



Modelo hidrológico, calidad del agua y cambio climático: soporte para la gestión hídrica de la cuenca del río Soto la Marina

Hydrological model, water quality and climate change: support for the integral management of the Soto la Marina river watershed

Luis Antonio Vázquez-Ochoa¹, Alfonso Correa-Sandoval^{1*}, Rocío Del Carmen Vargas-Castilleja², María De La Luz Vázquez-Sauceda³, Jorge Homero Rodríguez-Castro¹

RESUMEN

La gestión del recurso hídrico es prioritaria en la agenda de la Organización de las Naciones Unidas. Tres vectores son esenciales, cantidad, calidad y escenarios del cambio climático en el recurso hídrico. En la región centro de Tamaulipas, México, destaca la red fluvial de la cuenca del río Soto la Marina, con los ríos Corona, Purificación y Pílon, como principales tributarios. En esta región existen importantes volúmenes de aguas residuales y otros vertimientos que ponen en riesgo las condiciones del sistema hídrico, particularmente de la presa Vicente Guerrero. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo hidrológico de disponibilidad y calidad del agua de la cuenca del río Soto la Marina (CRSLM) que considere el cambio climático mediante la regionalización de dos modelos de circulación global, los cuales son los más cercanos a la latitud en que se encuentra la cuenca (GFDL-CM3 y HAGDGEM2-ES), usando dos vías de concentración representativas (RCP): 4.5 y 8.5 con proyección al año 2100, con el propósito de analizar el comportamiento de la cuenca, a efecto de simular la vulnerabilidad hídrica. Se evaluó la calidad del sistema espacio-temporal: avenidas y sequías, mediante la determinación de demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y oxígeno disuelto, además de temperatura, en 15 sitios de la cuenca del río Soto la Marina, con modelado del abatimiento del oxígeno disuelto. Se elaboraron vectores de hidrología, monitoreo y calidad del agua. Las concentraciones de los contaminantes valorados presentaron un incremento en la presa Vicente Guerrero, aunque su comportamiento estacional fue más sensible en estiaje que en avenidas. En las simulaciones con el modelo construido WEAP con escenarios de cambio climático se predijeron resultados más conservadores en periodo de estiaje que en época de avenidas, siendo el RCP 4.5 W/m² para el modelo el GFDL-CM3 la proyección más adversa.

PALABRAS CLAVE: WEAP, hidrología, calidad del agua, cambio climático, modelación.

ABSTRACT

The management of water resources is a priority on the agenda of the United Nations. Three vectors are essential, quantity, quality, and climate change scenarios in water resources. In the central region of Tamaulipas, México, the fluvial network of the Soto la Marina river watershed stands out, with the Corona, Purificación and Pílon rivers as the main tributaries. In this region there are significant volumes of wastewater and other discharges that put the conditions of the water system at risk, particularly of the Vicente Guerrero dam. The objective of this work was to develop a hydrological model of water availability and quality of the Soto la Marina river watershed (CRSLM) that considers climate change through the regionalization of two global circulation models, which are the closest to the latitude in which the watershed is located (GFDL-CM3 and HAGDGEM2-ES), using two representative concentration routes (RCP): 4.5 and 8.5 with projection to the year 2100, with the purpose of analyzing the watershed behavior, in order to simulate water vulnerability. The quality of the spatial-temporal system was evaluated: floods and droughts, by determining the biochemical oxygen demand, chemical oxygen and dissolved oxygen demand, as well as temperature, in 15 sites of the Soto la Marina river watershed, with modeling of the abatement of dissolved oxygen. Vectors for hydrology, monitoring and water quality were developed. The concentrations of the measured pollutants showed an increase in the Vicente Guerrero dam, although their seasonal behavior was more sensitive in low water levels than in floods. In the simulations with the WEAP built model with climate change scenarios, more conservative results were predicted in the dry season than in the rainfall season, with the RCP 4.5 W / m² for the GFDL-CM3 model being the most adverse projection.

KEYWORDS: WEAP, hydrology, water quality, climate change, modeling.

*Correspondencia: alf_correas@hotmail.com / Fecha de recepción: 27 de noviembre de 2020 / Fecha de aceptación: 14 de julio de 2021 / Fecha de publicación: 27 de julio de 2021.

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Boulevard Emilio Portes Gil núm.1301 Poniente, Apartado Postal 175, Ciudad Victoria, Tamaulipas, C. P. 87010. ²Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería Arturo Narro Siller, Tampico, Tamaulipas, México. ³Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.

INTRODUCCIÓN

La planeación del recurso hídrico respecto a la disponibilidad es un tema prioritario debido a que se puede comprometer el suministro de agua de una región o país, limitando con ello el desarrollo social y económico de la población, considerando que el estrés hídrico de los últimos años se ha elevado de forma crítica en las cuencas hidrográficas por el incremento de la demanda constante de agua (Moncada y col., 2020). Aunado a lo anterior, se hallan los cambios sociales como el crecimiento de la población, urbanización, y las políticas basadas en enfoque económico sin medida del consumo del recurso hídrico, ni conciencia del deterioro de la calidad del agua, misma que se vierte en los mismos cuerpos sobre los que se demanda nuevamente el recurso de acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 2020), además de la incertidumbre del cambio climático, lo que está provocando cambios sustanciales en la demanda y la conservación del agua. Las condiciones mencionadas afectarán todos los sectores productivos y sociales, los cuales se encuentran estrechamente relacionados con el equilibrio de los ecosistemas, requiriendo una comprensión holística y definición de las interdependencias existentes (Schull y col., 2020).

La disponibilidad del agua de los cuerpos superficiales del norte de México es limitada por su condición de aridez y bajas precipitaciones, acentuada por efecto del cambio climático, por lo que para proponer estrategias que minimicen estos efectos, es fundamental evaluar sus implicaciones y entender perfectamente su evolución logrando estructurar un plan de manejo exitoso (Silva-Hidalgo y col., 2017).

Los ríos, presas y lagos del mundo han sido usados como los grandes vertederos de residuos provenientes de las actividades industriales, agropecuarias y domésticas (Chapra, 1997). En México se estima que más del 52.7 % de las aguas residuales que se generan no llegan a recibir algún tratamiento previo a su disposición (Conagua, 2015). Existe notoria nece-

sidad de conjugar la gestión de los sistemas de recursos hidráulicos, donde la calidad del agua tiene gran importancia, ya que la mala calidad del agua afecta directamente a las personas que dependen de estas fuentes como su principal suministro, limitando aún más su acceso al agua (es decir, la disponibilidad de agua) y aumentando los riesgos para la salud relacionados con el agua, sin mencionar su calidad de vida en general (UNESCO, 2019). Sin embargo, para ello es ineludible unir las herramientas más competentes y de uso actualizado de simulación de parámetros como el oxígeno disuelto y la demanda de oxígeno, entre otros (Jingshui y col., 2017).

Haciendo énfasis en las cuencas hidrológicas de las costas mexicanas, es importante mencionar que estas representan un foco de atención especial debido a que la mayor parte de la población se concentra en estas zonas. En este caso el área de estudio resulta vulnerable, ya que se localiza en la planicie costera del estado de Tamaulipas y, por su actividad económica, depende de las condiciones climáticas en cuanto al rendimiento de producción (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2017). Por otro lado, la Estrategia Nacional de Cambio Climático (Semarnat, 2013) establece una visión a corto, mediano y largo plazo para mitigar sus efectos con enfoque en la sustentabilidad del agua, debido a que se deberán atender los recursos más vulnerables, así como desarrollar la infraestructura adecuada para reducirlos.

Como instrumentos para el fortalecimiento de la problemática descrita, existen herramientas informáticas mediante las cuales se desarrollan modelos para la simulación de diversos factores como la hidrología, calidad del agua y cambio climático, entre otros. Un *software* ampliamente usado a nivel mundial por su fiabilidad es el sistema de evaluación y planificación del agua (WEAP, por sus siglas inglés: water evaluation and planning system) (Jaramillo y col., 2016), que opera bajo el modelo de balance hídrico. Sus algoritmos permiten la planificación de recursos hídricos balanceando la disponibilidad de agua y la demanda, lo

cual ha permitido analizar los efectos de cambio climático en la disponibilidad del recurso en diferentes lugares del mundo tales como California, Sri Lanka, Grecia, Corea, Brasil, Norte de África, Perú al igual que en México, en donde existe una importante experiencia en la cuenca del río Soto la Marina perteneciente al estado de Tamaulipas (Hervis-Granda y col., 2017).

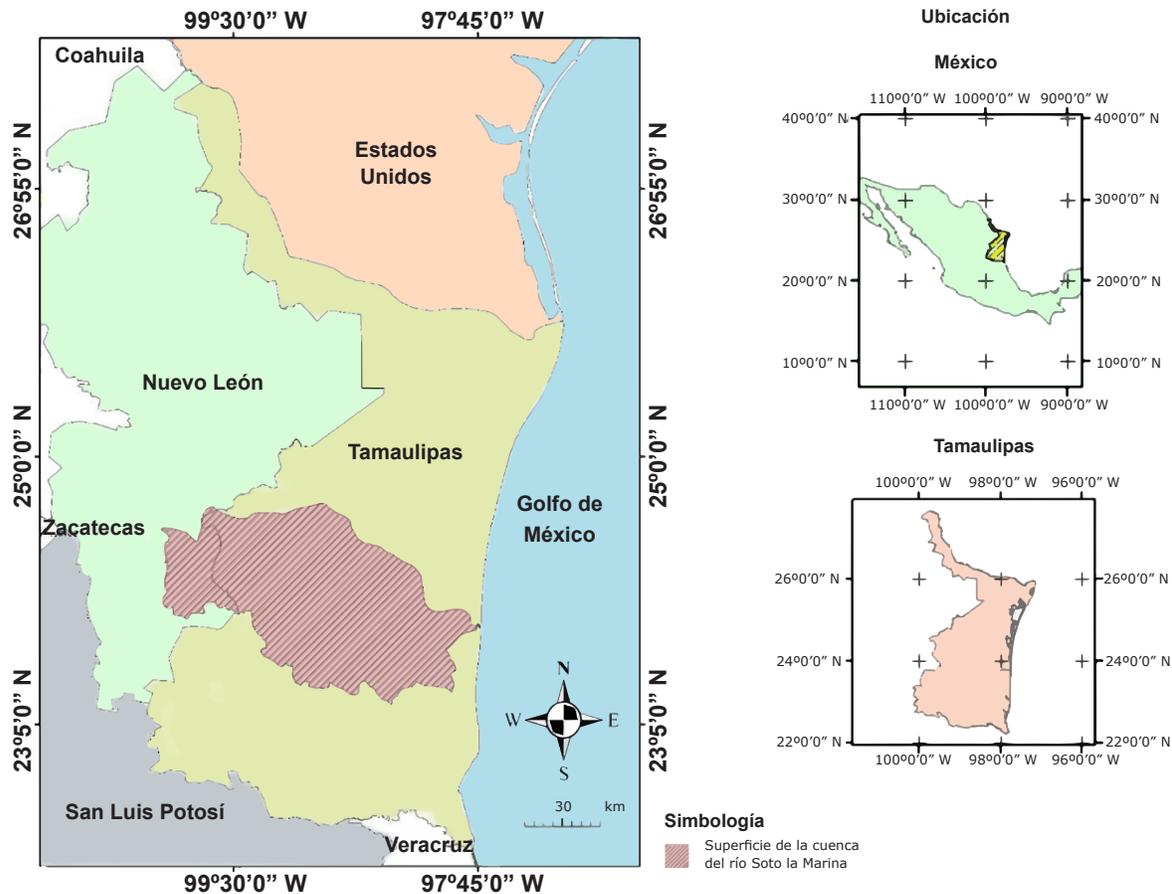
El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo hidrológico y de calidad del agua en la cuenca del río Soto la Marina que considere el cambio climático mediante la regionalización de dos modelos de circulación global, los cuales son los más cercanos a la latitud en que se encuentra la cuenca del río Soto la Marina (GFDL-CM3 y HAGDGEM2-ES), usando dos vías de concentración representativas

(RCP): 4.5 W/m² y 8.5 W/m², con una proyección al año 2100, con el propósito de conocer el comportamiento de la cuenca del río Soto la Marina a efecto de simular la vulnerabilidad respecto a la disponibilidad y calidad del agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La cuenca del río Soto la Marina (CRSLM) (Figura 1) se localiza en la Región Hidrológica 25 (RH25) San Fernando-Soto la Marina, que nace en la vertiente este de la Sierra Madre Oriental, donde confluyen los ríos Purificación y Corona. Fluye en dirección este, hacia el golfo de México y luego de cruzar la zona norte de la sierra de Tamaulipas, atraviesa el cañón de Boca de la Iglesia. En su curso superior el río Soto la Marina es llamado río Blanco y río Purificación, transitando con dirección oriente hasta



Fuente: Conagua, 2017.

■ Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Soto la Marina en el noreste de México.

Figure 1. Soto la Marina river watershed location in northeastern Mexico.

las inmediaciones de las llanuras costeras donde tributa el arroyo de Jiménez; siguiendo con dirección sur hacia la localidad de Soto la Marina donde se unen las aguas del arroyo las Palmas. La RH25 tiene un área de aportación de 56 928 km², por lo que la CRSLM representa el 37.2 % de la superficie total de la RH25, de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua, siendo sus principales componentes hidrográficos los señalados en la Tabla 1 (Conagua, 2017).

La cuenca del río Soto la Marina cubre una superficie territorial de 87.9 % dentro del estado de Tamaulipas (Figura 1) y 12.1 % dentro del estado de Nuevo León (Conagua, 2017).

En la cuenca del río Soto la Marina, el escurrimiento natural medio superficial es de 2 086 millones de m³ al año y la longitud del propio río Soto la Marina es de 416 km. La cuenca tiene una superficie de 21 185 km², de acuerdo con la información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).

Metodología

La validez y utilidad del desarrollo de este trabajo están en función de las condiciones del modelamiento y la elección de los sitios de muestreo. Se evaluó la evolución de la calidad del sistema espacio-temporal mediante la determinación analítica de 3 parámetros: oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y demanda química de oxígeno (DQO), en 15 sitios de la cuenca alta del río Soto la Marina, en períodos estacionales a partir de abril del 2018 y hasta febrero de 2019, utilizando para ello una

sonda multiparamétrica (marca Hanna modelo HI 9829, Estados Unidos de Norteamérica) y los métodos analíticos estándar.

Se desarrollaron los trabajos en vectores de hidrología, monitoreo y calidad del agua, así como regionalización de modelos globales de cambio climático con el propósito de valorar las condiciones de la cuenca. El primer paso fue estimar el escurrimiento natural de la cuenca alta del río Soto la Marina por el método del Servicio de Conservación del Suelo (SCS, por sus siglas en inglés: soil conservation service), ahora llamado Servicio de Conservación de Recursos Naturales, usado por el Gobierno de los Estados Unidos de América para valoraciones hidrologías (US Department of Agriculture, 1972), a efecto de comparar los resultados con el procedimiento oficial descrito por la norma oficial mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 que establece el procedimiento para estimar la disponibilidad media anual de aguas superficiales a cargo de la Conagua.

Se requirió de una serie de actividades de campo, laboratorio y gabinete para conocer detalladamente bancos de datos de hidrometría y climatología, particularmente de las estaciones: Corona (23°56'30" N; 98°57'07" W), Padilla II (24°02'10" N; 98°53'30" W), Paso de Molina II (23°45'22" N; 98°44'22" W), Paso de Aura (23°38'30" N; 98°04'45" W) y Soto la Marina (23°57'48" N; 98°38'40" W), donde los escurrimientos que se presentan van desde los 309.97 m³/s registrados en la estación Soto la Marina durante el impacto de un fenómeno hidrometeorológico en septiembre de 2013, has-

■ **Tabla 1. Conformación de la cuenca del río Soto la Marina.**

Table 1. Soto la Marina river watershed conformation.

Fracción de la cuenca del río Soto la Marina (Superficies en km ²)		Componentes de la cuenca alta (Superficies en km ²)	
Cuenca baja	3 928.88	Río Pilón	1 508.20
Cuenca Media	7 265.68	Río Purificación	384.13
Cuenca Alta	6 482.67	Río Blanco	2 885.68
		Río Corona	1 704.66

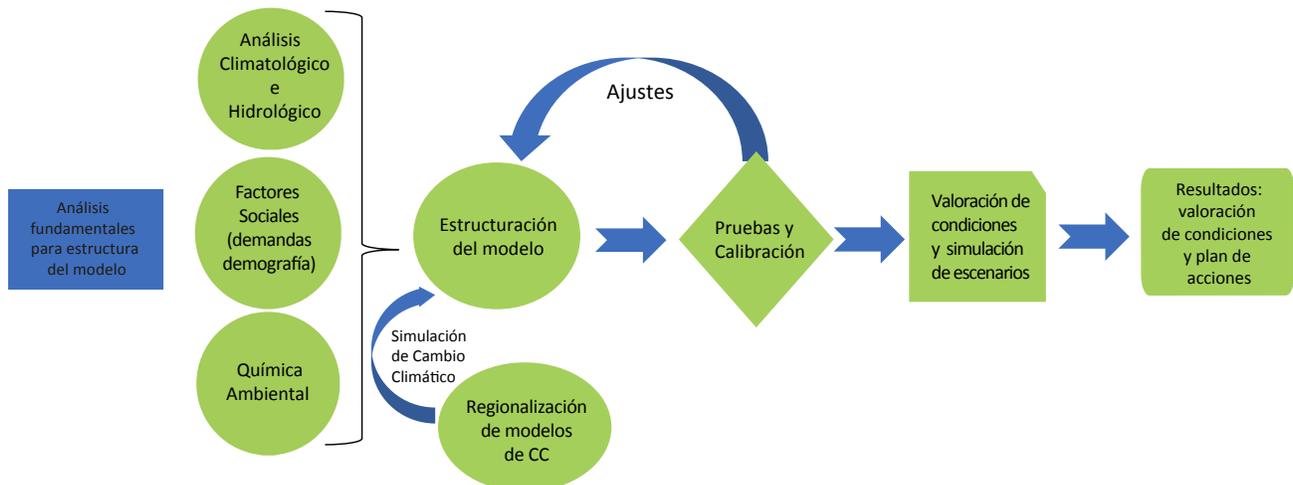
ta un nulo escurrimiento en temporada de estiaje en todas las corrientes; así como de su configuración, superficies de cada tramo que la constituye, población de cada municipio, índices de desarrollo poblacional, demandas de agua y demás información que se encuentra disponibles en sitios oficiales como el INEGI (2010); Consejo Nacional de Población (Conapo, 2015); Conagua (2019); Servicio Meteorológico Nacional (2019), entre otras instancias; información que se incorpora para alimentar la modelación de acuerdo con el diagrama metodológico que ilustra el proceso desarrollado (Figura 2).

Adicionalmente, para consolidar el modelo y realizar simulaciones de cambio climático de la CRSLM, se requirió fundamentalmente del *software* especializado en simulaciones de planeación integrada de recursos hídricos que incluye hidrología, calidad del agua, cambio climático y preservación de ecosistemas; conocido como (WEAP, por sus siglas en inglés: Water Evaluation and Planning System) versión 2019.2, WEAP ofrece una selección de tres métodos para simular procesos hidrológicos de la cuenca: un método de solo demanda de riego, un método de lluvia y escorrentía y un método de humedad del suelo (Sahukhal y Tri-Ratna, 2019).

Para la obtención de datos, las fuentes de información consultada para el desarrollo de este proyecto, como climatología, hidrometría, censos de población, suelos, vegetación y concesiones de agua fueron las siguientes:

- Superficies y límites geográficos de la cuenca para cada una de las 13 subcuencas en que se divide; como lo señala el acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos en la Subregión Hidrológica Río Soto La Marina de la Región Hidrológica número 25 San Fernando-Soto la Marina, publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 7 de julio de 2016.
- Banco climatológico del SMN, base de datos conocida como Proyecto Computación Climática (CLICOM, por sus siglas en inglés: CLImate COMputing Project) de la red de estaciones ubicadas en la cuenca alta del río Soto la Marina en el periodo 1981 a 2010.
- Banco de datos de información hidrométrica de la Conagua (BANDAS), de las estaciones ubicadas en la cuenca alta del río Soto la Marina en el periodo 1981 a 2010 que forman parte de la información técnicamente validada.

Conceptualización metodológica



■ **Figura 2. Diagrama metodológico.**
 Figure 2. Methodological diagram.

- Base de datos de WorldClim – Global Climate en una rejilla sobre la cuenca alta del río Soto la Marina, que de acuerdo con Hijmans y col. (2005), la climatología base del WorldClim está organizada en superficies de clima interpolado para todo el globo con una resolución muy aceptable de 0.5 °C. Las variables que incluye son temperaturas media, máxima y mínima y precipitación, todas mensuales; del periodo 1950 a 2010.

- Banco de información de los resultados de la Red Nacional de Monitoreo de la Conagua, específicamente de estaciones de calidad de aguas superficiales disponibles en la cuenca alta del río Soto la Marina.

- Bancos de información y cartografía escala 1:50 000 de INEGI y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) sobre características edafológicas: tipos de suelo y vegetación en la CRSLM.

- Banco de información del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) de la Conagua, donde se establecen los volúmenes concesionados y de extracción por corriente por usos consuntivos: Público-Urbano, Servicios, Industrial, Agrícola, Pecuario y agua en bloque para los distritos y unidades de riego que operan en esta cuenca.

- Resultados del INEGI sobre los censos de población y vivienda de los años 2010 y el conteo 2015.

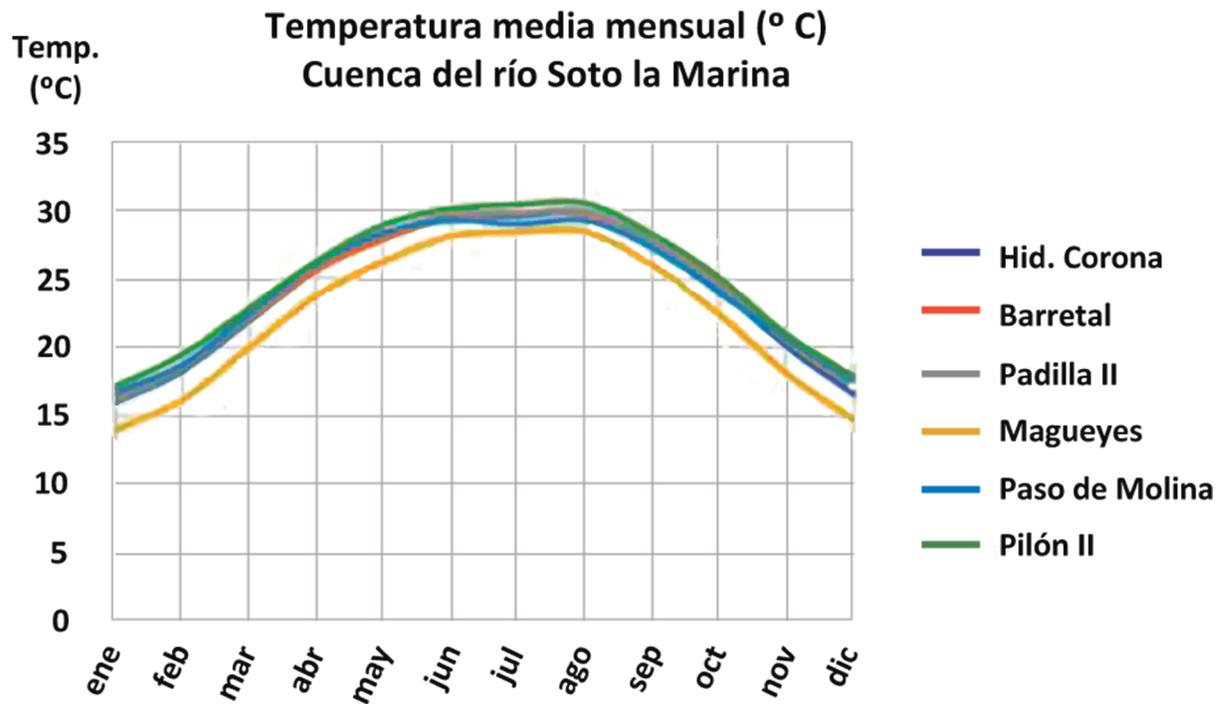
Estimación de los escurrimientos en la cuenca

Debido a que no existe un banco de mediciones hidrométricas con cobertura en toda la cuenca, se utilizó la técnica de estimación del escurrimiento natural por la metodología del Servicio de Conservación del Suelo (Lal y col., 2017), que es el procedimiento útil para este propósito, referenciado en el Manual Nacional de Ingeniería del SCS, desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Se realizó el análisis de los factores que determinan el escurrimiento, tales como:

precipitación, vegetación, evapotranspiración y tipo de suelo (US Department of Agriculture, 1972).

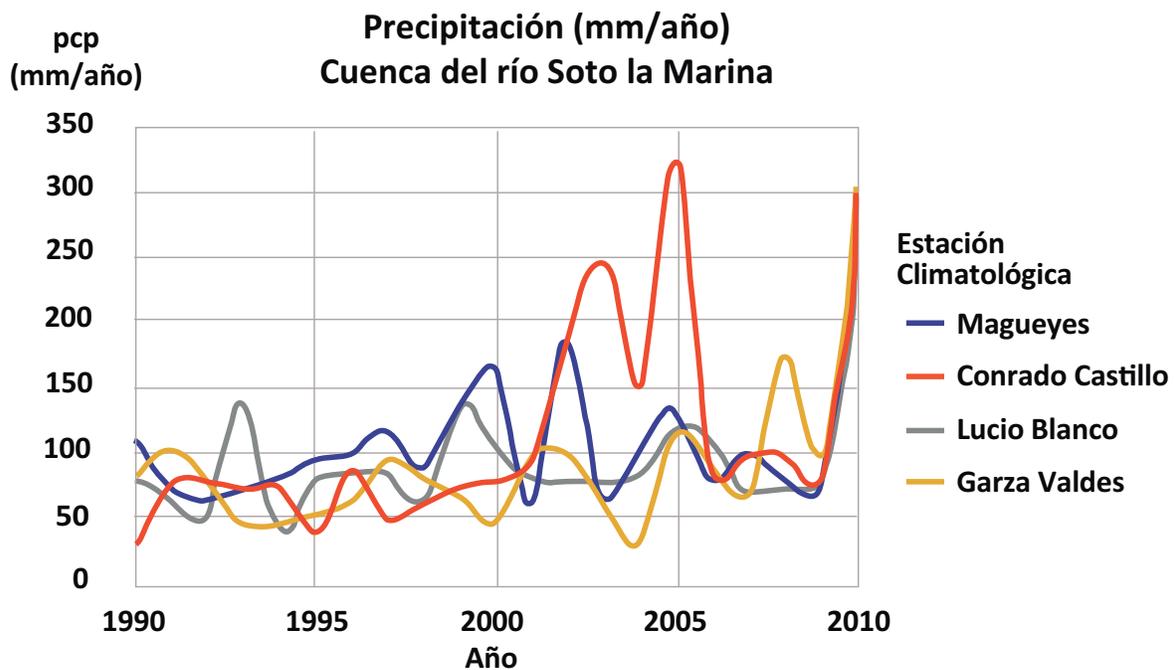
El análisis climatológico se llevó a cabo mediante la base de datos mundial (Global Climate) organizada en superficies de clima interpolado con resolución de 0.5 °C, información que se verificó con la proporcionada por el SMN de la Conagua, la base de datos CLICOM, en el periodo 1981 a 2010, donde se determina para cada subcuenca las temperaturas y precipitaciones medias mensuales; con resultados cercanos entre ambas fuentes de información. La Figura 3 muestra el comportamiento gráfico de la temperatura media en estaciones representativas del norte de la cuenca que oscilan entre los 14 °C y 32 °C, mientras que en la Figura 4 se observa una gran amplitud los datos de precipitación media mensual que varía desde los 40 mm/a hasta los 320 mm/a. Definidas, revisadas y analizadas las variables anteriores, se calculó el escurrimiento natural usando el método del SCS para estimar el gastomedio mensual.

Para este tipo de análisis hidrológico, se establece un estándar de clasificación de los suelos definidos en cuatro grupos, los cuales pueden ser A, B, C o D, donde el grupo A considera suelos de mínimo potencial de escurrimiento y el D con potencial de escurrimiento más alto. Para poder definir al suelo, su clasificación, se toma en cuenta su composición, su textura y la profundidad del nivel freático. El factor CN (número de curva que define la precipitación efectiva de una tormenta) se determinó en función de la velocidad de infiltración de la lluvia que puede ser rápida (en arenas) calificada como A (superior a 76 mm/h); o bien B (de 76 mm/h a 37 mm/h); C (menor de 37 mm/h a 13 mm/h) y hasta D, si se trata de arcillas de muy lenta infiltración (menor a 13 mm/h); y hasta una selección de 18 posibles clasificaciones de tipo de suelo. La construcción del modelo hidrológico conformó las variables: gasto o volumen de escurrimiento (aguas arriba), precipitación, evaporación, escurrimiento por cuenca propia, flujos de retorno, gastos de tri-



Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, 2019.

■ Figura 3. Temperatura media mensual en estaciones operadas por SMN (periodo 1981-2010).
Figure 3. Average monthly temperature in stations operated by SMN (1981-2010 period).



Fuente: Servicio Meteorológico Nacional 2019.

■ Figura 4. Precipitación registrada en la cuenca del río Soto la Marina en período 1981-2010 .
Figure 4. 1981-2010 Soto la Marina river basin precipitation records.

butarios y volumen comprometido (aguas abajo), volúmenes de extracción (usos del agua), evapotranspiración, caudal ecológico, volúmenes de exportación (salidas). Finalmente, la calibración del modelo se realizó manualmente a prueba y error, por comparación de mediciones de hidrometría directas de manera que se ajustaron los factores permisibles del modelo como capacidad del suelo, evapotranspiración, factor del suelo entre otros (Vieira y Solis, 2017).

Muestreos y análisis de calidad del agua

Debido a la escasez de información en calidad del agua y la modelación de ella en la cuenca alta del río Soto la Marina, se desarrollaron campañas de muestreo durante todo un año que se distribuyen en vectores espacio-temporal para cubrir los ríos tributarios: Corona, Purificación y Pilon, así como la presa Vicente Guerrero. Para la elección de los sitios de muestreo, se consideraron las condiciones del río a evaluar (Jingshui y col., 2017). Estos aspectos son los trabajos previos de reconocimiento de la zona; identificación de los usos de ríos, embalses y en general, de los cuerpos de agua superficiales; conocimiento de los flujos, interconectividad del sistema y aportaciones de descargas; reconocimiento de características de las descargas (contaminantes), para selección de los parámetros y técnica de preservación de las muestras y plan logístico de desarrollo de muestreos.

Una vez que se realizó el estudio de las zonas, se definió una red de sitios de muestreo de los principales cuerpos de agua de la CARSLM para la generación de información de calidad (Borges y col., 2017). Debido a información insuficiente, se realizaron muestreos dobles bimestrales (los meses de abril, junio, agosto, octubre y diciembre de 2018 y cerrando el ciclo de muestreo en febrero de 2019) con el propósito de cubrir una réplica de la condición de calidad del agua en su origen (sitios de referencia antes de descargas) hasta los sitios sujetos a estrés hídrico por vertimientos de aguas residuales, cubriendo prácticamente toda la CARSLM, determinando los parámetros DBO₅, DQO, OD y temperatura. En esta red de muestreo se seleccionaron 15 sitios (Figura 5) ubicados en

los ríos Corona, Purificación y Pilon, así como la presa Vicente Guerrero, donde se colectaron y analizaron durante un período anual las muestras superficiales (Tabla 2).

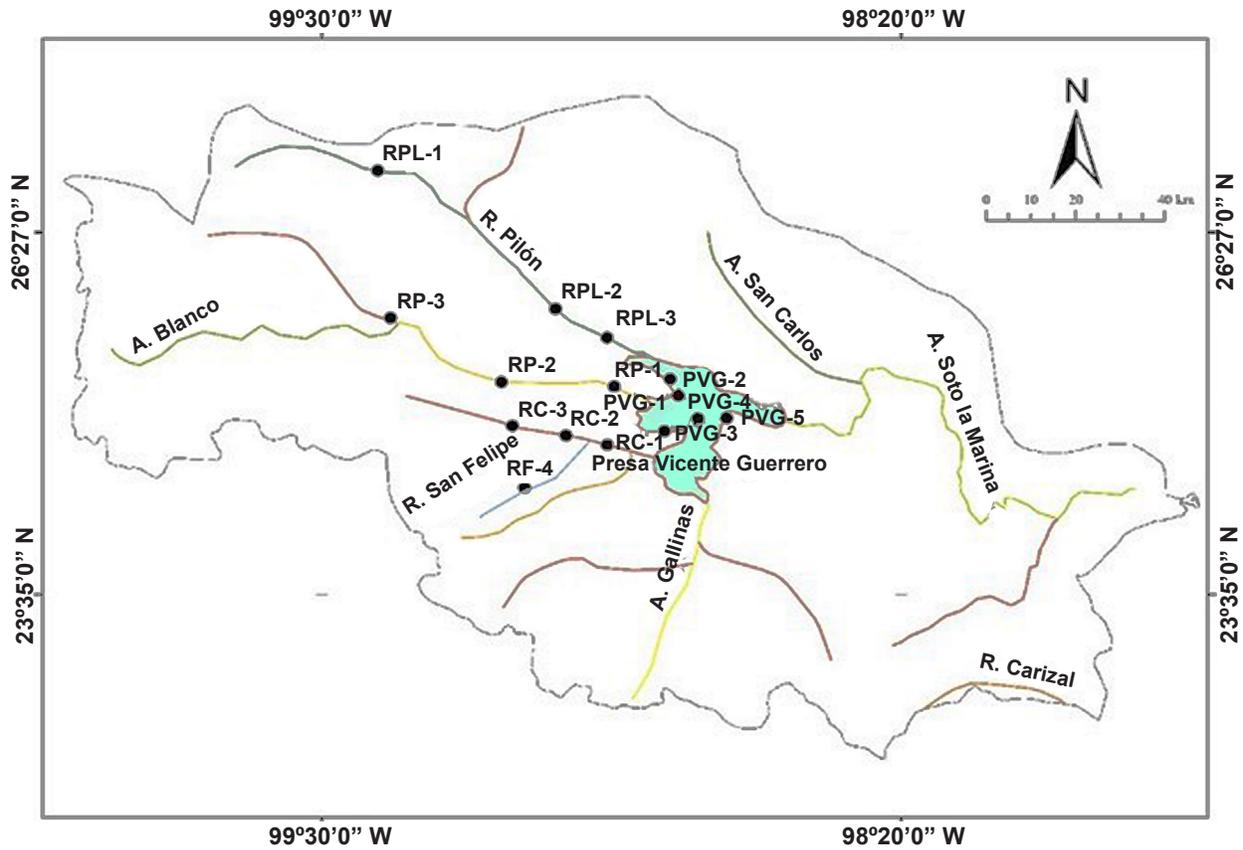
Análisis de calidad del agua

Los parámetros que se determinaron en el sistema, así como la vinculación con las normas oficiales en materia de calidad del agua fueron: pH (NMX-AA-008-SCFI-2016), temperatura (NMX-AA-007-SCFI-2013), DBO (NMX-AA-028-SCFI-2001), DQO (NMX-AA-030/1-SCFI-2011), oxígeno disuelto (NMX-AA-012-SCFI-2001); las técnicas analíticas están referenciadas en APHA-AWWA-WEF Standard Method to the Examination of Water and Wastewater 23 st edition (Aird y col., 2017).

El *software* WEAP en su versión educativa, incluye los módulos con reacciones conservativas, reacción DBO lenta y DBO rápida, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto en sus conceptos de demanda, oxígeno de saturación, reaireación natural y forzada (Chapra y col., 2012), no obstante, solo se determinó el oxígeno disuelto convencional y la DBO₅ total en esta valoración, que son los métodos referenciados en la normativa nacional (citados en párrafo que antecede), está basada en los métodos estándar, que desde 1905 son las normas de referencia estandarizadas internacionalmente para desarrollar los análisis de calidad del agua.

Existen una gran variedad de modelos de calidad del agua, sin embargo, se aplica el modelo de dispersión unidimensional (Streeter y Phelps) que refiere la interrelación entre temperatura, volúmenes y concentraciones de OD y DBO (Chapra y col., 2012). Se aplica el modelo que relaciona la biooxidación de materia orgánica y consumo de OD, establecido en las siguientes funciones diferenciales: ecuación 1; ecuación 2 y ecuación 3.

Se puede apreciar de las ecuaciones 1, 2 y 3, que la función de la razón de cambio de la DBO (biooxidación) dependiente de la cinética, factores y características de la corriente que se observa en la ecuación 1:



■ Figura 5. Localización geográfica de los sitios de muestreo.
 Figure 5. Geographical location of the sampling sites.

■ Tabla 2. Denominación de las estaciones de muestreo de calidad del agua.
 Table 2. Designation of the water quality sampling stations.

Sitio de Muestreo		
Clave	Nombre	Descripción
RC-1	Río Corona - Final	A 2 460 m. aguas abajo del puente sobre carretera Victoria-Matamoros
RC-2	Río San Felipe - Tributario del RC	Sobre acceso al poblado Güémez
RC-3	Río Corona - Testigo Medio	Sobre puente de la carretera Victoria-Monterrey
RF-4	Río Corona - Testigo	Carretera Interejidal - Aguas arriba del ejido El Alamito
RP-1	Río Purificación - Final	Puente carretero poblado Nuevo Padilla
RP-2	Río Purificación - Medio	Sobre puente carretero del poblado El Barretal
RP-3	Río Purificación -Testigo	11 km antes del El Tomaseño. Por poblado y a 2 km aguas arriba del río
RPL-1	Río Pilon - Testigo	A 10 km al norte de Villagrán por la brecha a Garza Valdés
RPL-2	Río Pilon - Medio	Carretera La Soledad-San Carlos 15.73 km al norte (Camacho Viejo)

Continúa...

RPL-3	Río Pilón - Final	Carretera Victoria-Matamoros a 6.5 km al norte de Nuevo Padilla
PVG-1	Presa Vicente Guerrero-confluencia río Pilón	Acceso fluvial. Ubicación con apoyo de GPS
PVG-2	Presa Vicente Guerrero-confluencia río Purificación	Acceso fluvial. Ubicación con apoyo de GPS
PVG-3	Presa Vicente Guerrero-confluencia río Corona	Acceso fluvial. Ubicación con apoyo de GPS
PVG-4	Presa Vicente Guerrero-Centro	Acceso fluvial. Ubicación con apoyo de GPS
PVG-5	Presa Vicente Guerrero-Cortina	Acceso fluvial. Ubicación con apoyo de GPS

$$V \frac{dL}{dt} = -Kd VL - Ks VL = -Kr Vl \dots \dots (Ec. 1)$$

donde “L” representa la variación de la concentración como DBO en el tiempo “t”, que depende del volumen del sistema “V” o flujo volumétrico (también conocido como gasto de la corriente), de las constantes de desoxigenación (Kd), saturación (Ks) y reoxigenación (Kr). La constante de desoxigenación Kd toma valores de entre 0.46 d hasta los 0.942 d, las mayores tasas de esta constante favorecen sobre estos ríos la biooxidación de la carga de DBO5 y el consecuente abatimiento y recuperación del OD (Jingshui y col., 2017).

Por otro lado, el fenómeno de degradación por oxidación biológica demanda un ejercicio de consumo de oxígeno que resulta crítico para algunas corrientes, dependiendo de sus condiciones, queda expresado en la ecuación 2:

$$V \frac{dO}{dt} = -Kd VL + Ka V(Os - O) \dots \dots (Ec. 2)$$

Esta función diferencial, al igual que la anterior, dependen de la variación del OD en el tiempo, que es una función de dichas constantes de transferencia de oxígeno y de la capacidad de saturación del OD. En esta función es importante destacar que el término (Os - O) refiere a un déficit de oxígeno.

Finalmente, se puede evaluar el déficit de oxígeno de la corriente en estudio considerando que $D = (Os - O)$, y en el caso particular de sus

condiciones iniciales, es decir cuando $t = to$, también: $L = Lo$ y $D = Do$, queda expresada la ecuación 3:

$$D = Do e^{-Ka t} + \frac{Kd Lo}{Ka - Kr} [e^{-Kr t} - e^{-Ka t}] \dots (Ec. 3)$$

cuya curva es importante, ya que determina la recuperación natural del sistema en función de todas las variables involucradas (Chapra, 1997), lo que puede representar riesgos para la vida acuática cuando se ejerza OD por debajo de la concentración de 4.0 mg/L establecida como mínima para conservación de la vida acuática.

Aplicación de modelos de cambio climático

Se espera que los cambios de precipitación proyectados durante el siglo XXI aumenten en las regiones tropicales y en latitudes altas y disminuyan en las regiones subtropicales asociadas con las expansiones proyectadas hacia los polos (IPCC, 2007). Se prevé que el cambio total de humedad del suelo disminuya en las latitudes altas del hemisferio norte y aumente en África Central y Asia, mientras que la humedad del suelo cerca de la superficie tiende a disminuir en la mayoría de las áreas de acuerdo con el aumento del calentamiento y la evaporación (Informe de Cambio Climático, 2014).

Respecto a la valoración de los efectos del cambio climático en la CRSLM, se trabajó con dos Modelos de Circulación General; el primero de ellos es el modelo establecido por Estados Uni-

dos de América denominado GFDL-CM3 y el modelo inglés, HAGDGEM2-ES; ambos modelos se regionalizaron para su aplicación, incorporándolos en la construcción del modelo en WEAP como escenarios con cambio climático (Abdallah y Rosenberg, 2019), para conocer las proyecciones futuras del comportamiento hidrológico de la cuenca.

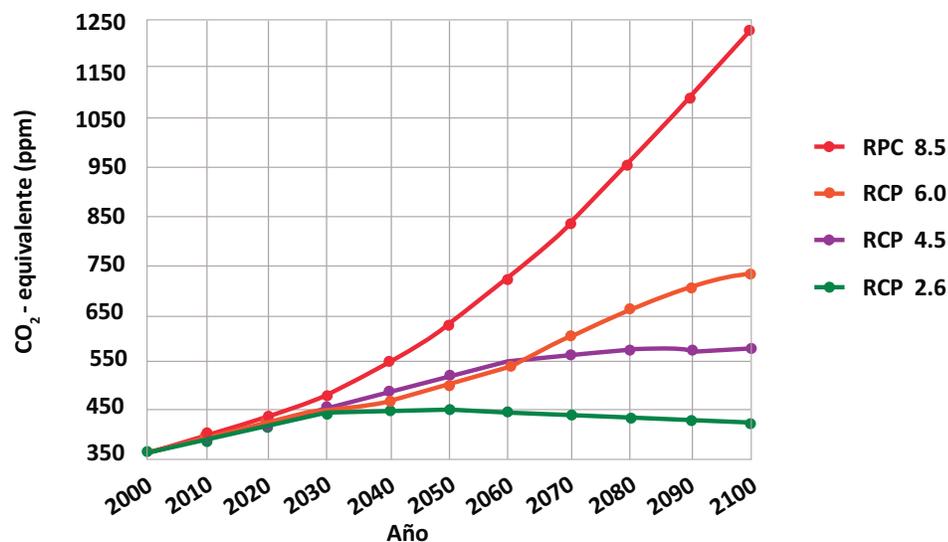
Para estructurar el modelo y escenarios, se consideran tres vectores; la determinación del escurrimiento natural a partir de registros de información hidroclimatológica, la aplicación de los escenarios de cambio climático para simular las condiciones base o actuales y las condiciones futuras con los datos (Mishra y col., 2017).

Las vías de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés: representative concentration pathways), utilizadas en este trabajo para identificar los escenarios de cambio climático se consideraron que son rutas de concentraciones de gases de efecto invernadero adoptadas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés: intergovernmental panel on climate change) dependiente de las Nacio-

nes Unidas, que tienen el objetivo de proporcionar al mundo información científica para comprender los riesgos e impactos del cambio climático (Papas y Fellow, 2017). Las RCP propuestas mundialmente son 2.6 W/m^2 ; 4.5 W/m^2 ; 6.0 W/m^2 y 8.5 W/m^2 (Figura 6). Este proyecto tomó en cuenta los forzamientos 4.5 W/m^2 y 8.5 W/m^2 para los dos Modelos de Circulación General mencionados anteriormente. Se tiene que precisar la que la variabilidad climática representa fenómenos naturales de la variabilidad del clima dentro de rangos típicos de su medición histórica en un lugar determinado, lo que no implica cambio climático. Cabe precisar que existen muchos estudios que intentan abordar el problema desde diferentes perspectivas científicas e institucionales, sin embargo, ninguno de ellos explora los diferentes extremos (no debe confundirse con eventos extremos como sequías e inundaciones) que podrían realizarse a partir de conjunto de proyecciones climáticas disponibles y por comparativa de sus modelos (Sridharan y col., 2019).

Diseño y estructura del modelo en WEAP

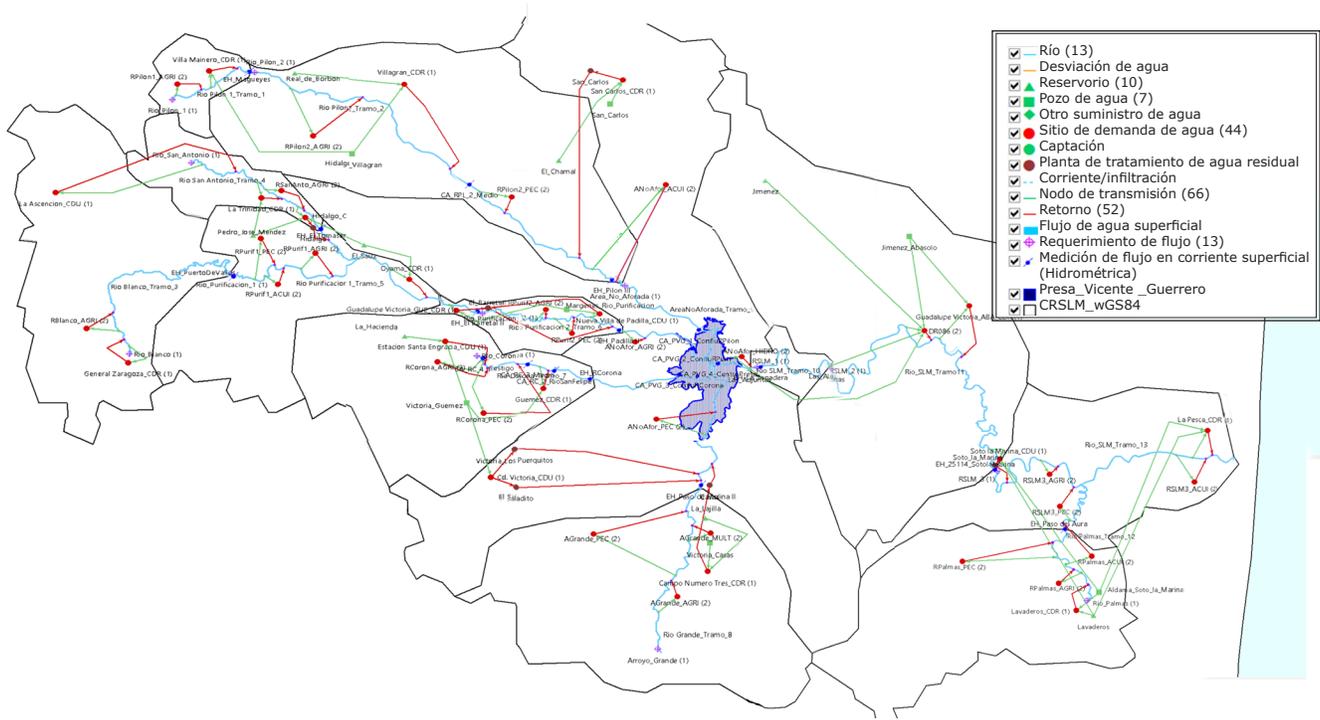
Con las ecuaciones del balance hidrológico, WEAP calcula un balance de masa de agua pa-



Fuente: Quinto informe de evaluación del IPCC sobre predicciones de Cambio Climático.

■ Figura 6. Proyecciones de la concentración global de CO_2 (en ppm) en el periodo 2000 a 2100.

Figure 6. 2000 to 2100 CO_2 (in ppm) global concentration projections.



■ **Figura 7. Construcción del modelo digital en WEAP de la cuenca de estudio.**
 Figure 7. Construction of the digital model in WEAP of the study watershed.

ra cada nodo y enlace en el sistema en un intervalo de tiempo mensual (Figura 7). Para determinar el flujo de agua en las corrientes, se consideran los sitios de demanda, flujos de retorno y estimación del caudal natural previamente analizado con el método SCS. Así mismo, permite modelar cargas puntuales de contaminación en los cuerpos receptores de descargas y sus concentraciones de calidad del agua considerando un modelo unidimensional de la DBO5 y el OD (Ramadan y col., 2019).

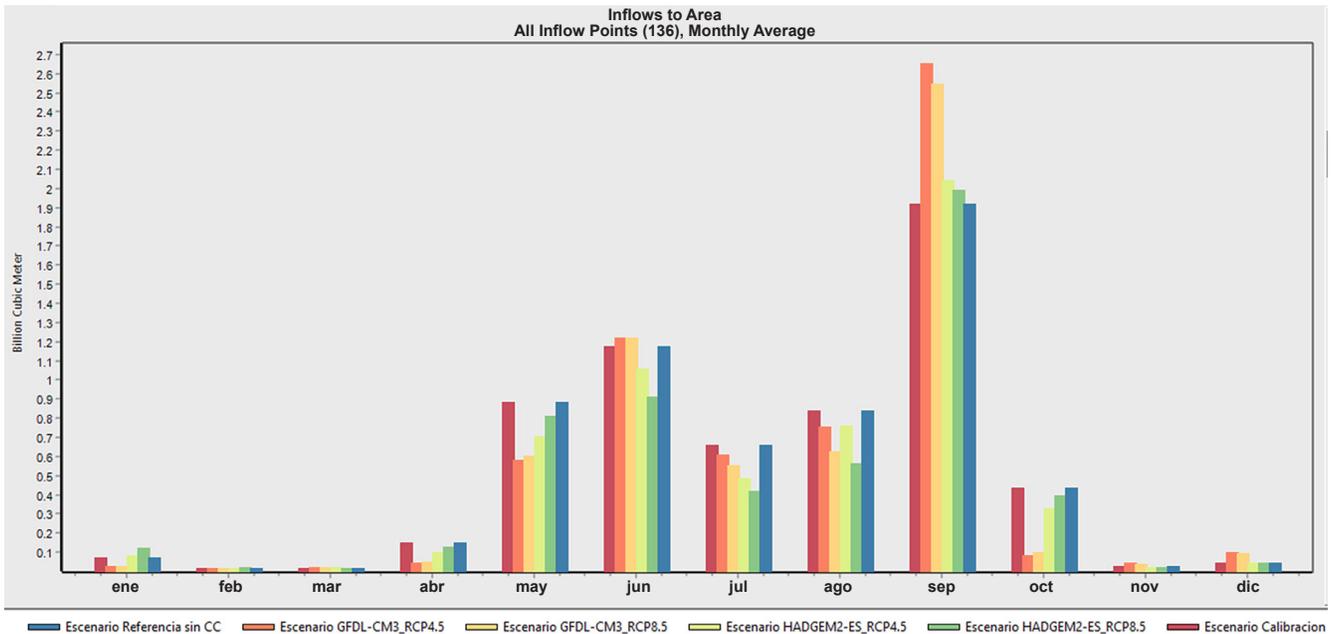
Mediante el principio de funcionamiento de WEAP se puede simular una amplia gama de los componentes naturales e intervenidos de los sistemas hídricos, incluyendo análisis hidrológicos lluvia-escorrentía, recarga potencial de los acuíferos por precipitación y calidad del agua que pueden ser integrados a la modelación (Jaramillo y col., 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la determinación de los escurrimientos a nivel mensual en la cuenca del río Soto la Marina (Figura 8), muestran que existe una gran heterogeneidad en la dis-

tribución mensual del escurrimiento natural, con una marcada tendencia de incremento en los meses de mayo a septiembre y sensiblemente en este último mes; situación que es importante de resaltar para poner en evidencia la falta de políticas públicas asertivas y promotoras del uso sustentable del recurso hídrico. Lo anterior advierte que un criterio de disponibilidad a nivel anual como lo establece la NOM-011-CONAGUA-2015, no es opción para la estimación del escurrimiento superficial en la CRSLM, tanto en épocas naturales de estiaje y en aquellas de mayor disponibilidad o épocas de avenidas, por lo que el análisis de disponibilidad debe realizarse a nivel mensual, ya que estos criterios conservadores de estimación, pueden comprometer el desarrollo social y económico de la región, al sustentar la gestión de los recursos hídricos en una normativa cuyo enfoque se ha basado únicamente en la preservación de la cantidad del agua con los datos históricos anuales registrados.

De lo anterior, se puede decir que la diferencia en el uso de ambos métodos estriba en que la NOM-011-CONAGUA-2015 establece 3 catego-



■ **Figura 8. Resultado de la simulación hidrológica mensual en WEAP.**

Figure 8. WEAP model monthly hydrological simulation result.

rías de suelos y 14 diferentes usos de éstos; mientras que el método del SCS utiliza 4 categorías de uso del suelo y 14 usos de ellos, donde algunos factores incluso se pueden evaluar para condiciones de suelos en secos o húmedos, o bien, permite también estimar la abstracción inicial, equivalente a la evapotranspiración y la infiltración. En síntesis, al comparar los resultados obtenidos entre el método Indirecto de la norma y el método del SCS, se observa que el primero estima escurrimientos bastante menores que el método del SCS; por lo que se podría sugerir que el método Indirecto de la norma oficial, subestima el escurrimiento superficial, y que el método del SCS está, posiblemente, más cercano a la realidad.

Por lo anterior, se infiere que debido a que no se tienen datos precisos de las extracciones de agua en todos los tramos de la cuenca de estudio por parte de los usuarios del agua, al aceptar los resultados del método Indirecto de la norma oficial, se asume que los usuarios del agua pudieran aprovechar el recurso de acuerdo a sus necesidades, ya que los resultados oficiales señalan que al no haber disponibilidad en algunos de los tramos de la cuenca del

río Soto la Marina, se puede pensar que estos quedarían completamente secos, lo cual no resulta así, al menos sobre los tributarios, cuyos escurrimientos son permanentes todo el año, limitando con ello los posibles proyectos de desarrollo económico en la zona. El propósito fundamental de la valoración hidrológica se centra en reducir la brecha entre la gestión del agua y el escenario natural de la propia hidrología (Rochdane y col., 2012), abordando tanto los factores biofísicos que influyen en el río como los factores socioeconómicos que afectan la demanda doméstica, agrícola e industrial y manejo de reservorios.

Un aspecto radical de la norma es que establece disponibilidades anuales, particularmente en el escenario de referencia sin cambio climático, que es la condición actual real, donde se observa que el 87.7 % del escurrimiento que transita en la cuenca se encuentra en el periodo de mayo a septiembre; especialmente tan solo en septiembre escurre el 30.8 % del volumen total anual. Esta condición es muy importante, ya que la norma oficial mexicana no refleja un adecuado criterio técnico para sustentar la administración y disponibilidad de

este recurso vital. La primera de las simulaciones que proporciona este modelo es referente a la marcada heterogeneidad de la distribución mensual de los escurrimientos en la cuenca (Figura 8).

Los resultados obtenidos son elementos suficientes para poder considerar varios aspectos que resultan sumamente importantes en el contexto de administración sustentable del recurso hídrico, tanto en cantidad como en calidad y su proyección futura hacia el inicio del otro siglo.

La información regionalizada del modelo GFDL_CM3 con el nivel de radiación forzada de 4.5 W/m^2 fue incorporada al modelo WEAP, cuyos resultados mostraron patrones de estimación con mayores escurrimientos debido a las anomalías climáticas registradas en el periodo de avenidas, incluso superando considerablemente los volúmenes mensuales de escurrimientos en septiembre, que es el mes dominante de lluvias y escurrimientos en la CRSLM, y por el contrario, este mismo modelo presenta para ambas condiciones de radiación forzada de 4.5 W/m^2 y 8.5 W/m^2 , valores exactamente idénticos en temporada de estiaje e iguales, o muy similares a las condiciones del escenario base, es decir, el periodo de enero a marzo.

Por otro lado, las simulaciones efectuadas con el modelo HAGDGEM2-ES muestran una condición diferente, ya que en época de avenidas las simulaciones del mismo periodo, especialmente del periodo junio a diciembre resultan ligeramente menores a las condiciones del escenario base, con excepción de septiembre, que se presenta ligeramente mayor a la condición real. El caso del periodo de estiaje (específicamente los meses de febrero y marzo) resulta muy similar, siendo la simulación en el mes de enero mayor al escenario base.

Los resultados de calidad del agua obtenidos en las campañas de muestreo y análisis, representaron la variabilidad espacio-temporal de los parámetros: OD, DBO_5 Y DQO, para los ríos

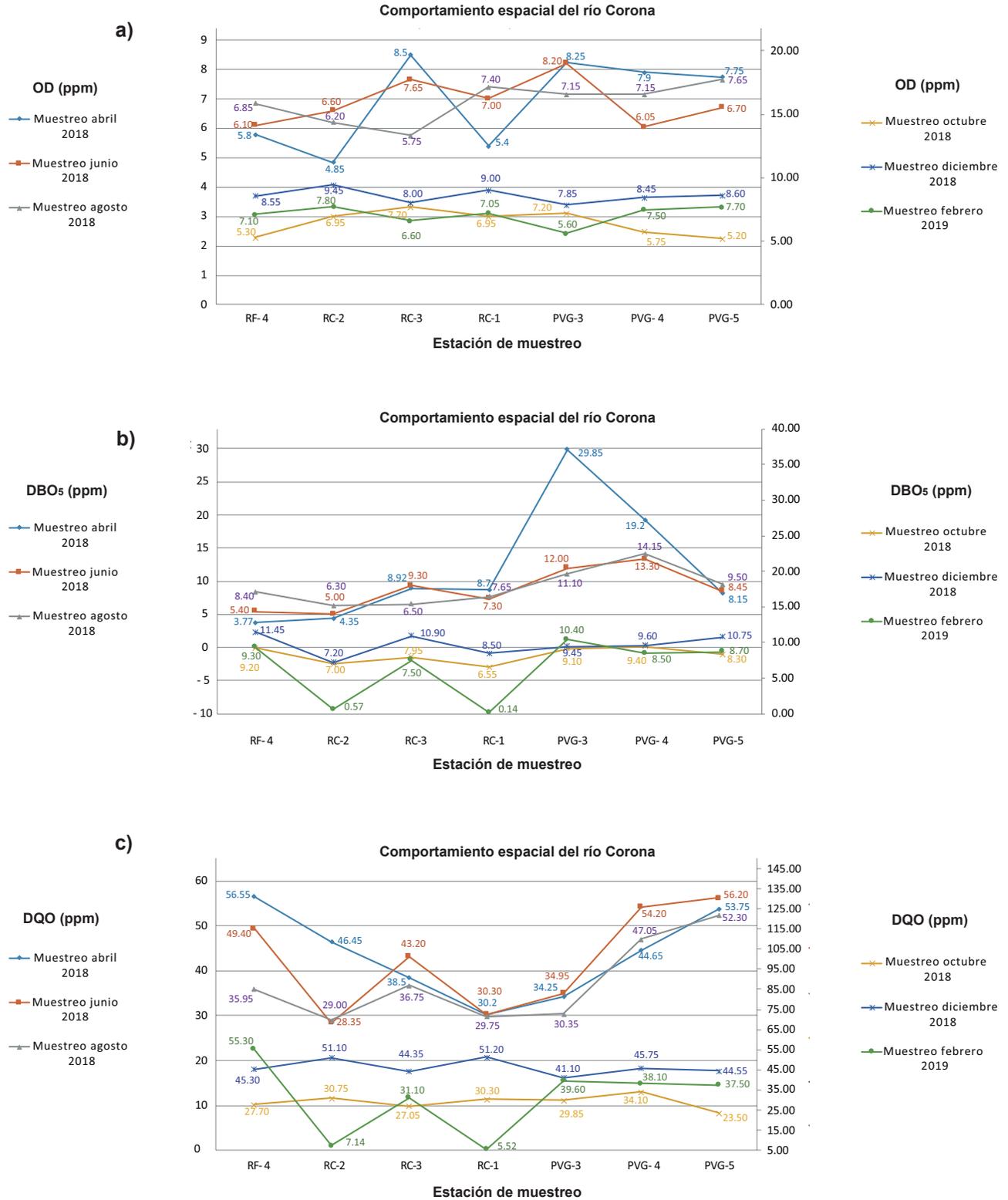
Corona y Purificación, como los principales tributarios (Lawani y col., 2017) (Figuras 9 y 10).

Aunque en la agricultura estos parámetros no son considerados de primer orden en importancia, lo son social y ambientalmente, ya que existen fuentes de suministro público-urbano, doméstico y para la conservación de otras especies pecuarias y pesqueras.

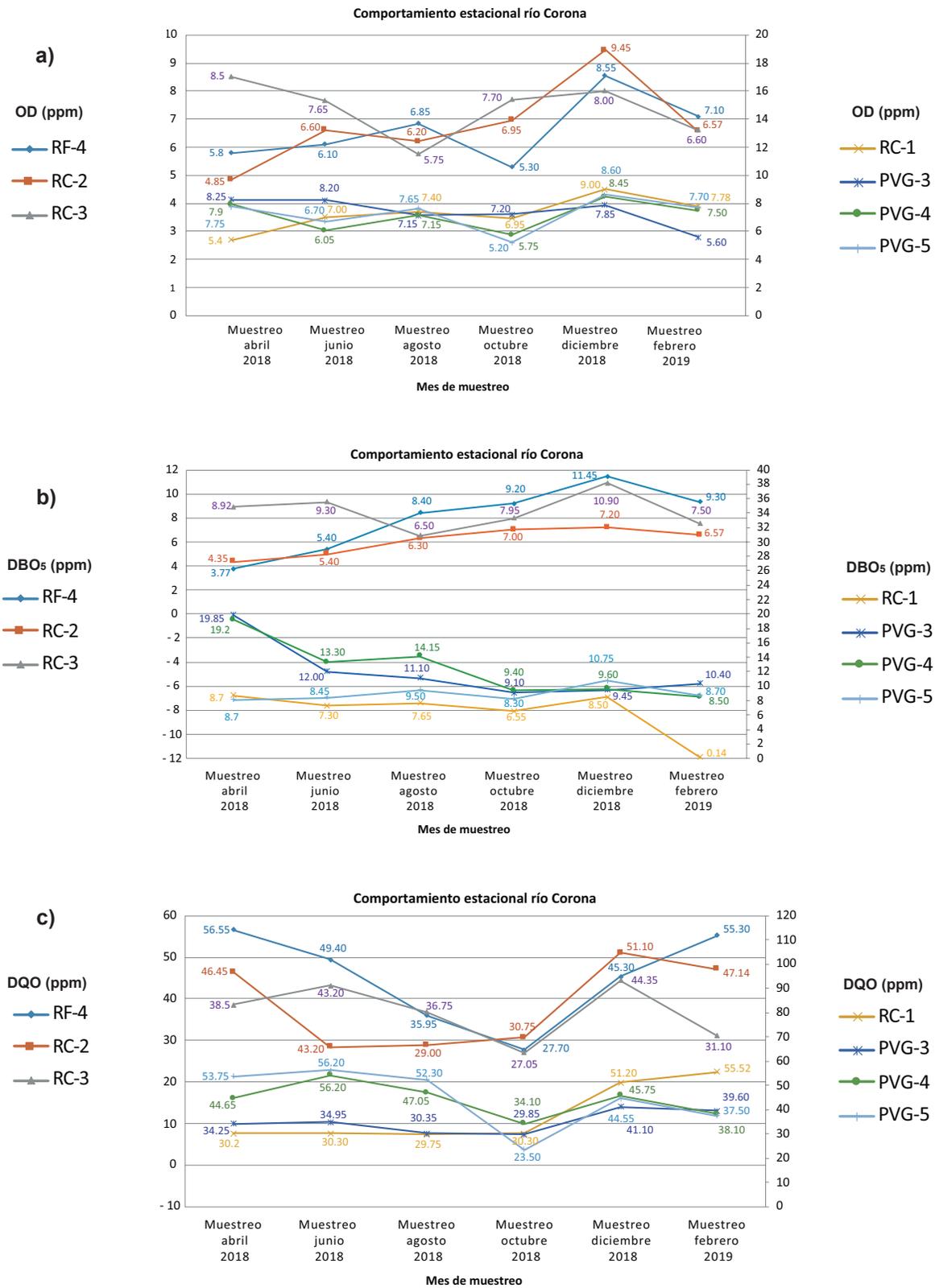
Por lo que respecta al OD, este presentó valores aceptables durante todo el muestreo. No obstante, existen señalamientos de afectación a la calidad del agua del río Corona por parte de las cooperativas de pescadores de la zona ante autoridades municipales de Güemez, ya que señalan el desarrollo de lirio acuático en el río Corona y la baja del producto pesquero como consecuencia (dominio público local).

Con respecto al comportamiento estacional (Figuras 10a; 10b y 10c), se observa en términos generales que la tendencia de los parámetros baja ligeramente en los meses de agosto a octubre y se incrementan las concentraciones de la DBO_5 y DQO en los meses de estiaje (diciembre a abril). Así mismo, se aprecia en la Figura 9b que el parámetro DBO_5 muestra en la parte terminal en sentido del flujo de agua (es decir hacia la presa Vicente Guerrero), específicamente una mayor tendencia en la estación PVG-4, en donde se supone no hay comunidades o afectaciones por descargas de origen público-urbano o rural. Para la DQO en la figura 9c, se presenta un ligero incremento en el periodo de abril, junio y agosto en la estación PVG-5, bajando su concentración por efecto de las avenidas que se presentan el mes de octubre (Vallejo-Rodríguez y col., 2017).

En relación con la DBO_5 , se aprecia que la mayor parte de los resultados son aceptables. No obstante, resulta importante precisar que, un sitio puntual sobre la presa, que es la entrada o confluencia del río Corona, denota niveles que se sugieren ser considerados como afectados, debido a que supera los 30 mg/L , existiendo para ese sitio un valor de 28.5 mg/L y 31.2 mg/L para los meses de enero y febrero, respecti-



■ Figura 9. Comportamiento espacial del río Corona respecto al: a) oxígeno disuelto; b) demanda bioquímica de oxígeno y c) demanda química de oxígeno (unidades en mg/L).
 Figure 9. Spatial behavior of the Corona river with respect to: a) dissolved oxygen; b) biochemical oxygen demand and c) chemical oxygen demand (units in mg/L).



■ Figura 10. Comportamiento estacional del río Corona respecto al: a) oxígeno disuelto; b) demanda bioquímica de oxígeno y c) demanda química de oxígeno (unidades en mg/L).
 Figure 10. Seasonal behavior of the Corona river with respect to: a) dissolved oxygen; b) biochemical oxygen demand and c) chemical oxygen demand (units in mg/L).

vamente. Esto puede confirmarse debido a que, en la actualidad, se presentan importantes niveles de crecimiento de lirio acuático en los últimos 11 km del río Corona, así como la afectación de una superficie aproximada de 150 ha del vaso de la presa Vicente Guerrero. El desarrollo de este tipo de maleza está documentado mediante registros de videos y fotografías de la zona, al paso del tiempo, en Muro Político (2020), y se debe precisamente a altas cargas orgánicas acompañadas de una concentración excesiva de nutrientes como nitratos, sulfatos, fosfatos y otros detonantes de maleza acuática.

Por otro lado, los hallazgos obtenidos de la DQO frecuentemente superaron en diversos sitios y temporadas los criterios de calidad del agua para considerar como aceptable su condición. Una concentración superior a los 40 mg/L de DQO clasifica a las aguas naturales como contaminadas de acuerdo con ese criterio (Conagua, 1989). Al considerar estos resultados con relación a los obtenidos a la DBO₅, se observa que los materiales que reflejan la alta concentración de DQO no son susceptibles de biooxidación, por lo que sus orígenes son distintos a los presentes en cargas de origen público-urbano o doméstico en zonas rurales.

El modelo de decaimiento del OD sobre el río Corona (Figura 11), muestra una curva de recuperación de sus condiciones debido a factores naturales, lo que revierte el impacto del vertimiento del río San Felipe, y se confirma con los valores de OD en la estación RC-1 denominada Río Corona-Final, que es la última estación sobre el río Corona antes de su confluencia a la presa Vicente Guerrero, cuyos valores oscilaron entre 5.4 mg/L y 9.0 mg/L, excepto el mes de febrero de 2019, donde presentó un valor de 7.78 mg/L (Figura 10a).

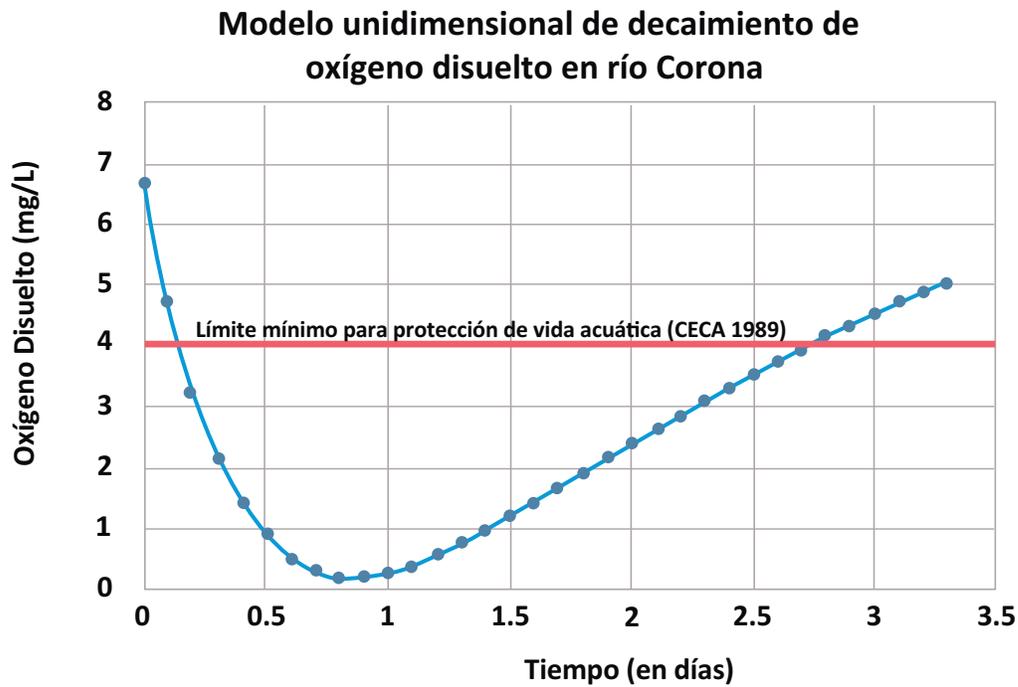
Cabe señalar que el río Pílon es una corriente cuyas aportaciones de agua en época de estiaje a la presa Vicente Guerrero es muy baja (poco flujo), como lo hacen los ríos Corona y Purificación. Aunado a ello, la calidad del agua del río Pílon no se ve afectada por descarga de zo-

nas urbanas e industriales, o retornos agrícolas en zonas de riego, como es el caso del río Corona, donde los problemas mayores en materia de calidad del agua que tiene el sistema los tiene esta corriente (en los recorridos realizados se pudo apreciar que existen efectos visibles). Es importante destacar que el mayor tributario durante todo el año es el río Purificación, y en segundo término el río Corona, pero como este último recibe grandes volúmenes de aguas residuales, el presente trabajo enfocó su atención mayormente en esta corriente.

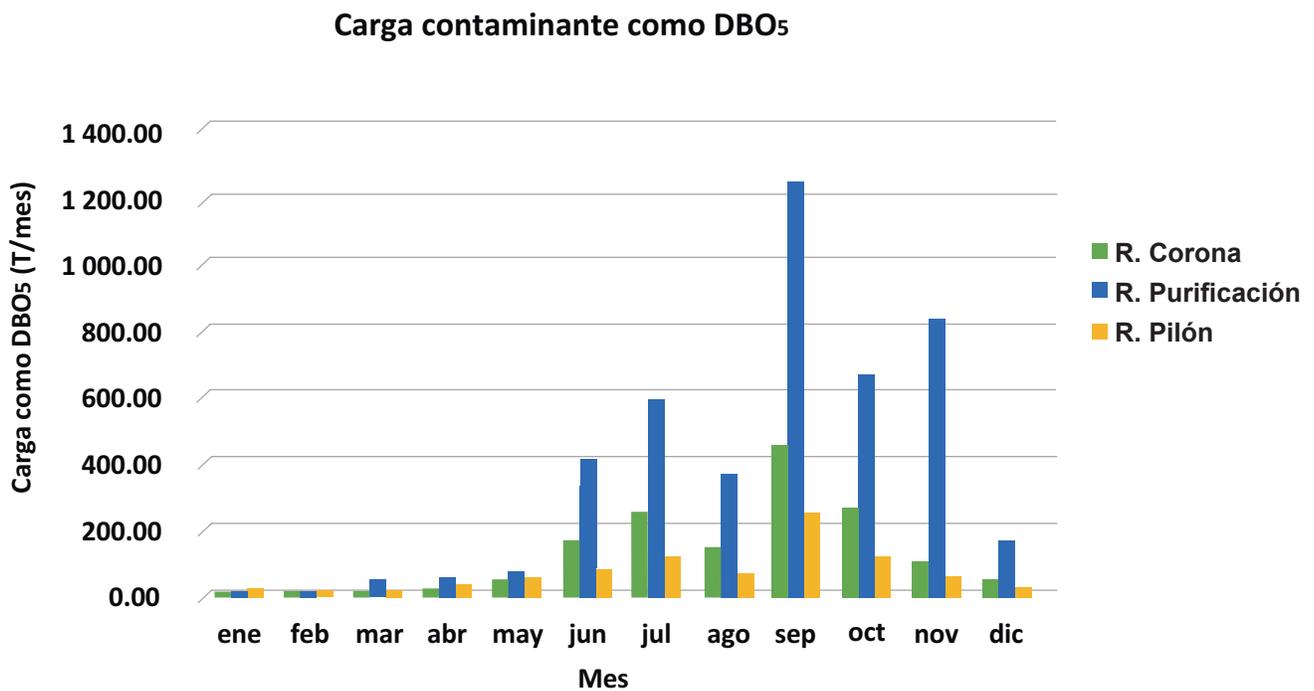
Aun siendo favorable el fenómeno representado en la Figura 11, los materiales asociados a estas cargas orgánicas no evaluadas en la presente investigación (nutrientes), son de suma importancia, ya que existe un fuerte desarrollo de lirio acuático en la zona, señal inequívoca de una acelerada eutroficación. Con relación a la modelación de la calidad del agua en la presa Vicente Guerrero, WEAP no tiene posibilidad de modelar embalses (Slaughter y col., 2016), por lo que es recomendable aplicar otro *software* o bien, desarrollar un modelo por celdillas (cubicación) para valorar las condiciones de la presa en función de su hidrodinámica.

Para comprender la situación relacionada con los niveles de concentraciones obtenidos en cada uno de los tributarios de la presa Vicente Guerrero, que conforma el principal embalse que soporta actividades socioeconómicas relevantes e indudablemente la fuente de suministro de agua potable principal de la cuenca, se determinaron las cargas orgánicas contaminantes que entran a la presa como DBO₅ y DQO (Figuras 12 y 13).

Como se observa en la Figura 12, las mayores cargas que transitan y se vierten a la presa, se acentúan en los meses de junio a noviembre, coincidentemente con el comportamiento dominante de escurrimientos, particularmente el mes de septiembre se observa en todos los tributarios un pico que sobresale del resto, con valores que alcanzan las 1 251.12 T; 464.44 T y 263.70 T, para los ríos Purificación, Corona y Pílon, respectivamente. Cabe resaltar que la car-

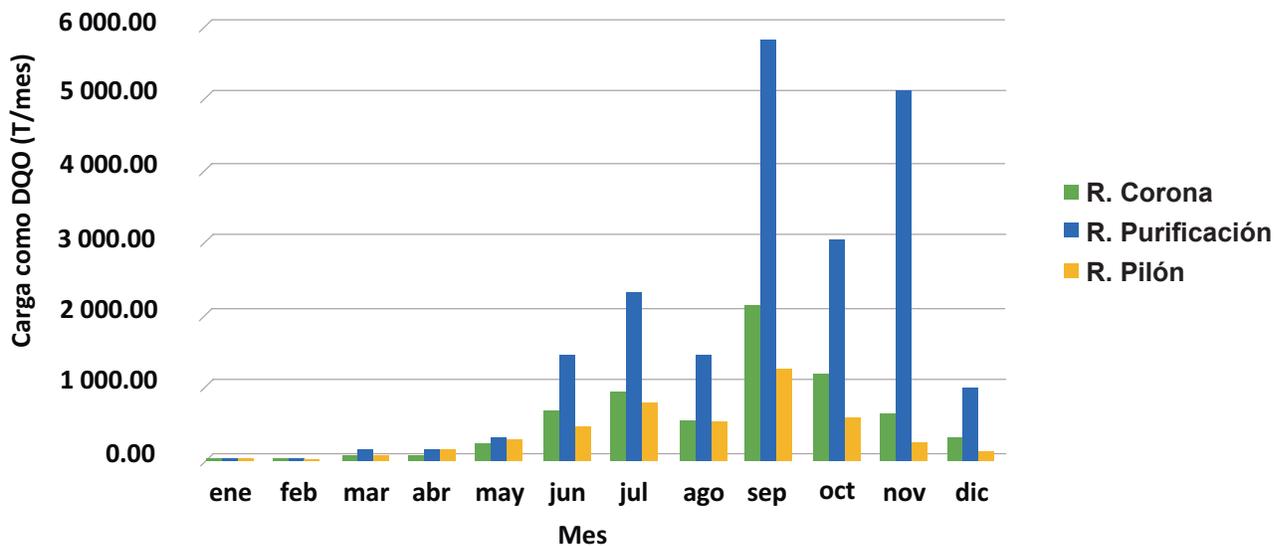


■ Figura 11. Modelo unidimensional de decaimiento del OD (unidades en mg/L).
 Figure 11. One-dimensional model of DO decay (units in mg/L).



■ Figura 12. Carga contaminante a la presa de cada tributario como DBO₅ (unidades en T/mes).
 Figure 12. Pollutant load to the dam of each tributary as BOD₅ (units in T/month).

Carga contaminante como DQO



■ Figura 13. Carga contaminante a la presa de cada tributario como DQO (unidades en T/mes).
Figure 13. Pollutant load to the dam of each tributary as COD (units in T/month).

ga total anual como DBO_5 que entra como aportación de estos tres tributarios es de 6 808.38 T, cifra bastante significativa de aportación al vaso lacustre de la presa Vicente Guerrero, más aún si se considera que el vaso ya presenta una reconocida concentración de DBO_5 .

Con relación a la DQO, se encontró un comportamiento similar, presentándose las mayores cargas de este parámetro los meses de junio a noviembre y de igual forma, en septiembre se alcanzan las mayores cargas contaminantes del orden de 5 787.61 T; 2 148.49 T y 1 278.47 T para los ríos Purificación, Corona y Pilón, respectivamente. Para este parámetro la carga anual fue 32 427.49 T, carga que entra al embalse de la presa.

Las Figuras 12 y 13 son útiles para dimensionar el grado de afectaciones de estas concentraciones que, aparentemente son pequeñas cantidades de material en los cuerpos de agua de esta cuenca, sin embargo, son traducidas como cargas contaminantes significantes. Cabe señalar que, aunque el efecto dilución se encuentra presente de junio a noviembre, es precisamente este incremento del gasto sobre estos tribu-

tarios, lo que incrementa las cargas de DBO_5 y DQO que finalmente se vierten en la presa Vicente Guerrero.

Es importante evidenciar que las grandes cantidades de aportaciones como cargas de DBO_5 y DQO, por la naturaleza de dichos parámetros, pueden tener una relación estrecha entre ambos. En ese sentido, se alcanzó un máximo de relación de 28.81 % del contenido DBO_5/DQO y hasta un rango menor de 2.56 %, lo cual es indicativo de una mayor presencia de materiales difícilmente degradables, incluso del tipo refractarios que son conservativos y se caracterizan por aquellas aguas duras con altos índices de sales disueltas como carbonatos, bicarbonatos, sulfatos y otros materiales, que elevan grandemente los valores de DQO, como son las aguas naturales de las corrientes superficiales de esta cuenca.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran la necesidad urgente de planear con enfoque mensual el recurso hídrico, ya que el escurrimiento natural es muy heterogéneo, siendo el periodo de noviembre a marzo el menor

escurrimiento y en extremo crítico los meses de febrero y marzo. Los escenarios de ambos modelos de cambio climático proyectados al año 2100, prevén condiciones del 12 % de reducción del escurrimiento natural medio mensual en el periodo de estiaje, además del correspondiente incremento en su demanda, lo cual implica grandes retos por reducir la brecha hídrica, así como garantizar el sostenimiento del desarrollo socio-económico de los habitantes de la cuenca del río Soto la Marina por el fenómeno proyectado en estas simulaciones. Así mismo, de la proyección de escenarios con el RCP 4.5 W/m² en ambos modelos, GFDL-CM3 y HAGDGEM2-ES, se deduce que septiembre, presenta un notable incremento de los volúmenes del escurrimiento natural, lo que pone de manifiesto la alerta en zonas de alto riesgo por inundaciones y de aquellos sectores vulnerables a ello, posiblemente asociadas al incremento en la presencia de fenómenos meteorológicos como ciclones o tormentas tropicales. Por otro lado, es importante considerar que aunque la modelación de calidad del agua por el modelo unidimensional aplicado resulta favorable para la recuperación de sus condiciones de salud ambiental, las cantidades como cargas contaminantes determinadas en el

sistema hídrico, son del orden de varios miles de toneladas anuales como DBO₅ y DQO, situación que refleja el gran estrés hídrico al que se sujeta el sistema y que se complica por la gran heterogeneidad estacional del escurrimiento natural y su variabilidad ante los efectos del cambio climático simulado en este proyecto, principalmente en el escenario GFDL-CM3 para el forzamiento RCP 4.5 W/m², lo que eleva aún más el estrés hídrico en conjunción de estos vectores, por lo que a fin de consolidar un efectivo plan de manejo en la cuenca del río Soto la Marina, es fundamental tomar en cuenta estos resultados. También, es preciso señalar, que la condición de presencia de lirio acuático en los últimos años sobre el tramo del río Corona desde la confluencia de la presa Vicente Guerrero y hasta varios kilómetros aguas arriba sobre el cauce de este río, denotan una condición de concentraciones orgánicas y de nutrientes atípicos en este sistema, lo cual es un factor detonante del proceso de eutrofización de la presa Vicente Guerrero, que si no se atiende en tiempo y forma resultará en un alto costo de inversión para el dragado y retiro de dicha maleza, con la consecuente pérdida de la calidad del agua y el ecosistema original.

REFERENCIAS

- Abdallah, A. and Rosenberg, D. (2019). A data model to manage data for water resources systems modeling. *Environmental Modelling & Software*. 115: 113-127.
- Aird, R., Eaton, A., and Rice, E. (2017). *Standard Method to the Examination of Water and Wastewater*. Water Environmental Federation. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/38769108/Standard_Methods_For_the_Examination_of_Water_and_Wastewater_23rd_edition. Fecha de consulta: 17 de septiembre de 2019.
- Borges, C. A., Leite, H., Silva, M. C., Ferreira, A., Hora, J., Lopes, S., and Oliveira, G. (2017). Assessment of water quality using principal component analysis: a case study of the açude da Macela-Sergipe - Brazil. *Modern Environmental Science and Engineering*. 32(4): 227-234.
- Chapra, S. (1997). Surface Water - Quality Modeling. *Research Gate*. 13-25.
- Chapra, S., Pelletier, G., and Tao, H. (2012). *QUAL2K: a Modeling Framework for Simulating River and Stream*. Medford, MA.: Tufts University. 11 Pp.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua (1989). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [En línea]. Disponible en: <http://legismex.mty.itesm.mx/acu/acca001.pdf>. Fecha de consulta: 14 de septiembre de 2020.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua (2015). Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (2015). Comisión Nacional del Agua. Biblioteca de Publicaciones Oficiales del Gobierno de la República. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/publicaciones/es/articulos/situacion-del-subsector-agua-potable-alcantarillado-y-saneamiento?idiom=es>. Fecha de consulta: 19 de mayo de 2019.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua (2017). *Estadísticas del agua en México*. México: SINA, Sistema Nacional de Información del Agua. 32-52 Pp.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua (2019). Consulta de Información estadística del agua: Hidrometría, climatología, plantas de tratamiento, zonas de riego y demandas de agua inscritos en registro público del agua (REPDa). [En línea]. Disponi-

ble en: <http://www.conagua.gob.mx>. Fecha de consulta: 4 de febrero de 2019.

Conapo, Consejo Nacional de Población (2015). Conciliación demográfica de México 1950-2015 y proyecciones demográficas 2030. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/proyecciones-de-la-poblacion-de-los-municipios-de-mexico-2015-2030>. Fecha de consulta: 10 de enero de 2019.

Gobierno del Estado de Tamaulipas (2017). Atlas de Riesgos del Estado de Tamaulipas. [En línea]. Disponible en: (<https://www.tamaulipas.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/36/2017/09/ATLAS-DE-RIESGOS-DEL-ESTADO-DE-TAMAULIPAS.pdf>). Fecha de consulta: 7 de septiembre de 2019.

Hervis-Granda, G., López-Seijas, T., Vargas-Castilleja, R., Rolón-Aguilar, J. y Sánchez-Torres, G. (2017). Aplicación del modelo WEAP para la planeación hidrológica de la cuenca San Diego, municipio Los Palacios, provincia Pinar del Río, Cuba. *Research Gate*. 2-4.

Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., and Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land áreas. *International Journal of Climatology*. 25(15):1965-1978.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Censos de población y vivienda 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx>. Fecha de consulta: 10 de enero de 2019.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020). Información Nacional Hidrológica, en *Portal de Información Digital de INEGI*. [En línea]. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrologia/>. Fecha de consulta: 14 de marzo de 2019.

Informe de Cambio Climático (2014). Resumen para responsables de políticas. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en *Organización Meteorológica Mundial*. [En línea]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM_es.pdf. Fecha de consulta: 10 de julio de 2020.

IPCC, Panel Intergubernamental en Cambio Climático-Organización de las Naciones Unidas (2007). Informe del Grupo de Trabajo I-Fourth Assessment Report: Climate Change 2007-RT.5.2 Proyecciones a gran escala para el siglo XXI. [En línea]. Disponible en: https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tss-ts-5-2.html. Fecha de consulta: 10 de julio de 2020.

Jaramillo, M.-F., Galvis, A., Escobar, M., Forni, L., Purkey, D., Siebel, J.-S., ..., and Sabas, C. (2016). Integration of WEAP and Qual2k model for the simulation of water quality surface resources. Case study: La Vieja River Basin, Colombia, en *Aqua-LAC*. [En línea]. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247568>. Fecha de consulta: 12 de mayo de 2020.

Jingshui, H., Yin, H., and Chapra, S. (2017). Modelling dissolved oxygen depression in an urban river in China. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. 1-2.

Lal, M., Mishra, S. K., Pandey, A., Pandey, R. P., Meena, P. K., Chaudhary, A., ..., and Kumar, Y. (2017). Evaluation of the Soil

Conservation Service curve number methodology using data from agricultural plots. *Hydrogeology Journal*. 25(1): 151-167.

Lawani, R., Kelome, N., and Agassounon-Djikpo-Tchibozo, M. (2017). Organic pollution of Ouémé River in Benin Republic, in *ResearchGate-International Water Resources Association (IWRA)*. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Organic-pollution-indication-OPI-map-of-the-Oueme-River-in-Benin-Republic_fig2_318214369. Fecha de consulta: 7 de abril de 2020.

Mishra, B., Regmi, R., Masago, Y., Fukushi, K., Kumar, P., and Saraswat, C. (2017). Assessment of Bagmati river pollution in Kathmandu Valley: Scenario-based modeling and analysis for sustainable urban development. *Sustainability of Water Quality and Ecology*. 9: 67-77.

Moncada, A. M., Escobar, M., Betancourth, A., Vélez, U. J., Zambrano, J., and Alzate, L. M. (2020). Modelling water stress vulnerability in small Andean basins: case study of Campoalegre River basin, Colombia. *International Journal of Water Resources Development*. 37(4): 640-657.

Muro Político (2020). Presa Vicente Guerrero se llena de maleza acuática, en *muropolitico.mx*. [En línea]. Disponible en: <https://muropolitico.mx/2020/11/25/presa-vicente-guerrero-se-llena-de-maleza-acuatica/>. Fecha de la consulta: 28 de enero de 2021.

Norma Mexicana de Análisis de Agua NMX-AA-012-SCFI-2001 (2001). Determinación del Oxígeno Disuelto (OD) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166768/NMX-AA-012-SCFI-2001.pdf>. Fecha de consulta: 17 de enero de 2018.

Norma Mexicana de Análisis de Agua NMX-AA-028-SCFI-2001 (2001). Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2001/nmx-aa-028-scfi-2001.pdf>. Fecha de consulta: 17 de enero de 2018.

Norma Mexicana de Análisis de Agua NMX-AA-030/2-SCFI-2011 (2011). Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166775/NMX-AA-030-2-SCFI-2011.pdf>. Fecha de consulta: 17 de enero de 2018.

Norma Mexicana de Análisis de Agua NMX-AA-007-SCFI-2013 (2013). Medición de la Temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba, en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. Disponible en: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-007-SCFI-2000.pdf>. Fecha de consulta: 17 de enero de 2018.

Norma Mexicana de Análisis de Agua NMX-AA-008-SCFI-2016 (2016). Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales

tratadas – Método de prueba, en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment_data/filer/data/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf. Fecha de consulta: 17 de enero de 2018.

Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 (2015). Conservación del recurso agua. Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015. Fecha de consulta: 17 de enero de 2018.

ONU, Organización de las Naciones Unidas (2020). Agua y Nutrición, en *Agua para el Desarrollo Sostenible*. [En línea]. Disponible en: <https://www.unscn.org/uploads/web/news/document/Water-Paper-SP-WEB.pdf>. Fecha de consulta: 14 de octubre de 2019.

Pachauri, R., Meyer, L., and Team, A. C. (2015). *Informe de AR5: Cambio Climático*. Geneva 2, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO) and IPCC. [En línea]. Disponible en: https://archive.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml. Fecha de consulta: 23 de marzo de 2020.

Papas, M. and Fellow, H. (2017). Climate Change Adaptation and the Pivotal Role of Water: Proposed Policy Response for Australia. [En línea]. Disponible en: <https://research-repository.uwa.edu.au/en/activities/xvi-world-water-congress-international-water-resources-associatio>. Fecha de consulta: 27 de febrero de 2020.

Ramadan, E., Shalash, O., Fahmy, M., and Abdel-Aal, G. (2019). Integrated water resource management in Sharkia Governorate, East Nile Delta using numerical evaluation of water management strategies. *Alexandria Engineering Journal*. 58(2): 757-771.

Rochdane, S., Reichert, B., Messouli, M., Babgigi, A., and Khebiza, M. (2012). Climate Change Impacts on Water Supply and Demand in Rheraya Watershed (Morocco), with Potential Adaptation Strategies. *Journal of Sustainability of Water Quality and Ecology*. 4(1): 28-44.

Sahukhal, R. and Tri-Ratna, B. (2019). Modeling water resources under competing demands for sustainable development: A case study of Kaligandaki Gorge Hydropower Project in Nepal. *Water Science and Engineering*. 12(1): 19-26.

Schull, V. Z., Daher, B., Gitau, M. W., Mehan, S., and Flanagan, D. (2020). Analyzing FEW nexus modeling tools for water resources decision-making and management applications. *Food and Bio-products Processing*. 119: 108-124.

Semarnat, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2013). Estrategia Nacional de Cambio Climático, en *Visión 10-20-40*. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment_data/filer/data/41978/Estrategia-Nacional-Cambio-Climatico-2013.pdf. Fecha de consulta: 7 de marzo de 2019.

Servicio Meteorológico Nacional (2019). Consulta de Información Climatológica en boletines y en estaciones Automáticas (EMA's). [En línea]. Disponible en: <http://www.smn.conagua.gob.mx>

Fecha de consulta: 6 de febrero de 2019.

Silva-Hidalgo, H., Estrada, G. G., Calderón, F. M., and Villalba, M. D. (2017). Effects of climate change on water availability in a hydrological watershed located in an arid region in the north central portion in Mexico. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. 1-11.

Slaughter, A., Mantel, K., and Hughes, D. (2016). Water quality management in the context of future climate and development changes: a South African case. *Journal of Water and Climate Change*. 7(4): 745-787.

Sridharan, V., Pereira-Ramos, E., Zepeda, E., Boehlert, B., Shivakumar, A., and Taliotis, C. (2019). The Impact of Climate Change on Crop Production in Uganda—An Integrated Systems Assessment with Water and Energy Implications. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 11(9): 1805.

UNESCO, Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (2019) Informe Mundial de Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf>. Fecha de consulta: 19 de mayo de 2019.

US Department of Agriculture (1972). Soil Conservation Service SCS: National Engineering Handbook, Section 4, in *Hydrology*. [En línea]. Disponible en: <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=18393.wba>. Fecha de consulta: 4 de febrero de 2019.

Vallejo-Rodríguez, R., León-Becerril, E., Díaz-Torres, J., Hernández-Mena, L., Del-Real-Olvera, J. F. P., and Martínez-Mendoza, L. L. (2017). Water Quality Index of Lake Chapala in Mexico and its potential risk, in *ResearchGate-International Water Resources Association (IWRA)*. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/319692488_Water_Quality_Index_of_Lake_Chapala_in_Mexico_and_its_potential_risk_to_public_health. Fecha de consulta: 19 de marzo de 2020.

Vieira, E. and Solis, S. (2017). Sustainability index and integrated water resources management of the rio Verde Grande Basin in Brazil, in *International Water Resources Association (IWRA)*. [En línea]. Disponible en: https://iwra.org/member/congress/resource/ABSID531_ABSID531_ID_531_Full_paper.pdf. Fecha de consulta: 8 de mayo de 2020.

Water Evaluation and Planning (2019). SEI, System Stockholm Environmental Institute Copyright©1990-2021. (Versión 2019.2) [Software de cómputo y manual del usuario]. Estocolmo, Suecia. Bajo licencia del Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo. [En línea]. Disponible en: <https://www.weap21.org>. Fecha de consulta: 29 de mayo de 2019.