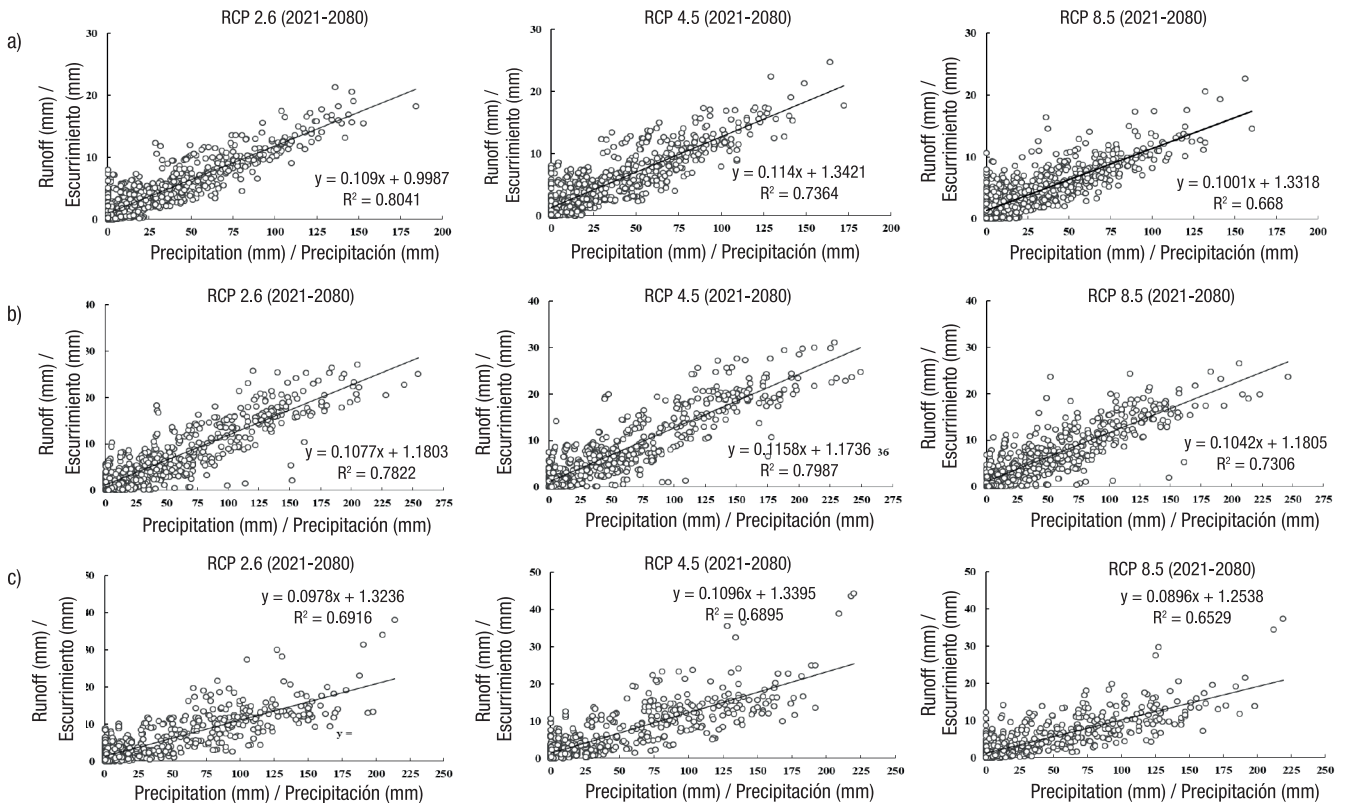


Figure 6. Linear relationship of measured runoff vs. precipitation for three sub-watersheds: a) La Angostura, b) El Novillo and c) El Oviachic.

Figura 6. Relación lineal del escurrimiento observado vs precipitación de tres subcuencas: a) La Angostura, b) El Novillo y c) El Oviachic.

is expected during the period 2041-2060 (RCP 8.5). For El Novillo an average annual decrease of up to -65 % is predicted for the period 2061-2080 (RCP 4.5) and an increase of 42 % during the period 2061-2080 (RCP 2.6), and for El Oviachic a decrease in flow of -63 % is expected for the period 2041-2060 (RCP 2.6 and 4.5) and an increase of 47 % in the period 2041-2060 (RCP 2.6 and 4.5).

These results contrast with those reported by Boru et al. (2019) when identifying a percentage change in Nile River flow of -24.3 to 49.5 % in the period 2021-2040, and -29 to 20 % in the period 2081-2100 for RCP 4.5 scenarios. In the same study, the projected change in flow was -18 to 31.9 % in the period 2021-2040 and -33 to 22.3 % in the period 2081-2100 for RCP 8.5.

As shown in Table 4, in the three sub-watersheds the percentage decrease in flow was greater than the increase in flow, so a longer dry period is expected, mainly for El Oviachic, followed by La Angostura and El Novillo (Sánchez-Cohen et al., 2020). Chen et al. (2017) mention that the frequency of occurrence and strength of droughts in the dry season will increase due to global warming, while floods in the wet season tend to increase. Specifically in the reservoirs of the Yaqui River basin, it is important to consider the total volume runoff in the three sub-watersheds, since the irrigation district makes interbasin transfers to provide water to irrigation district number 41 and the

(Figura 6a): $R^2 = 0.80$ (RCP 2.6), $R^2 = 0.73$ (RCP 4.5) y $R^2 = 0.66$ (RCP 8.5), con una disminución en el escenario RCP 8.5. En El Novillo, los valores de R^2 fueron de 0.78, 0.79 y 0.73, para RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente, mostrándose una reducción del escurrimiento superficial en el último nivel (Figura 6b). Finalmente, en El Oviachic se obtuvieron valores de R^2 de 0.69, 0.68 y 0.65, para RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente, observándose una disminución en el escenario 8.5 (Figura 6c).

Porcentaje de cambio en el escurrimiento superficial

En las tres subcuencas estudiadas se observaron cambios en el escurrimiento superficial. En La Angostura, considerando el promedio anual, el cambio negativo con mayor impacto fue de -67 % para el periodo 2021-2040 (RCP 2.6), y se espera un aumento de 60 % durante el periodo 2041-2060 (RCP 8.5). En El Novillo se predice una disminución promedio anual de hasta -65 % para el periodo 2061-2080 (RCP 4.5) y un aumento de 42 % durante el periodo 2061-2080 (RCP 2.6), y en El Oviachic se espera una disminución de flujo de -63 % para el periodo 2041-2060 (RCP 2.6 y 4.5) y un aumento de 47 % en el periodo 2041-2060 (RCP 4.5).

Estos resultados contrastan con los observados por Boru et al. (2019) al identificar un cambio porcentual

Table 4. Annual percent change in total runoff availability in the three sub-watersheds under RCP scenarios. Percentages reflect the impact of the climate change scenario on average runoff.

Cuadro 4. Cambio porcentual anual de la disponibilidad total de escurrimiento en las tres subcuencas bajo escenarios RCP. Los porcentajes reflejan el impacto del escenario de cambio climático en el escurrimiento promedio.

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

A negative sign (-) indicates a decrease in runoff and a positive sign (+) indicates an increase in runoff.

Signo negativo (-) indica decremento en el escurrimiento y signo positivo (+) indica un incremento.

Yaqui colonies downstream of the dams. The dams also provide water for power generation.

Regarding the representativeness of the model to the physical environment, the SWAT model in Mexico has been used in some basins as a management decision tool. Cruz-Arévalo et al. (2021) used this model in the Chapingo river basin to evaluate the impact of land use on runoff. The results of these authors show the need to have measured data of the physical environment variables for an adequate calibration. Furthermore, Torres-Benites et al. (2004) calibrated the SWAT model in a basin in Estado de México (El Tejocote) to evaluate its predictive capacity and concluded that the model underestimated runoff by 18 % and sediment by 38 %. Other studies report that the SWAT model underestimates the slope factor in sub-watersheds when this value is greater than 25 % (Rivera-Toral et al., 2012).

Several studies are in agreement with the results of the present analysis. Chang et al. (2017) report similar changes in runoff in a watershed in China, where different climate scenarios and their variations in precipitation were evaluated. In the Alpine regions, Braun et al. (2020) studied the effect of changing runoff patterns caused by increasing temperatures and observed different scenarios on runoff production.

The use of the SWAT model to predict the possible impacts produced by climate change against water resources has been recommended as a support for decision making in different parts of the world (Abbaspour et al., 2015). Therefore, it is considered an important tool for predicting possible future scenarios in the Yaqui River basin.

Conclusions

It was possible to implement the SWAT hydrologic model to identify future changes in surface runoff of the Yaqui River basin. Based on the statistical indicators, the predictive capacity of the model is considered to be good and satisfactory. The scenario with the greatest impact for the La Angostura sub-watershed was RCP 8.5 (period 2041-2060), with a change from -57 to 60 %. For El Novillo, the greatest change occurred in RCP 4.5 (period 2061-2080), with changes from -65 to 34 %, while for El Oviachic the greatest change in runoff was reported in RCP 4.5 (period 2041-2060) with -63 and 47 %.

The SWAT model provides an effective means to evaluate the hydrology of the Yaqui River basin spatially and temporally. Specially, it allows knowing the variability of the surface runoff on which the large reservoirs that contain the water resource for irrigation

en el caudal del río Nilo de -24.3 a 49.5 % en el periodo 2021-2040, y de -29 a 20 % en el periodo 2081-2100 para escenarios RCP 4.5. En el mismo estudio, el cambio proyectado en el caudal fue de -18 a 31.9 % en el periodo 2021-2040 y -33 a 22.3 % en el periodo 2081-2100 para RCP 8.5.

Como se observa en el Cuadro 4, en las tres subcuencas la disminución porcentual del flujo fue mayor que el aumento de éste, por lo que se espera un periodo seco más prolongado, principalmente en El Oviachic, seguido de La Angostura y El Novillo (Sánchez-Cohen et al., 2020). Chen et al. (2017) mencionan que la frecuencia de ocurrencia y la fuerza de las sequías en la estación seca aumentará por el calentamiento global, mientras que las inundaciones en la estación húmeda tienden a aumentar. Específicamente en los embalses de la cuenca del río Yaqui, es importante considerar el volumen total escurrido en las tres subcuencas, ya que el distrito de riego efectúa transvases para proveer de agua al distrito de riego número 41 y a las colonias Yaquis, aguas debajo de las presas. Asimismo, las presas proveen de agua para la generación de energía.

Respecto de la representatividad del modelo al medio físico, el modelo SWAT en México ha sido usado en algunas cuencas como herramienta de decisión para su manejo. Cruz-Arévalo et al. (2021) usaron este modelo en la cuenca del río Chapingo para evaluar el impacto del uso del suelo en escurrimiento. Los resultados de estos autores muestran la necesidad de contar con datos observados de las variables del medio físico para una adecuada calibración. De igual manera, Torres-Benites et al. (2004) calibraron el modelo SWAT en una cuenca del Estado de México (El Tejocote) para evaluar su capacidad predictiva y concluyeron que el modelo subestimó en 18 % el escurrimiento y en 38 % los sedimentos. Otros estudios aseguran que el modelo SWAT subestima el factor pendiente en las subcuencas cuando este valor es mayor al 25 % (Rivera-Toral et al., 2012).

Existen diferentes estudios que concuerdan con los resultados del presente análisis. Chang et al. (2017) reportan cambios similares en el escurrimiento de una cuenca en China en la que evaluaron diferentes escenarios climáticos y sus variaciones en precipitación. En las regiones Alpinas, Braun et al. (2020) estudiaron el efecto del cambio en los patrones de escurrimiento causado por el incremento en temperaturas y observaron diferentes escenarios en la producción de escurrimientos.

El uso del modelo SWAT para predecir los posibles impactos producidos por el cambio climático hacia los recursos hídricos se ha recomendado como apoyo para

district 41 depend. To improve the reliability of the proposed model, it is recommended to use punctual meteorological data measured *in situ*, because the CLICOM tool in Mesh considers a general average of the area covered by the quadrant within the basin. Daily records from hydrometric stations can also be considered, which will provide more accurate knowledge of runoff behavior over shorter periods of time.

According to the results, it is recommended that in the calibration process the range of data proposed by the SWAT-CUP tool be verified to be in values that really represent the physical environment. Otherwise, it is recommended that this process be carried out manually by entering the tables generated by the model and making the pertinent changes in the most sensitive parameters (curve number and hydraulic conductivity, mainly). This process can be carried out for specific areas or for the entire basin.

It was found that hydrological-climatic modeling offers a good option for analyzing what could happen to hydrological variables against variations in climate patterns. The use of IPCC climate change projections represents the baseline for comparisons with hydrological situations in basins. The advantage of using climate scenarios is that it is possible to design impact mitigation strategies.

With the data collected, adaptation and mitigation strategies can be generated to improve the efficient use of water in the basin and to propose sustainable management alternatives for land use and vegetation in the long term. Other studies also show the impacts that changes in climate patterns have on runoff production; in addition, they suggest the need for higher quality measured data for calibration processes, which suggests continuous and quality hydrological monitoring.

Acknowledgments

The first author would like to thank the *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)* for the scholarship granted for postgraduate studies, as well as the *Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias - Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera* and the *Unidad Regional de Zonas Áridas (URUZA)* of the *Universidad Autónoma Chapingo*.

la toma de decisiones en diferentes partes del mundo (Abbaspour et al., 2015). Por ello, se considera una herramienta importante para la predicción de posibles escenarios futuros en la cuenca del río Yaqui.

Conclusiones

Fue posible implementar el modelo hidrológico SWAT para identificar cambios futuros en el escurrimiento superficial de la cuenca del río Yaqui. Con base en los indicadores estadísticos se considera que la capacidad predictiva del modelo es buena y satisfactoria. El escenario con mayor impacto en la subcuenca La Angostura fue el RCP 8.5 (periodo 2041-2060), con un cambio de -57 a 60 %. En El Novillo, el mayor cambio se presentó en el RCP 4.5 (periodo 2061-2080), con cambios de -65 a 34 %, mientras que en El Oviachic el mayor cambio de escurrimiento se observó en el RCP 4.5 (periodo 2041-2060) con -63 y 47 %.

El modelo SWAT proporciona un medio efectivo para evaluar la hidrología de la cuenca del río Yaqui de forma espacial y temporal. Específicamente, permite conocer la variabilidad del escurrimiento superficial del que dependen los grandes embalses que contienen el recurso hídrico para el distrito de riego 41. Para mejorar la confiabilidad del modelo propuesto, se recomienda utilizar datos meteorológicos puntuales y medidos *in situ*, ya que la herramienta CLICOM en Malla considera un promedio general del área que abarca el cuadrante dentro de la cuenca. También se pueden considerar registros diarios de las estaciones hidrométricas, lo cual permitirá conocer con mayor precisión el comportamiento del escurrimiento en periodos de tiempo más cortos.

De acuerdo con los resultados, es recomendable que en el proceso de calibración se verifique que el rango de datos propuesto por la herramienta SWAT-CUP esté en valores que realmente representen al medio físico. De lo contrario, es recomendable que este proceso se realice de forma manual ingresando a las tablas que genera el modelo y haciendo los cambios pertinentes en los parámetros más sensibles (curva numérica y conductividad hidráulica, principalmente). Este proceso se puede realizar para áreas específicas o para toda la cuenca.

Se pudo constatar que la modelación hidrológica-climática ofrece una buena opción para analizar lo que pudiera ocurrir con las variables hidrológicas ante variaciones en los patrones del clima. De igual manera, el uso de las proyecciones del cambio climático del IPCC constituye la línea base de las comparaciones con las situaciones hidrológicas en cuencas. La ventaja de utilizar escenarios de clima es que se tiene la posibilidad de diseñar estrategias de mitigación de impacto.

End of English version

References / Referencias

- 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>
- 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*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.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 American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1491-1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- 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>
- Braun, L., Weber, M., & Schulz, M. (2000). Consequences of climate change for runoff from Alpine regions. *Annals of Glaciology*, 31, 19-25. <https://doi.org/10.3189/172756400781820165>
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). (2020, July 15). *Base de datos climatológica nacional (Sistema CLICOM)*. <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Chang, J., Zhang, H., Wang, Y., & Zhang, L. (2017). Impact of climate change on runoff and uncertainty analysis. *Natural Hazards*, 88, 1113-1131. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2909-0>
- 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*, 11(7), 1398. <https://doi.org/10.3390/w11071398>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2018, April 2). *Estadísticas del agua en México*. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Cruz-Arévalo, B., Gavi-Reyes, F., Martínez-Menes, M. R., & Juárez-Méndez, J. (2021). Uso de suelo y su efecto en el escurrimiento modelado con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(2), 157-206. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-02-04>
- Con los datos obtenidos se pueden generar estrategias de adaptación y mitigación para mejorar el uso eficiente del agua de la cuenca y proponer alternativas de manejo sustentable en el uso del suelo y la vegetación a largo plazo. Otros estudios también señalan los impactos que tienen los cambios en los patrones del clima sobre la producción de escurrimientos; además, sugieren la necesidad de contar con datos observados de mayor calidad para los procesos de calibración, lo que sugiere un monitoreo hidrológico permanente y de calidad.

Agradecimientos

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de estudios de posgrado, así como al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias – Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera y a la Unidad Regional de Zonas Áridas (URUZA) de la Universidad Autónoma Chapingo.

Fin de la versión en español

- Daggupati, P., Pai, N., Ale, S., Douglas-Mankin, K. R., Zeckoski, R. W., Jeong, J., Parajuli, P. B., Saraswat, D., & Youssef, M. A. (2015). A recommended calibration and validation strategy for hydrologic and water quality models. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 58(6), 1705-1719. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10712>
- de Oliveira-Serrão, E. A., Madson-Tavares, S., Salviano-de Sousa, F., Meiguins-de Lima, A. M., dos Santos, C. A., Paiva-de Ataíde, L., & Rodrigues-da Silva, V. (2019). Four decades of hydrological process simulation of the itacaiunas river watershed, Southeast Amazon. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25(3), 1-3. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000300018>
- Enríquez-Licón, D. E., & Lorenzana-Durán, G. L. (2017). Las grandes presas en el río Yaqui (Sonora, México) y sus efectos socio-ambientales. *Revista de Sociología y Antropología*, 19(1), 165-188. <https://doi.org/10.17151/rasv.2017.19.1.9>
- Flores-Ortiz, C. M. (2016). Primera reunión nacional de zonas áridas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(1), 7-8. https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/39-1/reunion_zonas_aridas.pdf
- Fontes, R., & Montenegro, A. (2019). Impact of land use change on the water balance in a representative watershed in the Semiarid of the State of Pernambuco using the SWAT model. *Engenharia Agrícola*, 39(1), 110-117. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n1p110-117/2019>

- 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 American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(4), 1211-1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Gholami, A., Habibnejad-Roshan, M., Shahedi, K., Vafakhah, M., & Soleymani, 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>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O., (1999) Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2016, April 10). *Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación: escala 1:250 000, serie VI*. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019, April 10). *Continuo de elevaciones mexicano*. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (INIFAP–CONABIO). (1995, April 10). *Edafología: escalas 1:250000 y 1:1000000*. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/eda251mgw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis* (pp. 157). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. http://www.ipcc.ch/site/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Calentamiento global de 1.5 °C*. <https://www.riob.org/es/documentos/calentamiento-global-de-15-deg>
- López-Feldman, A. J., & Hernández-Cortes, D. (2016). Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El Trimestre Económico*, 83(332), 459-496. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31347950001>
- 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*, 67(4), 61-66. https://doi.org/10.2208/jscejhe.67.i_61
- Montecelos-Zamora, Y., Cavazos, T., Kretschmar, T., Vivoni, E. R., Corzo, G., & Molina-Navarro, E. (2018). Hydrological modeling of climate change impacts in a Tropical River Basin: A case study of the Cauto River, Cuba. *Water*, 10(9), 1-25. <https://doi.org/10.3390/w10091135>
- 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., González-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)
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2011). *Soil & water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute. <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>
- Niraula, R., Meixner, T., & Norman, L. M. (2015). Determining the importance of model calibration for forecasting absolute/relative changes in streamflow from LULC and climate changes. *Journal of Hydrology*, 522, 439-451. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.007>
- Niraula, R., Norman, L. M., States, U., Survey, G., & Meixner, T. (2012). Multi-gauge calibration for modeling the Semi-Arid Santa Cruz Watershed in Arizona-Mexico border area using SWAT. *Air, Soil and Water Research*, 5, 41-57. <https://doi.org/10.4137/ASWR.S9410>
- Norman, L. M., Callegary, J. B., Lacher, L., Wilson, N. R., Fandel, C., Forbes, B. T., & Swetnam, T. (2019). Modeling riparian restoration impacts on the hydrologic cycle at the Babacomari Ranch, SE Arizona, USA. *Water*, 11(2), 1-20. <https://doi.org/10.3390/w11020381>
- Norman, L. M., & Niraula, R. (2016). Model analysis of check dam impacts on long-term sediment and water budgets in Southeast Arizona, USA. *Ecology and Hydrobiology*, 16(3), 125-137. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2015.12.001>
- 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>
- Rivera-Toral, F., Pérez-Nieto, S., Ibáñez-Castillo, L. A., & Hernández-Saucedo, F. R. (2012). Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. *Agrociencia*, 46(2), 101-105. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30223121001.pdf>
- Sánchez-Cohen, I., Macías-Corral, M. A., Esquivel-Arriaga, G., Cerano-Paredes, J., Cabrera-Carbajal, F., Inzunza-Ibarra, M. A., Díaz-Padilla, G., & Guajardo-Panes, A. 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*, 34(2), 207-216. <https://doi.org/10.20937/ATM.52792>

- Sánchez-Cohen, I., Velásquez-Valle, M., Catalán-Valencia, E., Inzunza-Ibarra, M. A., Esquirol-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 – Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera.
- 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*, 14(2), 185-208. <https://doi.org/10.5154/rchsza.2015.07.007>
- 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>
- Torres-Benites, E., Fernández-Reynoso, D. S., Oropeza-Mota, J. L., & Mejía-Saenz, E. (2004). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca “El Tejocote”, Atlaconulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 437-444. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311096007.pdf>
- Veith, T. L., van Liew, M. W., Bosch, D. D., & Arnold, J. G. (2010). Parameter sensitivity and uncertainty in SWAT: A comparison across five USDA-ARS watersheds. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 53(5), 1477-1486. <https://doi.org/10.13031/2013.34906>
- 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/ii.25940732e.2017.18n3.030>