

## Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura - Perú, considerando la incidencia del cambio climático

Modeling water availability on the Piura river basin - Peru, assessing the impacts of climate change

Ricardo F. León Ochoa<sup>1\*</sup>, Domingo M. Portuguez Maurtua<sup>1</sup> & Eduardo A. Chávarri Velarde<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima - Perú.

\* Autor para correspondencia: [r.leonochoa@gmail.com](mailto:r.leonochoa@gmail.com)

### ARTÍCULO ORIGINAL

#### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido: 07/01/2019  
Artículo aceptado: 24/06/2019  
En línea: 25/07/2019

#### PALABRAS CLAVE:

Cambio Climático,  
Disponibilidad Hídrica,  
Modelación Hidrológica,  
Modelos Climáticos Globales  
SWAT.

### ORIGINAL ARTICLE

#### ARTICLE INFORMATION

Article received: 07/01/2019  
Article accepted: 24/06/2019  
On line: 25/07/2019

#### KEYWORDS:

*Climate Change,  
CMIP5,  
General Circulation Models,  
Hydrological Modeling,  
SWAT.*

### RESUMEN

Esta investigación evaluó los impactos del cambio climático en la oferta hídrica superficial en la subcuenca media y alta del río Piura, Perú, con el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) a mediados del siglo XXI. El modelo SWAT fue calibrado y validado para un periodo de 23 años (1986 - 2008) utilizando datos de clima diarios en seis ubicaciones, y caudales mensuales en una ubicación. Para las evaluaciones a futuro, se adoptaron los datos climáticos HADGEM2-ES y CSI-RO-Mk3-6-0, de los modelos climáticos globales (MCG), Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Los datos sesgados futuros (2025-2054) se corrigieron utilizando los datos del clima del periodo de referencia, y se redujeron de escala con el generador de clima MarkSim. La temperatura y precipitación en los escenarios de cambio climático proyectan un aumento promedio de + 2,9°C y 39,3%, respectivamente, respecto del periodo observado. La evapotranspiración futura muestra una tendencia general a disminuir, con un ligero aumento en el lado noroccidental de la cuenca. En particular, la tendencia promedio de la escorrentía mensual al 2050, en los cuatro escenarios, indica para los meses entre octubre a abril un aumento de + 71,8%, aprox. 55,9 m<sup>3</sup>/s; con el mayor incremento en noviembre. Por otro lado, entre los meses de mayo a setiembre, se tiene una disminución de -66,1%, aprox. 12 m<sup>3</sup>/s, con el mayor descenso en julio.

### ABSTRACT

This research evaluated climate change impacts on the streamflow offer in the middle and up-per Piura river basin in Peru using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) by the middle of the 21s century. The SWAT model was calibrated and validated for a period of 23 years (1986 - 2008) with daily weather data at six locations and monthly streamflow data at one location. For future evaluation, the HADGEM2-ES and CSIRO-Mk3-6-0, global climate models (GCM), climate data by Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) RCP4.5 and RCP8.5 of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) were adopted. The future biased data (2025-2054) were corrected using weather data of baseline period, and downscaled by the statistical method of MarkSim weather generator. The temperature and precipitation in the climate change scenarios projected an average increase of + 2.9°C and 39.3%, respectively, compared to the baseline condition. The future evapotranspiration showed a general tendency to decrease, with a slight increase in the north western region of the basin. In particular, the average trend of monthly streamflow to 2050s, in the four scenarios, indicates an increase of +71.8%, approx. 55.9 m<sup>3</sup>/s, from October to April with the highest increase in November. Whereas, from May to September, there is a decrease of -66.1%, approx. 12 m<sup>3</sup>/s, with the largest decrease in July.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático está generando alteraciones climáticas que afectan las condiciones hidrológicas, dando lugar a diversos impactos en los sistemas globales de recursos hídricos (Yang et al., 2011). Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el aumento de la temperatura y la variabilidad de precipitación se atribuirá significativamente a riesgos relacionados con el agua, como inundaciones y sequías (Lindner et al., 2010). Por lo tanto, la información de respuesta espacio temporal sobre del cambio climático en los recursos hídricos es importante para determinar la disponibilidad futura del agua y sus planes de gestión sostenible.

Tyndall Center (2004) refiere que el Perú es vulnerable ante una variabilidad climática drástica. Por ello, la necesidad de evaluar estos cambios en regiones con recursos escasos de agua y alta sensibilidad del clima que enfrentan severos efectos del cambio climático en el sector agrícola especialmente. Viéndose reflejadas en pérdidas económicas, las cuales pueden exacerbarse más al involucrar otros mecanismos que afecten negativamente el crecimiento económico; como la pérdida de disponibilidad del recurso hídrico, biodiversidad, productividad primaria agrícola y pesquera.

La cuenca del río Piura juega un rol fundamental en el potencial de desarrollo agroexportador y pesquero; dada su biodiversidad por las características geográficas particulares asociadas al bosque seco tropical y al encuentro de dos corrientes marinas de temperaturas contrapuestas, aguas frías de Humboldt y calientes de El Niño. Sin embargo, la cuenca muestra una alta vulnerabilidad ante los impactos del cambio climático al encontrarse expuesta a diferentes eventos extremos, como el Fenómeno de El Niño (FEN) y las sequías recurrentes (SENHAMI, 2005, ANA, 2012).

Actualmente, evaluar la influencia del cambio climático en los recursos hídricos regionales es de gran importancia para la toma de decisiones acertadas en su

gestión garantizando la estabilidad y sostenibilidad del agua. Debido a que varios factores como la escorrentía superficial, infiltración, y evapotranspiración se ven afectados (Joo et al., 2017).

En este contexto, los modelos hidrológicos son una valiosa herramienta para evaluar el efecto del cambio climático en la hidrología de las cuencas al caracterizar escenarios de cambio climático basados en emisiones futuras de gases de efecto invernadero (Anand et al., 2018). Donde la herramienta de evaluación de suelo y agua (SWAT, por sus siglas en inglés), es utilizada con frecuencia para investigar los efectos de la variación climática en el balance hídrico simulando el comportamiento hidrológico en una cuenca y su relación directa con el clima, la topografía, la geología y el uso del suelo, además del impacto de las actividades humanas (Alam et al., 2016; Garcia Gonzalez, 2015).

El IPCC en su quinto informe (AR5) define una serie de escenarios, denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, en inglés), RCP (2.5, 4.5, 6.0 y 8.5) para la proyección climática hacia el año 2100.

Las proyecciones climáticas indican que es probable que la temperatura global en la superficie, a fines del siglo XXI, sea superior en 1,5 °C a la del período entre 1850 y 1900 para todos los escenarios considerados de trayectorias de concentración representativas (RCP) excepto para el escenario RCP2.6. (IPCC, 2013, p.18)

Los RCP incorporan un escenario de alivio que genera un bajo nivel de manejo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con altas emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5).

Aunque, son limitantes para el estudio del clima regional las bajas resoluciones espaciales de los modelos de circulación general (MCG) (Abdo et al., 2009); se solucionan mediante técnicas de reducción

de escala fina a través de modelos estadísticos o dinámicos de clima regional. Experiencias pasadas acoplan datos climáticos CMIP 5 al modelo SWAT. Por ejemplo, Li y Gao (2015) investigaron el efecto del cambio climático en los recursos hídricos en dos escenarios de emisiones en la cuenca del río Songhua, China durante el período 2020 - 2049 con datos climáticos a escala reducida. Los resultados indicaron un buen desempeño del modelo e indicaron que la temperatura y precipitación tiene un efecto significativo en el flujo de la corriente.

La orientación de la presente investigación es comprender a respuesta de la cuenca hidrológica media y alta del río Piura con respecto al uso del suelo, el suelo, la topografía y las condiciones climáticas. La novedad del estudio es el uso de varios MCG a través del generador de clima MarKSim para cubrir una amplia gama de resultados potenciales en el clima futuro y adaptar la técnica de corrección de sesgos comparativamente simple (escala lineal) en la cuenca, incluyendo el análisis hidrológico con SWAT. El objetivo principal es cuantificar el impacto del cambio climático en la oferta hídrica superficial en la cuenca media y alta del río Piura al 2050, a través del modelo SWAT y las variables climáticas proyectadas en las rutas RCP4.5 y 8.5.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La cuenca del río Piura corresponde al sistema de cuencas de la vertiente del Pacífico. Se sitúa en la región de Piura, en el norte del Perú, aproximadamente entre los 0 y 3650 m.s.n.m.; comprendida entre las coordenadas 04°41' a 5°49' de latitud Sur y los meridianos 79°26' a 81°05' de longitud Oeste.

El estudio se centra en la subcuenca media y alta de la cuenca del río Piura (de ahora en adelante denominado subcuencas); espacio delimitado a partir de la estación hidrométrica Sánchez Cerro (Figura 1); cubriendo un área aproximada de 7'500,5 km<sup>2</sup>

dentro de los 10'872,1 km<sup>2</sup> de extensión la cuenca del río Piura.



Figura 1. Subcuenca media y alta del río Piura.

### Proceso de modelado hidrológico en SWAT

El modelo SWAT es un modelo hidrológico distribuido de tiempo continuo, basado en la física, que se utiliza para predecir el equilibrio de las cuencas hidrográficas a mediano y largo plazo, e implica una gran cantidad de datos meteorológicos (precipitación, temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, radiación solar y dirección del viento) y espaciales para simular el ciclo hidrológico (Arnold y Fohrer, 2005; Zheng et al., 2010). El modelo usa las ecuaciones estándar de hidrología para simular los parámetros del ciclo hidrológico, y utiliza la Ecuación 1 de equilibrio hidrológico para la simulación del ciclo.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{qw})_i \quad (1)$$

Dónde:  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo (mm);  $SW_0$  es el contenido de agua inicial en el día  $i$  (mm);  $t$  es el tiempo (días);  $R_{day}$  es la cantidad de precipitación en el día  $i$  (mm);  $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía superficial por día (mm);  $W_{seep}$  es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en día  $i$  (mm);  $Q_{qw}$  es la cantidad de flujo de retorno en el día  $i$  (mm) (Neitsch et al., 2002).

En SWAT, la cuenca se divide en subcuencas vinculadas espacialmente, denominadas unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en *Rev. Investig. Altoandín. 2019; Vol 21 Nro 3 182 - 193*

inglés), que consisten en un uso homogéneo del suelo, manejo y características del suelo describiendo la heterogeneidad física del sistema (Neitsch et al., 2004). Los componentes hidrológicos modelados en cada HRU, incluyen: escorrentía superficial, percolación, flujo lateral, flujo de agua subterránea, evapotranspiración y pérdidas de transmisión. Según Ghaffari (2010), para estimar la escorrentía superficial hay dos métodos: El número de curva (CN) desarrollado por el SCS en USA y el método de infiltración Green-Ampt. El flujo, o inter-flujo subterráneo lateral se calcula mediante el modelo de almacenamiento cinemático, que considera la conductividad hidráulica, humedad, pendiente, y el cambio espacio temporal del suelo. Además, la captación del agua planta - suelo se simula como una función potencial de evapotranspiración, índice de área foliar y profundidad de enraizamiento (Birhanu et al., 2007). En este estudio se utilizó el método de número de curva (CN) para identificar una curva única, de una familia de curvas, que estimará la escorrentía de acuerdo con la precipitación total.

### Data de entrada del modelo

#### Información geográfica.

La información analizada adaptada y usada en el modelo, se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Información geográfica suministrada al modelo*

| Información                       | Fuente            | Descripción   | Formato           |
|-----------------------------------|-------------------|---|-------------------|
| DEM                               | ASTER/GDEM (NASA) | Modelo digital de elevación (resolución de 30 m x 30 m) | Raster            |
| Suelos                            | MINAGRI           | Mapa de suelos  | Polygon shapefile |
| Capacidad de uso mayor de tierras | MINAM             | Mapa de capacidad de uso mayor de tierras               | Polygon shapefile |
| Cartografía básica                | IGN               | Cartas nacionales                                       | Polygon shapefile |
| Hydrografía                       | ANA               | Delimitación y red de drenaje hidrográfica              | Polygon shapefile |

La información actualizada del mapa de capacidad de uso mayor está disponible en el geoservidor del MINAM (Ministerio del Ambiente, Perú) (<http://geoservidor.minam.gob.pe/>). La información

de las características de los suelos en la cuenca (granulometría del suelo, permeabilidad, densidad aparente, cantidad de materia orgánica, entre otros); se ingresó considerando los valores en la base de datos del mapa digital de suelos a escala mundial (DSWM), elaborado en conjunto por la FAO y UNESCO (2010), descargando los atributos en el Harmonized World Soil Database (HWSD) v.1.2 (<http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soildatabase/HTML/>), debe mencionarse que la base de datos del programa utiliza un sistema de clasificación taxonómica de suelo que coincide con la base de datos de propiedades del suelo requeridas por el SWAT.

#### Información climática

La data de las variables meteorológica requerida por el modelo en escala diaria y la data de caudales a nivel mensual, se obtuvo de seis estaciones meteorológicas y una estación hidrométrica (Sánchez Cerro), respectivamente; distribuidas espacialmente dentro de las subcuencas con un registro continuo de 25 años (1984 - 2008); proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), y el Proyecto Especial Chira - Piura (PECHP) (Figura 1).

SWAT ofrece la opción de cambiar su base de datos interna (SWAT2009.mdb - table: userwgn), para usarla como entrada de datos climáticos definida por el usuario. La falta de datos de radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa en algunos periodos se completó utilizando el generador de clima del modelo SWAT (Neitsch et al., 2004). Y, se utilizó el método de Penman Monteith para calcular la evapotranspiración referencial (Eto), con la finalidad de comparar los valores medios mensuales del escenario base (1999-2008) con las diferentes proyecciones futuras generadas de los modelos MCG con mejor ajuste.

### Calibración y validación del modelo

Los caudales simulados se compararon con los caudales observados en el periodo (1986-1998) utilizando el software SWAT – CUP y el algoritmo SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting 2), ya que Alam et al. (2016) afirma un mejor rendimiento en la calibración del modelo SWAT.

Previamente se realizó un análisis de sensibilidad en los parámetros comúnmente recomendados, con el fin de analizar su grado de influencia y pertinencia al utilizarlos en la calibración; limitando su número para conseguir que el proceso sea menos complejo y extenso. Según Srinivasan (2015) se debe incluir en la calibración los parámetros que tengan un factor “*p-value*” mayor a 0,2.

Se encontró que solo ocho parámetros eran los más sensibles (CN2, SOL\_AWC, ESCO, EPCO, CH\_N2, REVAPMN, GW\_REVAP, GW\_DELAY), de los cuales, CN2 y SOL\_AWC se optimizaron como un multiplicador de valores iniciales. La Tabla 2 muestra el ranking de los parámetros más sensibles y su ajuste en la etapa de calibración.

**Tabla 2**  
Valores finales de los parámetros aplicados en la simulación

| Rank | Parámetros | Definición del parámetro   | Rango    | Valor ajustado |
|------|------------|--|----------|----------------|
| 1    | CN2        | SCS número de curva de escorrentía inicial                                 | ± 0.20   | - 0,14         |
| 2    | GW_DELAY   | Tiempo de retardo del agua subterránea (días)                              | 30 - 450 | 275            |
| 3    | GW_REVAP   | Coefficiente de aguas subterráneas “revap”                                 | 0 - 0.2  | 0,07           |
| 4    | CH_N2      | Valor n de Manning para el canal principal                                 | 0 - 0.5  | 0,325          |
| 5    | EPCO       | Factor de compensación de absorción de la planta                           | 0 - 1    | 0,45           |
| 6    | ESCO       | Factor de compensación de evaporación del suelo                            | 0 - 1    | 0,383          |
| 7    | REVAPMN    | Umbral de la profundidad del agua en el acuífero superficial “revap”. (mm) | 0 - 500  | 58,333         |
| 8    | SOL_AWC    | Capacidad de agua disponible (mm agua/mm suelo)                            | ± 0,25   | 0,225          |

Proceso de movimiento ascendente desde el acuífero poco profundo se denomina “revap”.

Para evaluar el desempeño del modelo hidrológico, se utilizó: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), Nash-Sutcliffe ( $NSE$ ), el sesgo porcentual ( $PBIAS$ ),

la relación entre la raíz del error medio cuadrático, y la desviación estándar ( $RSR$ ) (Tabla 3). La figura 3 muestra los resultados de la calibración y validación del modelo.

**Tabla 3**  
Rendimiento del Modelo

| Etapa       | Media observada $\bar{O}$ (m <sup>3</sup> /s) | Media simulada $\bar{S}$ (m <sup>3</sup> /s) | Rendimiento del Modelo |       |         |       |
|-------------|---|--|------------------------|-------|---------|-------|
|             |   |  | $NSE$                  | $R^2$ | $PBIAS$ | $RSR$ |
| Calibración | 52,58090                                      | 55,54287                                     | 0,89                   | 0,90  | -3,62   | 0,33  |
| Validación  | 53,47267                                      | 55,40950                                     | 0,76                   | 0,81  | -5,63   | 0,49  |

### Reducción del escenario climático y el escenario de emisiones al área de estudio

Se utilizó la versión web del generador meteorológico MarkSim para reducir la escala (downscaling) de los datos climáticos futuros (desagregación estadística, método “Delta Change”) de los MCG del IPCC AR5 (CMIP5) (Jones y Thornton, 2013), posterior a una corrección del sesgo lineal en las 6 estaciones. Diversos estudios previos (Fitsum, 2015; Garcia Gonzalez, 2015; Muluneh, 2015) obtuvieron un buen desempeño utilizando los parámetros climáticos derivados del generador como entrada en diferentes modelos para proyectar escenarios futuros.

Los 4 MCG de buen ajuste para representar el clima a futuro (2025 – 2054), en la costa norte del Perú, fueron: HadGEM2-ES (Inglaterra), CSIRO-Mk3-6-0 (Australia), MRI-CGCM3 (Japón) y MIROC 5 (Japón) (Ramos, 2014; Yates y Angarita, 2014). Escogiéndose las rutas de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5; lográndose obtener ocho posibles proyecciones (4x2 ESM RCP). Sin embargo, sólo se escogieron las proyecciones de los modelos HadGEM2-ES y CSIRO-Mk3-6-0 que presentaron un alto ajuste con la variable precipitación acorde con la estacionalidad de la zona en estudio (Figura 2).



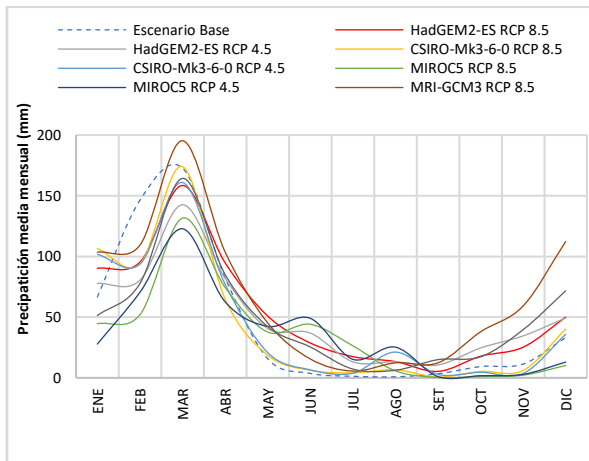


Figura 2. Precipitaciones medias mensuales del escenario base y los MCG.

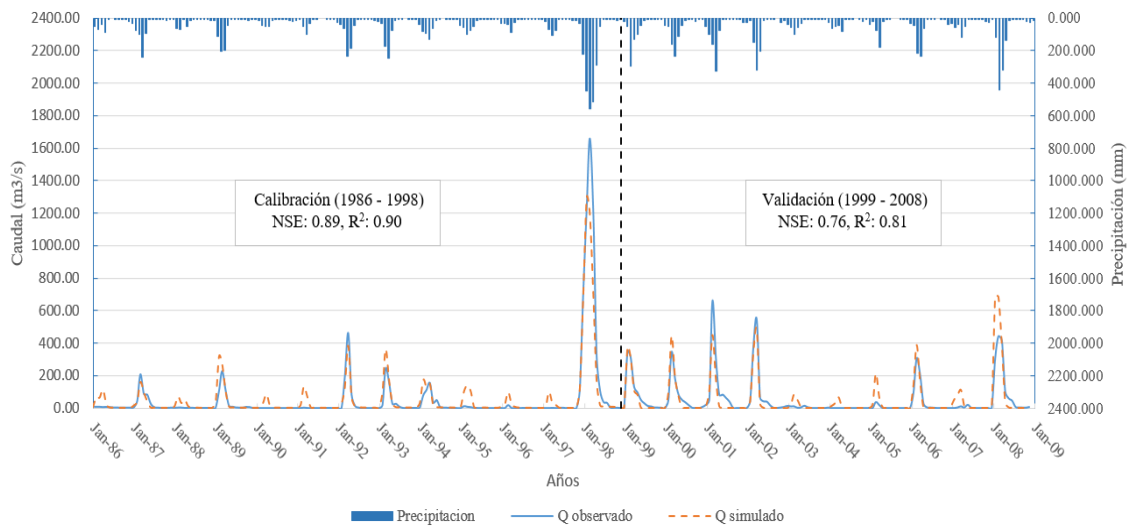


Figura 3. Caudales observados y simulados para el período de calibración y validación.

### Evaluación de cambios en la temperatura, precipitación y escorrentía

Los estudios primarios se centraron principalmente en las variables de temperatura y precipitación, dado que tienen un efecto significativo en los sistemas de recursos hídricos (mayores a otras variables climáticas).

La parte alta de las subcuencas tiene los mayores incrementos de temperatura promedio mensual, entre los cuatro escenarios, a largo plazo durante el período futuro. Donde los meses entre mayo y setiembre (estación seca) proyectan un incremento

## RESULTADOS

### Efectos del cambio climático

La evaluación del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Piura se realizó comparando el modelo validado (Figura 3); con los cuatro escenarios futuros de alto ajuste (HadGEM2-ES RCP 4.5 y 8.5, y CSIRO-Mk3-6-0 RCP 4.5 y 8.5) hasta mediados del siglo XXI.

en 5,4°C; en cambio, entre octubre y abril (estación húmeda) el aumento es de 4,0°C. Al contrario, la parte media y baja, tiene una menor variación, ya que en la estación seca solo aumenta en 1,3°C, y en la húmeda el aumento es de 1,0°C.

Los cambios porcentuales de la precipitación mensual comparados con el periodo base en los meses comprendidos de la estación seca, aumentaron en las proyecciones futuras para la parte alta de las subcuencas; alcanzando la máxima variación porcentual (142%), con valores de hasta 34 mm (aprox.), en el escenario HadGEM2-ES RCP 4.5; seguido por el mismo modelo, pero con la ruta RCP

8.5 (85%), hasta los 26 mm (aprox.). Luego, el modelo CSIRO-Mk3-6-0 RCP 4.5 llega hasta los 20 mm (57%), y la menor variación con valores de hasta los 14 mm (14%) en el escenario CSIRO-Mk3-6-0 RCP 8.5. Mientras que la estación húmeda no tiene variaciones significativas en la precipitación media mensual comparadas con el escenario base.

La Tabla 4 presenta los caudales promedio mensual del escenario base; y los escenarios futuros. Se observa que los caudales máximos en los escenarios futuros tienen lugar en el mes de marzo. No obstante, no se consideran eventos extremos, como el FEN, en las proyecciones de los MCG.

**Tabla 4**  
*Caudal promedio mensual de los escenarios*

| Escenario             | Caudal promedio mensual (m <sup>3</sup> /s) |       |       |       |      |      |      |     |      |      |      |      |
|-----------------------|---|-------|-------|-------|------|------|------|-----|------|------|------|------|
|                       | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May  | Jun  | Jul  | Ago | Set  | Oct  | Nov  | Dic  |
| Escenario Base        | 33,5  | 103,9 | 224,3 | 174,6 | 45,3 | 24,8 | 13,1 | 6,3 | 1,4  | 1,10 | 1,1  | 6,2  |
| HadGEM2-ES RCP 4.5    | 48,5  | 112,8 | 194,3 | 124,6 | 37,8 | 17,1 | 3,3  | 1,5 | 0,9  | 7,57 | 8,9  | 24,9 |
| HadGEM2-ES RCP 8.5    | 73,2  | 121,0 | 233,2 | 140,2 | 46,8 | 15,9 | 5,3  | 2,2 | 0,2  | 2,02 | 4,1  | 16,5 |
| CSIRO-Mk3-6-0 RCP 4.5 | 47,1  | 116,2 | 221,4 | 107,4 | 19,0 | 3,8  | 0,7  | 1,3 | 0,1  | 0,05 | 0,01 | 6,8  |
| CSIRO-Mk3-6-0 RCP 8.5 | 58,0  | 111,1 | 254,2 | 106,9 | 19,3 | 2,9  | 0,7  | 0,5 | 0,02 | 0,07 | 0,05 | 9,5  |

La Tabla 5, indica las variaciones de escorrentía promedio entre los escenarios futuros y el base. Se pueden identificar variaciones desde +716,5% a -99,2% en la estación húmeda y variaciones de +3,2% a -98,9% en la estación seca. Las variaciones más altas se dan entre los meses de octubre a

diciembre, ya que los valores promedio mensuales de escorrentía observados en dichos meses son valores pequeños, de modo que el aumento en magnitud de escorrentía proyectada en los escenarios futuros se traduce en una amplia variación porcentual.

**Tabla 5**  
*Variación porcentual de caudales entre escenarios*

| Escenario             | Δ % Promedio mensual |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------|----------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | Ene                  | Feb  | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Set   | Oct   | Nov   | Dic   |
| HadGEM2-ES RCP 4.5    | 45,0                 | 8,4  | -13,4 | -28,6 | -16,5 | -31,0 | -74,5 | -76,0 | -38,6 | 587,0 | 716,5 | 305,2 |
| HadGEM2-ES RCP 8.5    | 118,7                | 16,4 | 4,0   | -19,7 | 3,2   | -35,8 | -59,6 | -64,6 | -88,4 | 83,0  | 273,7 | 167,7 |
| CSIRO-Mk3-6-0 RCP 4.5 | 40,8                 | 11,8 | -1,3  | -38,5 | -58,1 | -84,7 | -94,6 | -79,1 | -91,3 | -95,8 | -99,2 | 10,1  |
| CSIRO-Mk3-6-0 RCP 8.5 | 73,4                 | 6,8  | 13,3  | -38,7 | -57,4 | -88,4 | -94,4 | -92,5 | -98,9 | -93,5 | -95,5 | 54,0  |

La Figura 4 muestra la tendencia promedio de las variaciones promedio mensual para el periodo 2025-2054, donde las variaciones proyectadas en

los meses entre enero y setiembre presentaron una concordancia alta.

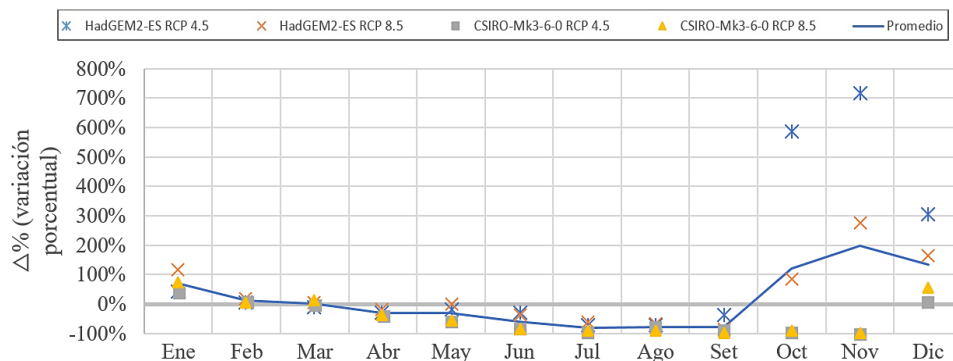


Figura 4. Variación porcentual del caudal promedio mensual proyectado a futuro.

La variación promedio indica que en todos los meses lluviosos se proyecta un incremento de la oferta de agua desde +0,6% a +198,9%, aunque tiende a disminuir en -31,4% para el mes de abril únicamente. Por el contrario, la estación seca proyecta una disminución de la escorrentía, principalmente en los meses de julio y setiembre con descensos de hasta -80,8% y -79,3%, respectivamente.

### Evapotranspiración de referencia futura (2025 - 2054)

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), calculada con el método de Penman - Monteith en SWAT, tuvo una variación anual entre 1'744,6 a 2'013,7 mm/año, para la validación (1999-2008) dentro del escenario base.

En términos generales, la evapotranspiración futura en zonas bajas de las subcuencas alcanza los valores más altos (250 mm/mes) en la estación seca. Mientras que la zona alta, comparada al escenario base, no tiene cambios significativos para la estación húmeda; aunque la estación seca tiene un descenso de la ET<sub>o</sub> futura. Por otro lado, en la zona baja de las subcuencas (provincia Piura y Morropon) se disminuye la ET<sub>o</sub> en ambas estaciones.

La Figura 5 representa la evapotranspiración referencial en los escenarios futuros, mediante la gráfica de ET<sub>o</sub> vs. Altura, de acuerdo con la longitud del cauce del río principal que se mostró en la Figura 1.

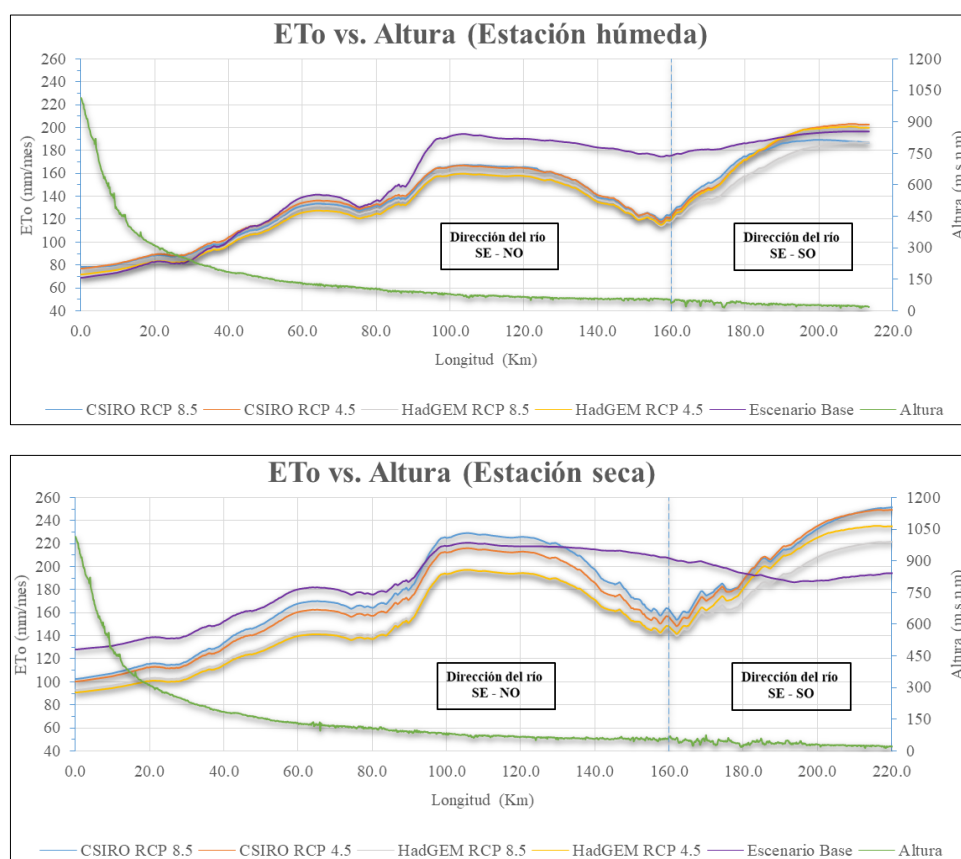


Figura 5. ET<sub>o</sub> vs. Altura, de los escenarios futuros por estaciones.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El río Piura es una fuente importante para la agricultura, el ecosistema y el suministro de agua  
*Rev. Investig. Altoandín. 2019; Vol 21 Nro 3 182 - 193*

potable en la costa norte de Perú. Por lo tanto, analizar la disponibilidad hídrica futura considerando los impactos del cambio climático es un tema crucial. Para este fin, los resultados del modelo SWAT; según



las pautas dadas por Abbaspour et al. (2015) para la ejecución general de la modelación en términos de índices estadísticos ( $R^2$  y  $NSE$ ) puede considerarse buena; en particular, por las condiciones de ocurrencia de eventos extremos en la cuenca. El rendimiento del modelo muestra un acuerdo satisfactorio entre los valores observados y los simulados para la escorrentía superficial. Los resultados de calibración y validación varían entre 0,90 a 0,81 ( $R^2$ ), y 0,89 a 0,76 ( $NSE$ ), respectivamente.

El análisis climático al 2025-2054 adoptando los modelos HADGEM2-ES y CSI-RO-Mk3-6-0 en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 junto con la herramienta MarkSim mostro resultados óptimos, acorde con experiencias anteriores en otras zonas (Fitsum, 2015), previa corrección del sesgo de los datos futuros utilizando 23 años de datos observados (1986-2008).

La data climática futura proyectada en los cuatro escenarios de emisiones mostro que la precipitación proyecta una tendencia ligera creciente en la parte baja, especialmente en la estación húmeda. La similitud entre la precipitación promedio futura comparada al escenario base se puede explicar debido a que el período de tiempo futuro es relativamente corto y cercano (Anand et al., 2018). Asimismo, el aumento de temperatura en todas las estaciones tiene los mayores incrementos en la estación seca. En esta última, se pronostica un descenso considerable del caudal, y de forma opuesta, en la estación húmeda el caudal aumentaría en mayor proporción hacia el 2050. El volumen del flujo mensual de los caudales futuros en el escenario RCP 4.5 en ambos modelos, proyectan para la estación húmeda un aumento de +103,4% (80,5 m<sup>3</sup>/s). En cambio, para la estación seca, se proyecta una disminución de -64,4% (11,7 m<sup>3</sup>/s). Por otro lado, los escenarios RCP 8.5 proyectan para la estación húmeda un aumento de +40,2% (31,3 m<sup>3</sup>/s). Y, en la seca una disminución de -67,7% (12,3 m<sup>3</sup>/s). Con una mayor certeza en los meses entre enero y setiembre, al presentar resultados similares entre los escenarios futuros.

El aumento de la temperatura en un futuro, si bien es cierto, predispone mayores tasas de evapotranspiración, esta última también se encuentra limitada por la disponibilidad de agua en el suelo, la cual no se incrementa significativamente en el periodo futuro analizado y, en consecuencia, este efecto no es pronunciado como podría esperarse. Aunque, la diferencia entre la ETo en el escenario base y los escenarios futuros; siguiendo el cauce del río, alrededor del kilómetro 160 del río Piura, se origina por el cambio pronunciado del cauce del río con sentido inicial NW-SE, hacia la dirección suroccidental para desembocar en el Océano Pacífico. Evidenciándose una variación evidente debido a que los valores más altos de ETo, en el futuro, se observan en la zona baja sur de las subcuencas cerca al lado occidental; mientras que los valores menores de ETo están en el lado nororiental de las subcuencas.

## CONCLUSIONES

Se generó simulaciones satisfactorias en la escorrentía superficial, en la estación de aforo, para los escenarios de cambio climático proyectados al 2050. Los valores de escorrentía proyectados en los escenarios indican una disminución de la oferta promedio anual en un 12% (75 m<sup>3</sup>/s), excepto en el escenario HADGEM2-ES RCP 8.5, el cual aumenta en 4% (25 m<sup>3</sup>/s). El modelo proyecta estas disminuciones en los valores por estaciones siendo más acentuados a lo largo del tiempo. La variación, genérica de la escorrentía superficial es incrementarse en la estación húmeda y las disminuir en la estación seca. Esta diferencia marcada de la escorrentía se intensifica a lo largo del tiempo. La tendencia promedio del total de proyecciones en los cuatro escenarios futuros considerados indican para la estación húmeda un aumento aproximado de la escorrentía mensual de +71,8% (55,9 m<sup>3</sup>/s); ocurriendo los mayores incrementos en los meses de octubre, noviembre y diciembre. Y, una disminución promedio del -66,1% (12 m<sup>3</sup>/s) en la estación seca; ocurriendo los mayores descensos en los meses de julio, agosto y setiembre, de hasta -80,8%, -78,0% y -79,3% respectivamente.

Los resultados manifiestan el impacto del cambio climático en la cuenca. Aunque no se identifica una relación lineal indicativa entre la temperatura, evapotranspiración y escorrentía. Esto estipula que, aunque el estudio muestra una proyección climática más cálida, el cambio de temperatura no tiene en cuenta las variaciones interanuales de la escorrentía superficial y los valores de evapotranspiración. El aumento en la precipitación promedio favorece la ocurrencia de eventos como inundaciones, FEN, llevando a un cambio en su frecuencia e intensidad. Al contrario, la disminución de las precipitaciones en invierno puede incrementar la demanda de agua, en especial, con fines de uso agrícola y poblacional, ya que los escenarios muestran que la disponibilidad de agua en la estación seca tiende a disminuir gradualmente con una tasa mayor que los valores anuales promedio, lo que pondría en riesgo el caudal ecológico y probablemente la viabilidad de futuros proyectos de infraestructura hidráulica. Por lo tanto, acciones preventivas en la cuenca, como implementar sistemas de alerta temprana, identificar áreas propensas a sequías e inundaciones, y la gestión de seguridad de los reservorios deben ser consideradas esenciales.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue apoyado por el Departamento de Recursos Hídricos (DRH) de la Facultad de Ingeniería Agrícola (FIA) en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Los autores desean expresar su agradecimiento por esta cooperación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- Abdo, K.S., Fiseha, B.M., Rientjes, T.H.M., Gieske, A.S.M., Haile, A.T. (2009). Assessment of climate change impacts on the hydrology of Gilgel Abay catchment in Lake Tana basin, Ethiopia. *Hydrological Processes*. 23(26), 3661–3669. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7363>
- Alam S., Ali M.M., y Islam Z. (2016). Future streamflow of Brahmaputra River basin under synthetic climate change scenarios. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(11), 05016027. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001435](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001435)
- ANA. (2012). *Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos de la cuenca Chira - Piura: Informe principal*. Recuperado de: <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/1962>
- Anand, J., Gosain, A.K., y Khosa, R. (2018). Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model. *Sci. Total Environ.* 644, 503–519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.017>
- Arnold, J., y Fohrer, N. (2005). SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3), 563-572. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- Birhanu, B.Z., Ndomba, P.M. y Mtaló, F.W. (2007). Application of SWAT Model for Mountainous Catchment. *Proceedings of LARS 2007. Catch. Lake Res.*, 182–187. Recuperado de: <http://www.uni-siegen.de/zew/publikationen/volume0607/birhanu.pdf>
- Fitsum, B. (2015). *Characterizing Current and Future Rainfall Variability and its Effect on Wheat and Barley Production in Sinana District, South Eastern Ethiopia* (master's thesis). Haramaya University, Oromia, Etiopía. Recuperado de: <https://www.ruforum.org/sites/default/files/Fitsum%20Msc%20thesis%20fina%20for%20submission.pdf>

- García-González, S. E. (2015). *Streamflow Response to Land-cover Change in Southern Mexico: Projections of Water Balance in the Tulija River Watershed* (master's thesis). The Pennsylvania State University, Pennsylvania, USA. Recuperado de: [https://etda.libraries.psu.edu/files/final\\_submissions/10853](https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/10853)
- Ghaffari, G., Keesstra, S., Ghodousi, J., y Ahmadi, H. (2010). SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran. *Hydrological Processes*, 24(7), 892–903. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7530>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Jones, P.G., y Thornton P.K. (2013). Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. *Agricultural System*, 114, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.08.002>
- Joo, J., Zhang, A., Li, X., y Zheng, C. (2017). Hydrological responses to climate shifts for a minimally disturbed mountainous watershed in northwestern China. *Hydrological Sciences Journal*. 62(9), 1440–1455. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1316851>
- Li, T., y Gao, Y. (2015). Runoff and sediment yield variations in response to precipitation changes: a case study of Xichuan watershed in the loess plateau, China. *Water* 7(10), 5638–5656. DOI: <https://doi.org/10.3390/w7105638>
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., García-González, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., et al., (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manag.* 259, 698–709. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- Muluneh, G. (2015). *Analysis of Past and Future Intra-Seasonal Rainfall Variability and its Implications for Crop Production in the North Eastern Amhara Region, Ethiopia*. (M.Sc. thesis). Haramaya University, Oromia, Etiopía. Recuperado de: <https://www.ruforum.org/sites/default/files/Muluneh%20final%20MSc%20Thesis.pdf>
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., y Williams, J. (2002). Soil and Water Assessment Tool User's Manual: Version 2000. U.S. Department of Agriculture - Agricultural Research Service, Grassland Soil and Water Research Laboratory and Texas A&M University, Blackland Research and Extension Center, Temple, TX. 2002. Recuperado de: <https://swat.tamu.edu/docs/>
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J.; Srinivasan, R., y Williams, J. (2004). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation: Version 2005. Temple, Tex.: *USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory*. 2005. Recuperado de: <https://swat.tamu.edu/docs/>
- Ramos, Y., (2014). *Estimación del efecto del cambio climático en la precipitación en la costa norte del Perú usando simulaciones de según los modelos climáticos globales* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Recuperado de: [http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/2014/tesis\\_final\\_yakelyn\\_ramos.pdf](http://www.met.igp.gob.pe/publicaciones/2014/tesis_final_yakelyn_ramos.pdf)
- SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2005). *Escenarios del Cambio Climático en el Perú 2004 – 2050. Cuenca del río Piura*. Recuperado de: <http://siar.regionpiura.gob.pe/admDocumento.php?accion=bajar&docadjunto=216>
- Srinivasan, R. (2015). Soil and Water Assessment Tool Beginner SWAT Training Manual. Workshop at Spatial Science Laboratory. *AgriLife Research*. Texas A&M University. Recuperado

de: [http://www.crs4.it/repository/documents/conferences/swat\\_2015/introductory\\_manual\\_updated\\_oct\\_2012.pdf](http://www.crs4.it/repository/documents/conferences/swat_2015/introductory_manual_updated_oct_2012.pdf)

- Tyndall, Centre for Climate Change Research. (2004). *New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity. Technical Report*. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.112.2300&rep=rep1&type=pdf>
- Yang N., Men B.-H., y Lin C.-K. (2011). Impact Analysis of Climate Change on Water Resources. *Procedia Engineering*, 24, 643–648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2710>
- Yates, D., y Angarita, H. (2014). Developing climate scenarios. Partnering for Adaptation and Resilience - Agua (PARA-AGUA)

Project. Perú. University Corporation for Atmospheric Research, acting on behalf of The National Center for Atmospheric Research. *AECOM International Development*. Recuperado de: [http://www.para-agua.net/component/k2/download/47\\_744e4500606b4afccf1fc7b45c86c971](http://www.para-agua.net/component/k2/download/47_744e4500606b4afccf1fc7b45c86c971)

- Zheng, J., Li, G., Han, Z., y Meng, G. (2010). Hydrological Cycle Simulation of An Irrigation District Based on A SWAT model. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(11-12), 1312–1318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2009.10.036>