

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



Una Institución Adventista

**Modelamiento de la vulnerabilidad del recurso hídrico
considerando la incidencia del cambio climático en la cuenca del
rio Chancay – Lambayeque utilizando SWAT**

Por:

Jose Walther Ccama Vilca
Rosmery Elena Turpo Turpo

Asesor:

Dr. Efrain Lujano Laura

Juliaca, agosto de 2020

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Dr. Efrain Lujano Laura, de la Facultad de Ingeniería Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente trabajo de investigación titulado: "MODELAMIENTO DE LA VULNERABILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO CONSIDERANDO LA INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO CHANCAY – LAMBAYEQUE UTILIZANDO SWAT" constituye la memoria que presentan los estudiantes Jose Walther Ccama Vilca y Rosmery Elena Turpo Turpo para aspirar al grado de bachiller en Ingeniería Ambiental, cuyo trabajo de investigación ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este trabajo de investigación son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 10 días del mes de septiembre del año 2020

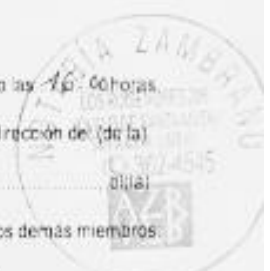


Dr. Efrain Lujano Laura

Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En Puno, Juliaca, Villa Chullunguani, a 06 día(s) del mes de agosto del año 2022 siendo las 16 horas,
 se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión campus Juliaca, bajo la dirección de (de la)
 presidente(a) Ing. Verónica Haydee Pari Mamani
 secretario(a) Msc. Rose Adeline Gallata Ghura y los demás miembros:
Msc. Bernardino Espia Aguilan
 y el(a) asesor(a) Dr. Msc. Efraim Lujano Laura



con el propósito de administrar el acto académico de sustentación del trabajo de investigación titulado Modelamiento de la vulnerabilidad del recurso hídrico considerando la incidencia del cambio climático en la cuenca del río Ichancay - Lambayeque utilizando SWAT

de los (las) egresados (as): a) José Walther Escama Vilca
 b) Rosmary Elena Zurpo Zurpo
 conducente a la obtención del grado académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental
(Denominación del Grado Académico de Bachiller)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando a los candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por los candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato/a (a): José Walther Escama Vilca

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Candidato/a (b): Rosmary Elena Zurpo Zurpo

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó a los candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

 Presidente/a

 Asesor/a

 Candidato/a (a)

 Secretaria

 Miembro

 Miembro

 Candidato/a (b)

Modelamiento de la vulnerabilidad del recurso hídrico considerando la incidencia del cambio climático en la cuenca del río Chancay–Lambayeque utilizando SWAT.

Ccama Vilca Jose Walther^{1*}, Turpo Turpo Rosmery Elena¹, Lujano Laura Efrain²

¹Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión – Chullunquiani Juliaca, Puno – Perú.

²Docente de la Universidad Peruana Unión, Escuela profesional de Ingeniería Ambiental.

Resumen

El recurso hídrico es uno de los recursos más vulnerables ante el cambio climático y constituye una preocupación a nivel global, alcanzando sus efectos de distinta forma a cada país. Algunos países están preparados para adaptarse y hacer frente a estos cambios inesperados, en especial a los cambios en la temperatura y precipitación. El objetivo de esta investigación es evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico respecto al cambio climático en la cuenca del río Chancay, utilizando el modelo semidistribuido SWAT. Para evaluar el cambio en el recurso hídrico se utilizaron los escenarios climáticos futuros de SSP5 4.5 y SSP5 8.5 a una resolución de 25 km del modelo climático global CNRM-ESM2-1, perteneciente al proyecto incorporado (CMIP6). La reducción de escala se desarrolló por el método de Quantile Mapping temperatura y precipitación diaria. Los resultados obtenidos del modelo SWAT demuestran un desempeño satisfactorio en el periodo de calibración con NSE = 0.56 y validación con NSE = 0.65. Los resultados de las proyecciones climáticas para la temperatura, precipitación y flujo tienden a incrementar hasta en 3°C, 59.7% y 62.9%, respectivamente para el año 2100 en la cuenca Chancay Lambayeque.

Palabra clave: Cambio climático, escenarios climáticos, modelación hidrológica, SWAT,

Abstract

Water is one of the most vulnerable resources in the face of climate change and constitutes a concern at the global level, with its effects reaching each country in different ways. Some countries are prepared to adapt and face these unexpected changes, especially changes in temperature and rainfall. The objective of this research is to evaluate water resource vulnerability to climate change in the Chancay River Basin, using the semi-distributed SWAT model. To evaluate the change in the water resource, future climate scenarios of SSP5 4.5 and SSP5 8.5 were used at a resolution of 25 km of the global climate model CNRM-ESM2-1, belonging to the incorporated project (CMIP6). The reduction of scale was developed by the Quantile Mapping method temperature and daily precipitation. The results obtained from the SWAT model show a satisfactory performance in the calibration period with NSE = 0.56 and validation with NSE = 0.65. The results of the climatic projections for temperature, precipitation and flow tend to increase up to 3°C, 59.7% and 62.9%, respectively, for the year 2100 in the Chancay Lambayeque basin.

Keywords: Climate change, Climate scenarios, modeling, SWAT.

1. Introducción

La disponibilidad hídrica en cuencas hidrográficas constituye una preocupación a nivel mundial debido a su uso trascendental para la vida. Este recurso es afectado directa e indirectamente por el cambio climático, puesto que existen zonas con incremento y disminución de temperaturas, con una ocurrencia similar en la precipitación, asociado a ello también, los cambios en su patrón estacional (Echeverría Bonilla, 2011). Un aspecto importante, a considerar en el recurso hídrico es la cantidad, calidad y distribución dentro de las cuencas, siendo una prioridad para los diferentes niveles de los gobiernos y organizaciones mundiales (Jayo Jiménez, 2011).

En el contexto de estudiar el recurso hídrico a nivel global nacen diferentes modelos de simulación que ayudan a comprender el comportamiento hidrológico, uno de ellos es el modelo Soil and Water Assessment

*Autor de correspondencia: Jose Ccama; Rosmery Turpo.

Km 6 salida Arequipa, Chullunquiani, Juliaca.

Tel.: 926051112

E-mail: jose.cv@upeu.edu.pe; rosmery.tt@upeu.edu.pe

Tool (SWAT), que es un software de código abierto desarrollado por el servicio de investigación agrícola (USDA) sirve como herramienta de predicción de los impactos del manejo de suelo en la generación de agua, producción de sedimentos y sustancias agrícolas en cuencas grandes y complejas mediante el modelamiento (Arnold et al., 2010). También es un modelo semi-distribuido que divide el área de una cuenca en múltiples unidades de respuesta hidrológica (HRU) según uso de la tierra, pendiente y tipo de suelo (Arnold et al., 2010; Marin et al., 2020). SWAT relaciona las variables ingresadas al modelo para brindar información suficiente y fiable siempre en cuando los datos modelados sean calibrados y validados, en campo o con datos históricos de las variables de respuesta que hayan sido registrados en la base de datos como meteorológicas e hidrológicas, esto ayuda a la adecuada gestión de la cuenca y así poder enfrentar el desafío de los impactos generados por el hombre también, ayudará en la elaboración de proyectos y modelamientos con datos de escenarios climáticos futuros que nos ayuden a comprender la influencia del cambio climático dentro de una cuenca (Devkota & Gyawali, 2015).

Las proyecciones del grupo intergubernamental sobre el cambio climático han determinado una serie de escenarios climáticos derivados del proceso que se llevan a cabo en la tierra y estos afectan al medio ambiente. El cambio climático ha sido plenamente demostrado por la IPPC (Bajracharya et al., 2018). Con el paso del tiempo se han desarrollado diferentes escenarios climáticos; según a la magnitud de forzamiento radiactivo que aportan al sistema natural del clima (Jodar Avellan et al., 2018); en la actualidad se cuenta con el proyecto de intercomparación de modelos acoplados de sexta generación CMIP6. Diferentes investigaciones a nivel global que utilizaron los modelos climáticos globales llegaron en su mayoría a un mismo resultado, aumentos de las temperaturas globales, variabilidad de los patrones de lluvia, etc. de manera significativa, afectando a la disponibilidad hídrica.

Nuestro país no es ajeno a esta problemática del cambio climático; los estudios demuestran el comportamiento hidrológico frente al cambio climático en la cuenca media y alta de Piura en donde se evaluaron los periodos húmedos, secos y anuales. Los resultados según los escenarios climáticos utilizados indican que para el periodo húmedo un aumento de la escorrentía de +71.8%, que representa a un flujo de 55.9 m³/s, ocurriendo los incrementos en los meses húmedos de octubre, noviembre y diciembre. Por otro lado, en el periodo seco se tiende a disminuir un -66.1%, representando la disminución del flujo en 12 m³/s. aconteciendo los mayores descensos en los meses secos de julio, agosto y setiembre. Según los resultados, el rendimiento del modelo hidrológico SWAT es satisfactorio y también demuestra la capacidad de simular las condiciones hidrológicas de la cuenca en estudio (Leon Ochoa, 2017). De igual forma SWAT- CUP es práctico y confiable a la hora de analizar la sensibilidad de los parámetros de SWAT y utilizar para la calibración y validación del modelo hidrológico de la cuenca.

Otra investigación que se tiene como referencia, es el estudio aplicado en la cuenca de río Santa donde se utilizó el modelo SWAT para las proyecciones futuras de escorrentía superficial y sedimentos en suspensión, que son influenciados por el cambio climático en la disponibilidad hídrica donde indica que los caudales al 50% de persistencia incrementarían en +18% durante el periodo húmedo y en +7% durante el periodo seco. Los caudales al 75% de persistencia, aumentarían en + 10% para el periodo húmedo y en +2% durante el periodo seco. En lo que respecta a la persistencia del 90% las descargas se incrementan en +6% durante el periodo húmedo, pero se reducirían en -5% durante el periodo seco (Valladares Martel, 2017).

En la última década se han visto registros de eventos extremos de precipitación y temperatura, tales evidencias están reflejados principalmente en sequías e inundaciones, con una mayor incidencia en la costa peruana, estos eventos pueden agravarse en relación con el tiempo, dando lugar a pérdidas económicas, sociales y principalmente en la disponibilidad hídrica afectando a la agricultura, biodiversidad, etc. Por tal motivo el objetivo que se plantea en esta investigación es evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico, bajo la incidencia del cambio climático de las variables de temperatura y precipitación, mediante el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Chancay, con el software SWAT integrando en la interfaz del sistema de Información geográfica ArcGIS.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La cuenca hidrográfica del río chancay-Lambayeque se encuentra ubicado entre los departamentos Cajamarca y Lambayeque al norte del territorio peruano; con una extensión aproximada de 5,309 km², las aguas se van acumulando desde los 3797 msnm, desembocando en el océano pacifico; geográficamente se encuentra entre los paralelos 6°20 – 6°55 latitud sur y 78°38 – 80°03 longitud oeste; limita por el lado norte con la cuencas Motupe y Chamaya, por el sur Zaña, por el oeste Jequetepeque y por el oeste con el océano pacifico.

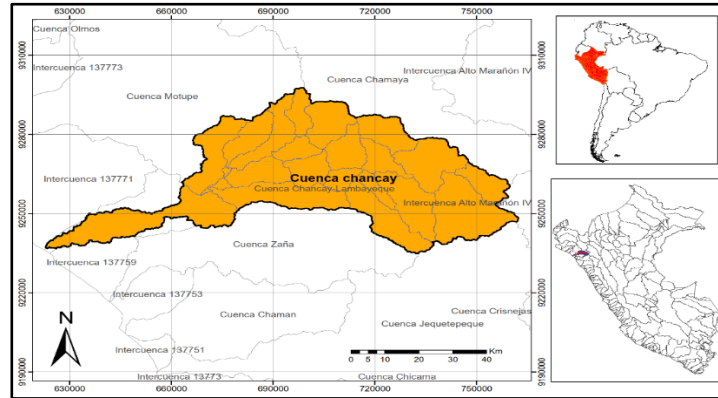


Figura 1: Ubicación del área de estudio.

2.2. Modelo SWAT

El modelo SWAT, fracciona una cuenca en diferentes subcuencas, para convertirlos en unidades de respuesta hidrológica, y luego combinarlos de manera homogénea los atributos de suelo, pendiente y cobertura vegetal (Arnold et al., 2010). SWAT simula el ciclo hidrológico según la ecuación del balance hídrico (Gassman et al., 2016).

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_{\alpha} - W_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Ecu... (1)}$$

Donde:

SW_t: Contenido final de agua en el suelo (mm).

SW_o: Contenido inicial de agua en el suelo (mm), t tiempo (días).

R_{day}: Precipitación durante día (mm).

Q_{surf}: Escorrentía superficial durante el día (mm).

E_α: Cantidad de evapotranspiración en el día.

W_{seep}: Agua que ingresa a la zona vadosa desde el perfil del suelo en el día (mm).

Q_{gw}: Descarga del agua en el día (mm).

La escorrentía de las diferentes subcuencas se direcciona a la escorrentía total de la cuenca hidrográfica. El modelo SWAT para el modelamiento de la cuenca del río chancay se instaló en la interfaz de ArcSWAT 2012 (Arnold et al., 2010). Los datos requeridos para la implementación del modelo y los pasos involucrados se analizan brevemente posteriormente.

2.3. Modelo de elevación digital

El modelo digital de elevación (DEM), es utilizado para la delimitación de las subcuencas que forman la cuenca y la generación de la red hídrica dentro la cuenca y subcuencas, esto es realizado en la interfaz de ArcSWAT, para esto se emplearon imágenes de ALOS PALSAR – ASF alaska Satellite Facility de resolución cuadrangular de 12.5 x 12.5 m en formato raster con proyecciones en transverse mercator (UTM) en el esferoide WGS84 de la zona 17S, disponible en: <https://search.asf.alaska.edu/#/>.

2.4. Cobertura vegetal y uso de suelo

Se define a los diferentes tipos de uso de suelo que se dan dentro de la cuenca, esto influye en las propiedades hidrológicas de la cuenca en estudio, la cartografía del uso de suelo se obtuvo del Mapa Nacional de Ecosistemas en formato shapefile MINAM a escala 1:100 000 actualizado en el año 2018, se encuentra disponible en <http://geoservidor.minam.gob.pe/recursos/intercambio-de-datos/>; para ingresar al modelo SWAT se realizó la adecuación de la información a una resolución de 12.5 m y fueron reclasificados los códigos del mapa a códigos de entrada SWAT.

2.5. Tipo de suelo

Está relacionado con la información de las propiedades físicas y químicas del suelo: textura, contenido de agua, conductividad hidráulica, densidad aparente, contenido de carbono orgánico, profundidad de horizonte y porcentaje de arena, limo y arcilla para cada horizonte de suelo, la cartografía del tipo de suelo que se utilizó para el modelamiento en ArcSWAT es de la Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y alimentación FAO en formato shapefile del siguiente link <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/>; esto para ver las combinaciones de los HRU, y de igual forma para realizar los cálculos hidrológicos.

2.6. Clasificación de pendientes

La clasificación de pendientes es obtenida a partir del DEM (ALOS PALSAR). El modelo permite la clasificación de pendientes de acuerdo al propósito del modelado. Para este estudio, se clasificaron de acuerdo a los rangos recomendados del ministerio de agricultura (D.S. N°017-2009-AG).

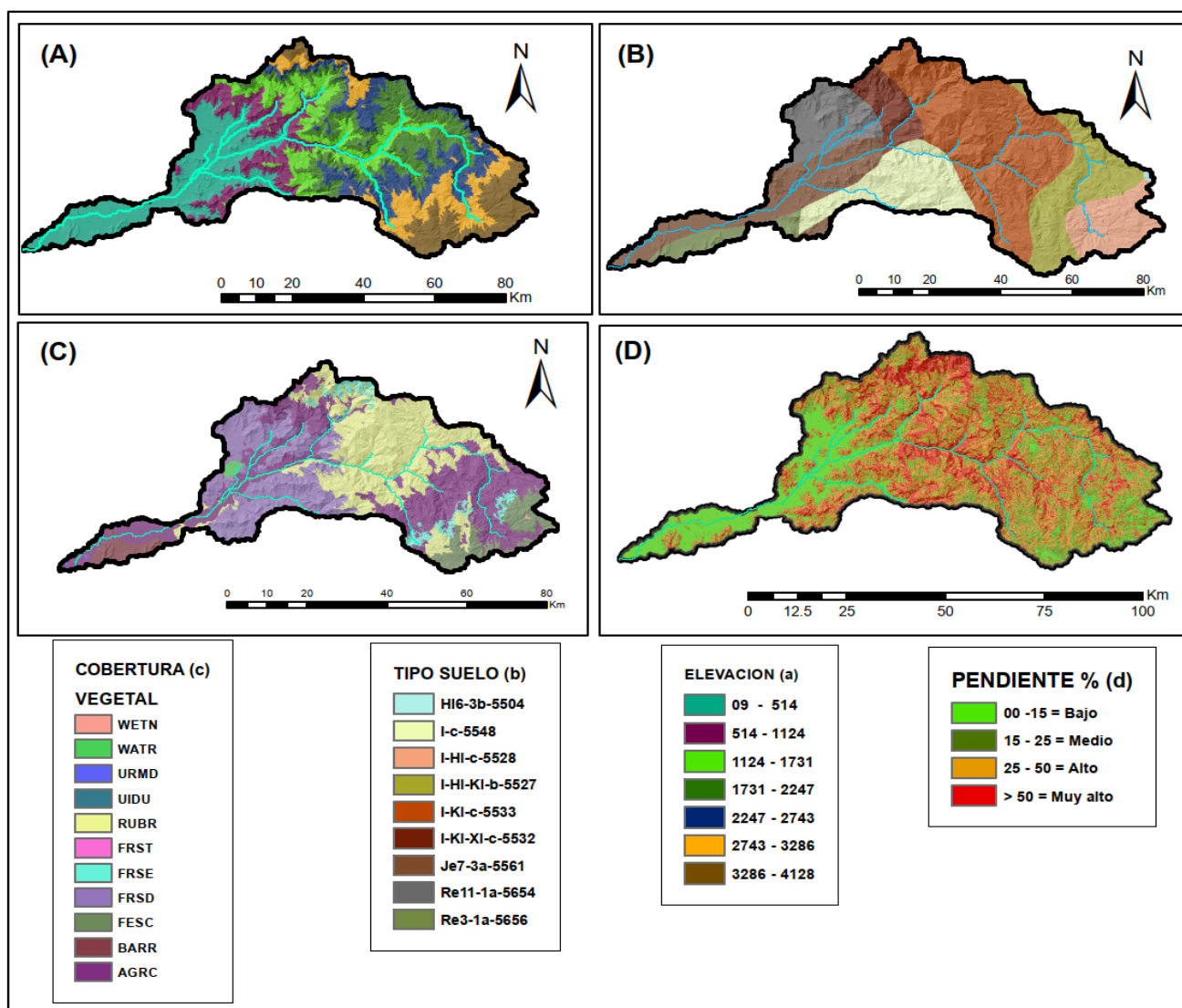


Figura 2: a) Mapa de elevación, b) Tipo de suelo, c) Cobertura y d) Pendientes.

2.7. Datos hidrometeorológicos

Los datos históricos hidrometeorológicos, datos grillados de precipitación (PISCO V 2.1), temperatura (PISCO 1.0), se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI. Los datos grillados PISCO se encuentran disponibles en ftp://r-publi_dgh2:s0loLectur%40@ftp.senamhi.gob.pe/ desde enero de 1981 hasta diciembre 2016, con resolución espacial de 0.05° (~ 5km) y resolución temporal diaria (Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega & Sabino, 2017). Los datos climáticos utilizados para el modelo hidrológico SWAT (28 años de 1987 hasta 2015), son de precipitación diaria, temperatura máxima y mínima diaria y los otros parámetros humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar fueron utilizados de la base de datos global, incluida en SWAT.

Los datos de flujo registrados a paso diario, que es utilizado de 1990 - 2009 para realizar el análisis de sensibilidad, calibración (13 años) y validación (7 años) del modelo generado por SWAT con un solo punto de aforo por la falta de estaciones hidrológicas, dentro de la cuenca.

Tabla 1

Ubicación de estaciones meteorológicas e hidrológicas

Nº	Estación	Registro	Latitud	Longitud	Altura (m.s.n.m)
1	Reque*	1987 – 2009	-6.88617	-79.83544	21
2	Cayalti*	1987 – 2009	-6.88079	-79.54701	90
3	Llama*	1987 – 2009	-6.51444	-79.12250	2133
4	Chancay baños*	1987 – 2009	-6.57501	-78.86722	1677
5	Tinajones*	1987 – 2009	-6.71373	-79.56500	226
6	Santa Cruz*	1987 – 2009	-6.63306	-78.94750	2026
7	Huambos*	1987 – 2009	-6.45361	-78.96306	2293
8	Espinal*	1987 – 2009	-6.82555	-79.21638	447
9	Sipan*	1987 – 2009	-6.80139	-79.60002	110
10	A1 (pisco) ¹	1987 – 2009	-6.41886	-79.22106	3196
11	A2 (pisco) ¹	1987 – 2009	-6.58381	-79.37505	310
12	A3 (pisco) ¹	1987 – 2009	-6.71307	-79.16022	2297
13	A4 (pisco) ¹	1987 – 2009	-6.84277	-78.76627	3274
14	Racarumi ^(Q)	1987 – 2009	-6.63333	-79.31666	250

(*) Estaciones meteorológicas.

⁽¹⁾ producto grillado pisco SENAMHI.

^(Q) Estación hidrométrica.

2.8. Análisis de sensibilidad, calibración y validación

SWAT cuenta con diferentes parámetros de calibración que lo hacen complicados a la hora de ajustar los resultados modelados a los datos observados (Thavhana et al., 2018), para este análisis se empleó SWAT-CUP, en primer lugar se ha hecho el análisis de sensibilidad de los parámetros más influyentes en el modelo con la finalidad de limitar el modelo a los parámetros óptimos empleando el algoritmo “Sequential Uncertainty Fitting 2 (SUFI2), del programa.

La calibración y validación se llevaron a cabo comparando los flujos de corriente simulados con los valores de descarga diaria (Desta & Lemma, 2017), medidos en la estación Racarumi Lambayeque. La simulación del modelo se dio inicio a partir del 1 de enero de 1987 hasta 31 diciembre de 2015, y los primeros 3 años (1987 - 1990) se utilizaron como período de calentamiento y los datos de flujo de la corriente de 19 años, de

los cuales 12 años (1990 – 2002) se destinaron para la calibración y los 7 años restantes (2003 - 2009) para la validación del modelo.

Para ver el desempeño del modelamiento hidrológico se utilizó el análisis gráfico y estadístico, como el coeficiente de eficiencia Nash – Sutcliffe (NSE), coeficiente de determinación (R^2) y sesgo porcentual (PBIAS).

2.9. Escenarios climáticos proyectados

El modelo climático utilizado es un modelo de sistema terrestre de resolución estándar (CNRM-ESM2-1) y los escenarios climáticos futuros corresponden a las proyecciones climáticas del diseño conceptual básico, representado por las rutas socioeconómicas compartidas (SSP 4.5 y SSP 8.5) para generar los flujos futuros; el modelo climático cuenta con una data histórica 1950 – 2014 y data proyectada 2015 – 2100 disponible en <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>. La resolución de los datos descargados es de 25 km en formato NetCDF; para la extracción de estos datos se realizó con el software ArcGIS y la reducción de escala “Dawnsaling” en Rstudio por el método Qmap.

2.9.1. Reducción de escala Dawnsaling

Es realizado por el método Quantile Mapping (Maintainer & Gudmundsson, 2016), en el software Rstudio, alimentado al programa con los datos de los escenarios climáticos de 1987 - 2074 y datos observados de 1987 - 2014 en un mismo rango durante el periodo de simulación y proyección. Posteriormente se corre con el Scripts de Qmap adaptado por (Traverso Yucra, 2018). Finalmente, con los datos obtenidos se procede a proyectar en SWAT desde el año 2015-2074.

3. Resultados y discusión

3.1. Delimitación de la cuenca

La cuenca del río Chancay abarca un área total de 3788 km², perteneciente a la vertiente del pacifico, cuenta con un total de 23 subcuencas delimitados por SWAT, la cuenca se encuentra en rango de elevación de 0 - 4213 m.s.n.m: Las áreas con mayor elevación se encuentran en el departamento de Cajamarca, donde nace la cuenca del río Chancay y las áreas con menor elevación se encuentran en la cuenca baja del río Chancay del departamento de Lambayeque.

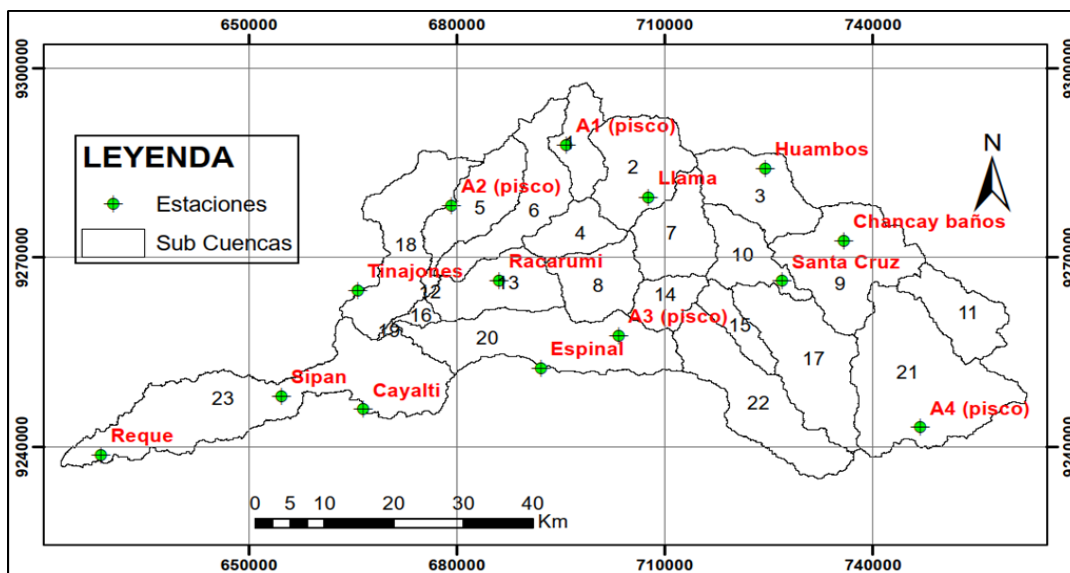


Figura 3: Delimitación de la subcuencas Chancay Lambayeque

3.2. Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se consideraron un total de 9 parámetros hidrológicos, para ver los parámetros más sensibles que tienen una influencia significativa en los parámetros observados en la figura 3 y tabla 2.

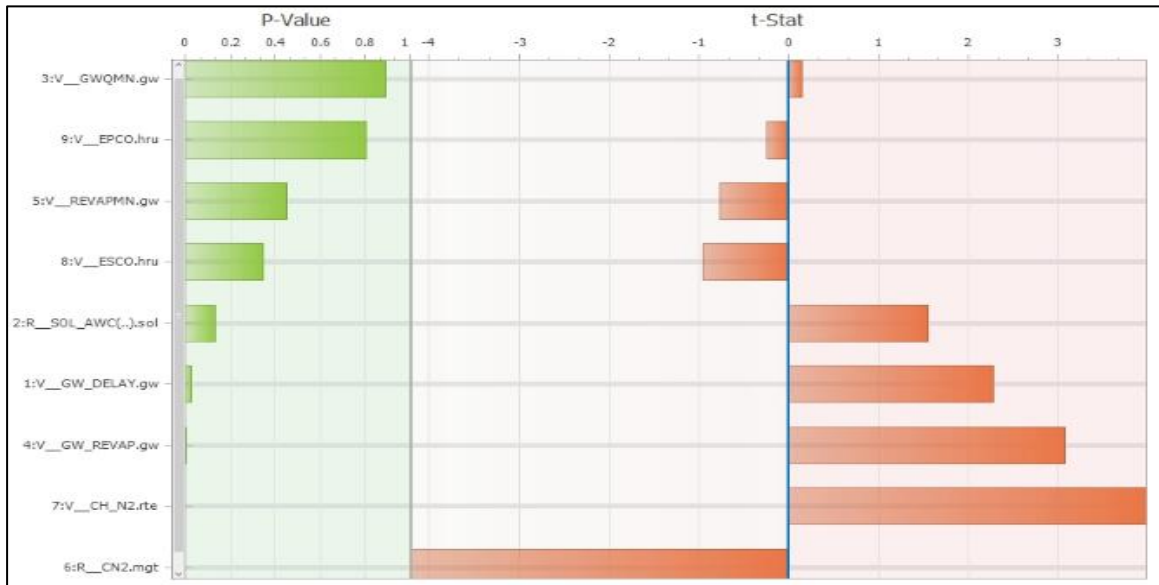


Figura 4: Resultado de análisis de sensibilidad de los parámetros SUFI-2.

Según Weber & Ocampo (2019), los parámetros con factor p-value mayor o igual que 0.2 deben ser considerados para la calibración. Y según la figura 3 cumplen estas condiciones 4 parámetros, incluidos CN, CH_N2, GW_REVAP, GW DELAY y R_SOL_AWC por los altos valores de t-Stat; Por ello, aunque los parámetros no destacaron como importantes para p-Value se deben considerar para la calibración y validación.

Tabla 2

Resultado de los parámetros calibrados

Ranking	Parametros	Definición	t-Stat	P-Value
1	V_GW_DELAY.gw	Retraso del agua subterránea (días)	2.281	0.028
2	R_SOL_AWC(..).sol	Capacidad de agua disponible de la capa del suelo.	1.546	0.130
3	V_GWQMN.gw	Se requiere una profundidad de tres aguas de agua en el acuífero poco profundo para que ocurra el flujo de retorno (mm)	0.142	0.888
4	V_GW_REVAP.gw	Coefficiente de "renovación" del agua subterránea	3.075	0.004
5	V_REVAPMN.gw	Umbral de profundidad de agua en el acuífero poco profundo para que ocurra la "renovación" (mm)	-0.761	0.451
6	R_CN2.mgt	número de curva de escorrentía	-4.195	0.000
7	V_CH_N2.rte	El valor "n" de Manning para el canal principal	3.983	0.000
8	V_ESCO.hru	Factor de compensación de evaporación del suelo.	-0.953	0.347
9	V_EPCO.hru	Factor de compensación de evaporación del suelo	-0.248	0.805

V El calificador (r_) indica que el parámetro se multiplica por 1 más el valor.

R El calificador (v_) se refiere a la sustitución del parámetro por el valor.

En la tabla 2, el factor t-Stat señala la medida de la sensibilidad, en donde los valores mayores son los más sensibles; por otro lado, p-Value determina la importancia de la sensibilidad, siendo lo valores más cercanos a cero las que son de mayor significancia.

3.3. Calibración del modelo

Según SENAMHI (2017), la calibración se realiza con dos tercios del total de los datos observados. La calibración del respectivo modelo hidrológico, se realizó con los registros de flujo diario, observado en la estación hidrológica de Racurumi, del año 1990 – 2002. La tabla 2 muestra los parámetros utilizados en la calibración.

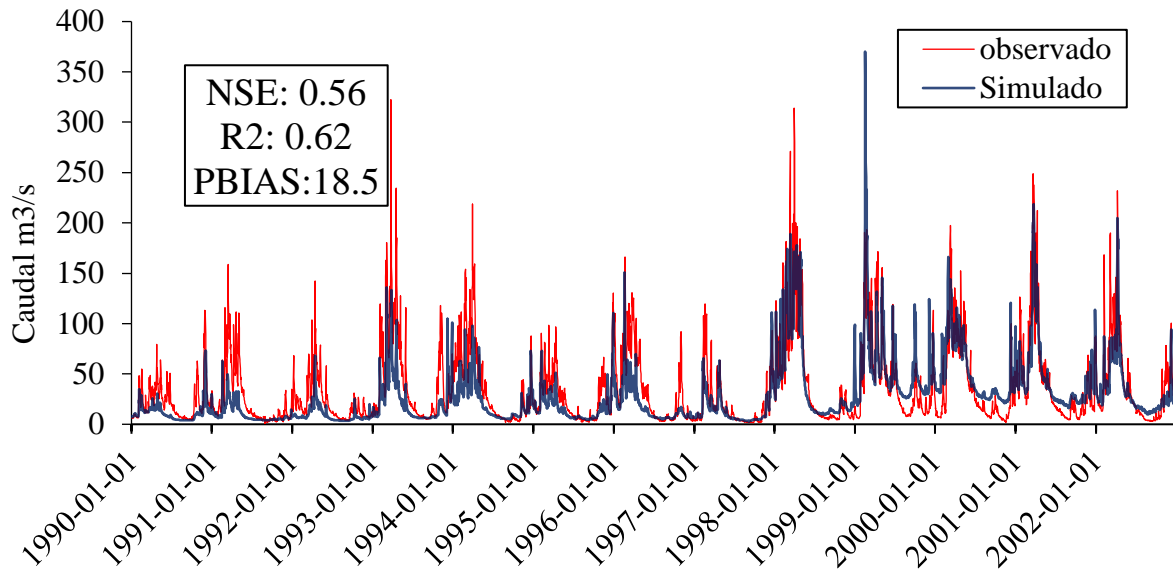


Figura 5: Calibración del modelo a paso diario.

En la figura 4 se muestran los datos simulados y observados en donde el modelo simulado tiene relación según la gráfica. Sin embargo, tiene sobreestimaciones y subestimaciones en el flujo de salida, con eficiencia del NSE = 0.56, coeficiente de determinación $R^2 = 0.62$ y PBIAS = 18.5 estos resultados indican que el modelo tiene un desempeño satisfactorio.

3.4. Validación del modelo

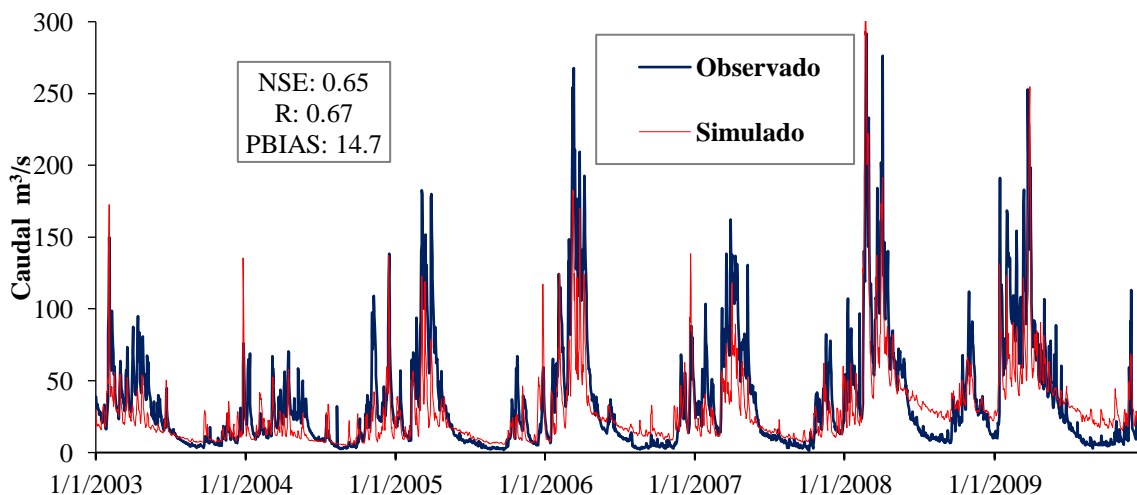


Figura 6: Validación del modelo a paso diario.

En la figura 5 muestra los flujos simulados y observados para el periodo de validación del 2003 – 2009, en donde se observa la relación de los flujos, sin embargo, el modelo subestima el flujo de salida con resultados de un NSE = 0.65, cuyo coeficiente de determinación es $R^2 = 0.67$ y PBIAS = 14.7, los resultados nos indican que el modelo tiene un desempeño satisfactorio. Las subestimaciones en el modelamiento son atribuidos a la presas hidráulicas y otros factores como canales de riego, hidroeléctricas, etc. (Arnold et al., 2010). SWAT cuenta con las herramientas de ingreso de las presas, canales de riego; para el modelamiento en la cuenca del rio chancay no se consideró la presa hidráulica Llaucano.

3.5. Efectos del cambio climático

Se consideraron dos incertidumbres climáticas, temperatura y precipitación media anual; para ver la influencia del cambio climático en la disponibilidad hídrica en la cuenca Chancay se realizó comparando los datos observados como escenario base y los escenarios futuros del CMIP 6 del modelo CNRM-ESM2-1 con las rutas SSP 4.5 y SSP 8.5, para proyectar hasta el periodo futuro (2015-2100).

3.5.1. Variación de la temperatura

La variación de la temperatura se analizó en las estaciones Chancay de zona alta de la cuenca, A4 (Pisco) y A2 (Pisco).

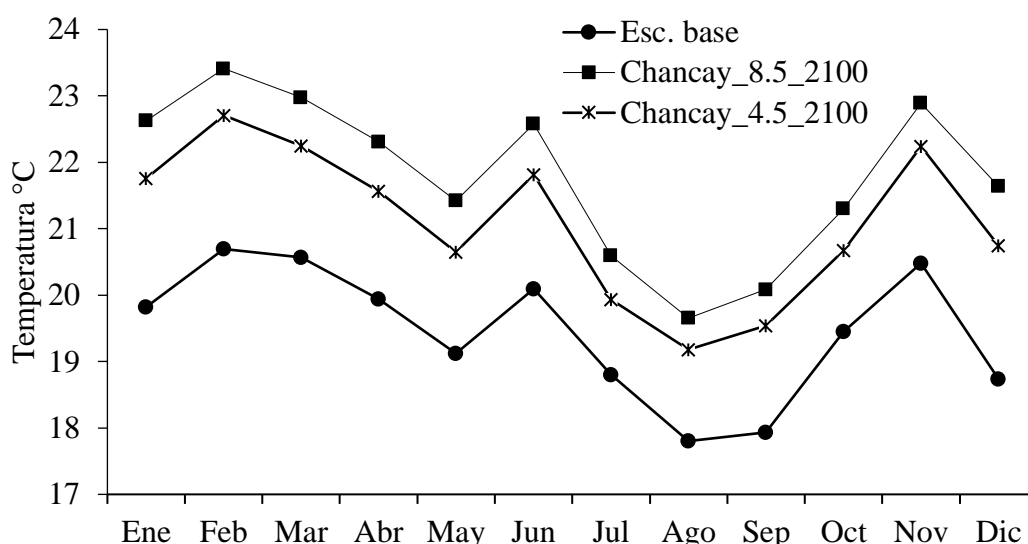


Figura 7: Temperatura media observada y modelo CNRM-ESM 2-1 estación Chancay

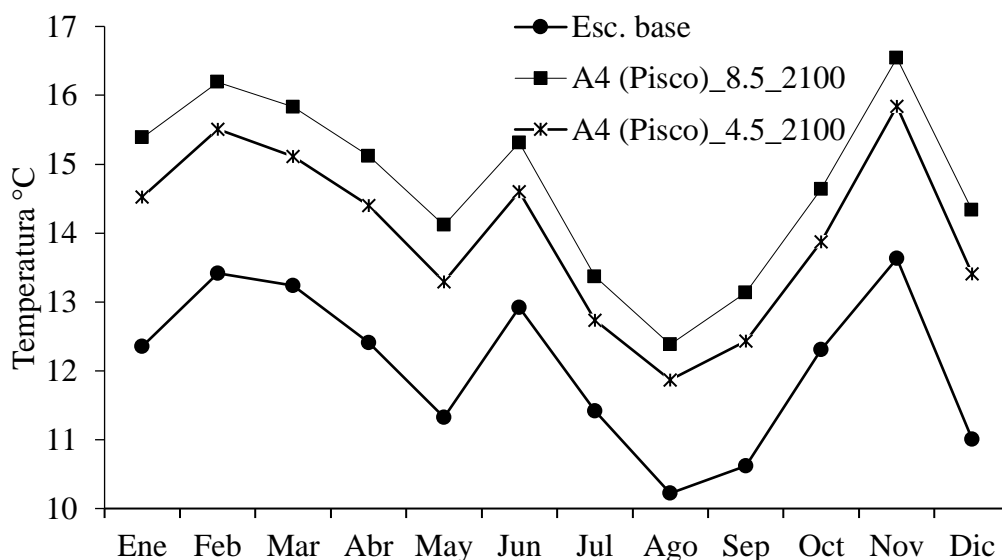


Figura 8: Temperatura media observada y modelo CNRM-ESM 2-1 estación A4 (Pisco).

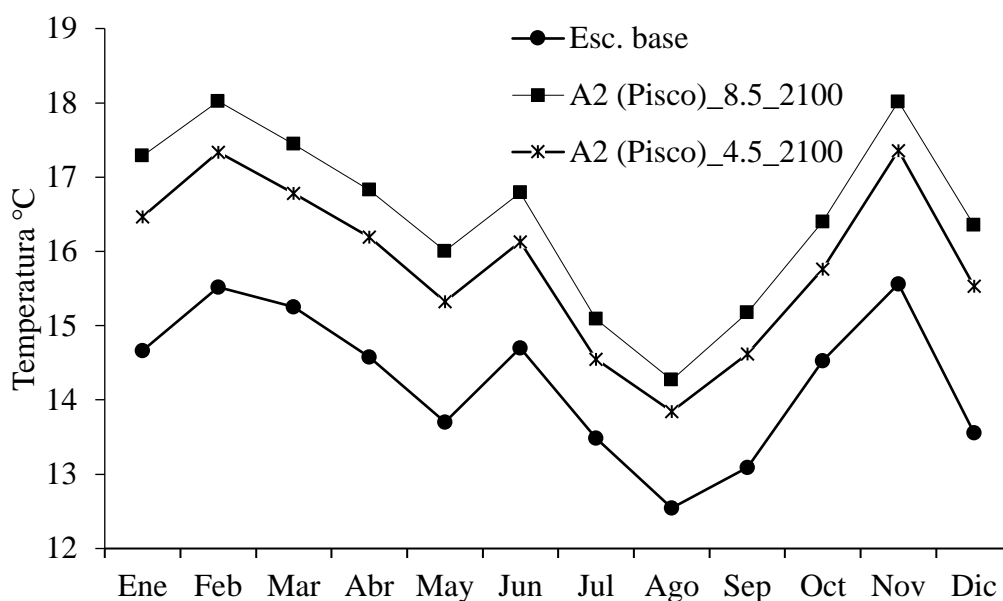


Figura 9: Temperatura media observada y modelo CNRM-ESM 2-1 estación A2 (Pisco).

En la figura 7, 8 y 9, se observa la temperatura media base y proyecciones climáticas futuras para los periodos futuros (2015 – 2100), y según la tabla 3, tendrá un incremento de temperatura media en las estaciones evaluadas: Chancay, A2 (Pisco) y A4 (Pisco). en las dos proyecciones generadas en los escenarios futuros, donde la ruta de SSP 8.5 tiene mayores incrementos en las tres estaciones, en comparación con la ruta SSP 4.5, esto es atribuido al aumento de las emisiones de los gases de efecto invernadero como se puede en la siguiente tabla.

Tabla 3

Variación de la temperatura para el año 2100.

Escenario	▲ Variación de temperatura (°C)											
	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Chancay_4.5	1.9	2.0	1.7	1.6	1.5	1.7	1.1	1.4	1.6	1.2	1.8	2.0
Chancay_8.5	2.8	2.7	2.4	2.4	2.3	2.5	1.8	1.9	2.2	1.8	2.4	2.9
A2 (Pisco)_4.5	1.8	1.8	1.5	1.6	1.6	1.4	1.1	1.3	1.5	1.2	1.8	2.0
A2 (Pisco)_8.5	2.6	2.5	2.2	2.2	2.3	2.1	1.6	1.7	2.1	1.9	2.5	2.8
A4 (Pisco)_4.5	2.2	2.1	1.9	2.0	2.0	1.7	1.3	1.6	1.8	1.6	2.2	2.4
A4 (Pisco)_8.5	3.0	2.8	2.6	2.7	2.8	2.4	2.0	2.2	2.5	2.3	2.9	3.3

3.5.2. Variación de precipitación

En las figuras 10, 11 y 12 se puede observar la precipitación promedio mensual de las estaciones de Chancay, A4 (Pisco) y A2 (Pisco), de la cuenca Chancay Lambayeque de acuerdo a la comparación del escenario base y el escenario futuro, las proyecciones realizados por el modelo CNRM-ESM 2-1, tendrán un incremento en los promedios de la precipitación mensual en los meses de enero, febrero, marzo, abril, octubre, noviembre y diciembre para el año 2100 de manera progresiva en las dos rutas (SSP 4.5 y SSP 8.5) y para los otros meses se tiene un descenso de la precipitación.

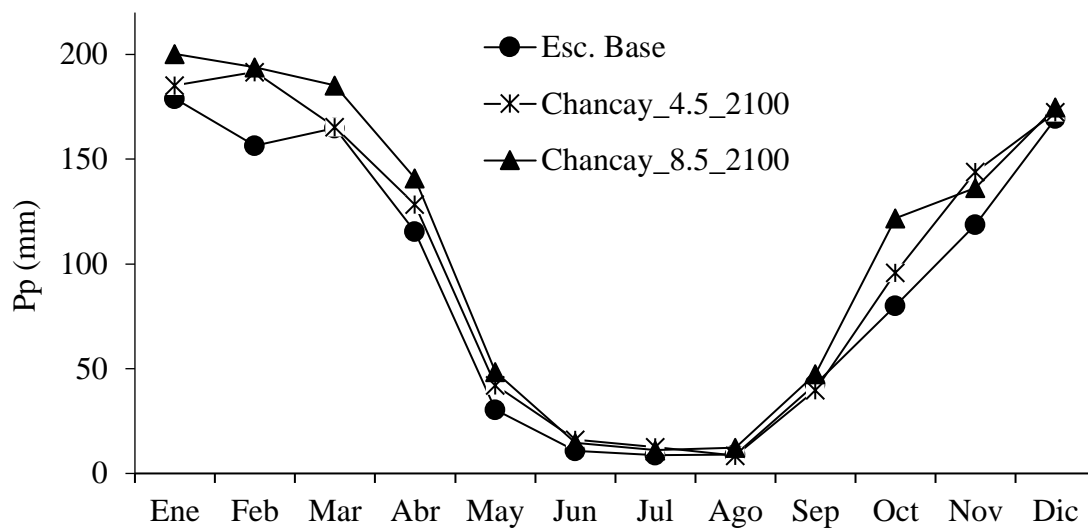


Figura 10: Precipitación media observada y modelo CNRM-ESM 2-1 estación Chancay.

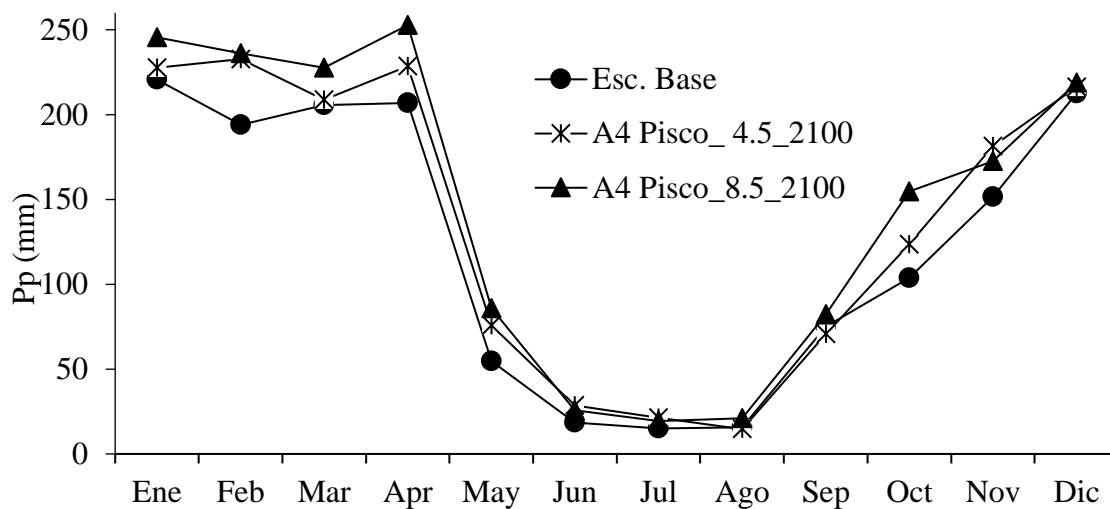


Figura 11: Precipitación media observada y modelo CNRM-ESM 2-1 estación A4 (Pisco).

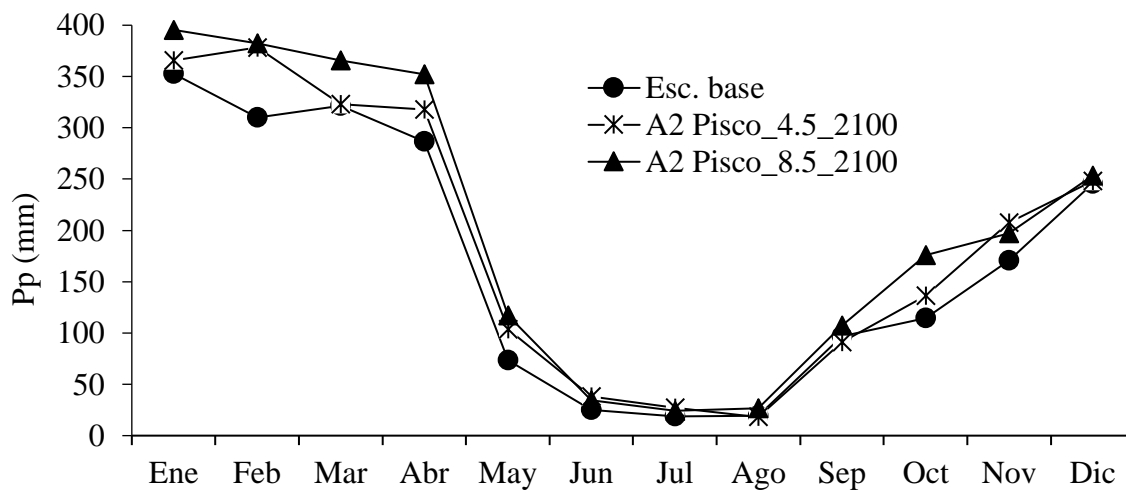


Figura 12: Precipitación media observada y modelo CNRM-ESM 2-1 estación A2 (Pisco).

En las figuras 8, 9 y 10, tabla 4 se observa la precipitación media mensual (mm) según el modelo CNRM-ESM2-1 en la ruta SSP 4.5, para el año 2100 en los meses agosto-septiembre disminuye la precipitación entre (-4.6% a -6.9%), y para los meses febrero, abril, mayo, junio y julio se incrementará la precipitación entre (10.4% a 54.1%) y en los meses enero, marzo y diciembre habrá un incremento de la precipitación en menor porcentaje entre (0.3% a 3.7%), todo esto ocurre en las tres estaciones analizadas.

En la ruta SSP 8.5 para el año 2100 en el mes de diciembre solo se incrementará la precipitación hasta en 3.2% y en los restantes meses habrá un incremento de la precipitación desde 9.7% hasta 59.7%, esto ocurre en las tres estaciones estudiadas.

Tabla 4

Variación de la precipitación para las estaciones Chancay, A4 (Pisco) y A4 (Pisco).

Escenario	▲ Variación de precipitación (%)											
	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Chancay_4.5_2100	3.5	22.5	0.3	11.3	39.1	50.3	44.1	-4.6	-6.7	19.5	21.1	1.8
Chancay_8.5_2100	11.9	23.9	12.4	22.2	59.7	35.5	27.7	37.1	11.3	52.0	14.8	3.1
A4 Pisco_4.5_2100	3.2	20.0	1.5	10.4	38.8	53.0	41.9	-6.9	-5.7	19.1	19.8	1.7
A4 Pisco_8.5_2100	11.3	21.7	10.8	22.2	56.9	37.9	28.9	34.1	9.7	48.9	14.0	3.0
A2 Pisco_4.5_2100	3.7	22.1	0.5	10.9	40.4	54.1	44.4	-7.8	-5.9	19.3	21.8	1.2
A2 Pisco_8.5_2100	12.1	23.4	12.6	22.9	59.0	38.7	29.2	35.5	10.4	53.8	15.5	3.2

Según el estudio realizado por la instituciones, Deltares, Inside y FutureWater, (2019) en su informe final señalan que para el periodo del 2020-2035, según el proyecto CMIP 5 del modelo GCM, considerados las cuatro trayectorias de concentración RCP (2.6, 4.5, 6.0, 8.5), Se proyectan aumentos en la temperatura media anual hasta en 3°C con relación al escenario base, en el mismo periodo se dan cambios en la precipitación anual que oscilan entre el -30% y en 10% con respecto al escenario base. De igual forma se proyectó para los periodos 2035 – 2065, un incremento de la temperatura media anual de hasta 4.5°C, mientras que para la precipitación variaría de -45% a 10%.

3.5.3. Variación de flujo

En la tabla 5 y grafica 10, se observa el flujo promedio mensual de la estación Racarumi como escenario base, y las proyecciones del escenario futuro CNRM-ESM2-1 con dos rutas de concentración de SSPs 4.5 y SSP 8.5. Se presenta la variación del flujo según el modelo CNRM-ESM2-1 con la ruta SSP 4.5, para el año 2100 se tendrá una disminución en el flujo en los meses agosto y septiembre de -6.3% hasta -19%. Asimismo, habrá un incremento en los meses restantes sobre la variación del flujo de 13.2% hasta 39%. Para la ruta SSP 8.5 para el año 2100, la variación del flujo se incrementará del flujo en todos los meses desde 11.2% hasta 62.9%.

Tabla 5

Flujo o caudal promedio mensual escenario base y modelo CNRM-ESM2-1.

Escenario	▲ Variación de flujo estación Racarumi (%)											
	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
SSP_4.5	38.98	24.98	21.1	30.08	42.88	47.06	19.15	-19.18	-6.25	21.01	13.17	19.17
SSP_8.5	24.73	16.71	11.16	18.94	45.37	53.21	46.73	57.81	62.91	14.01	12.06	38.75

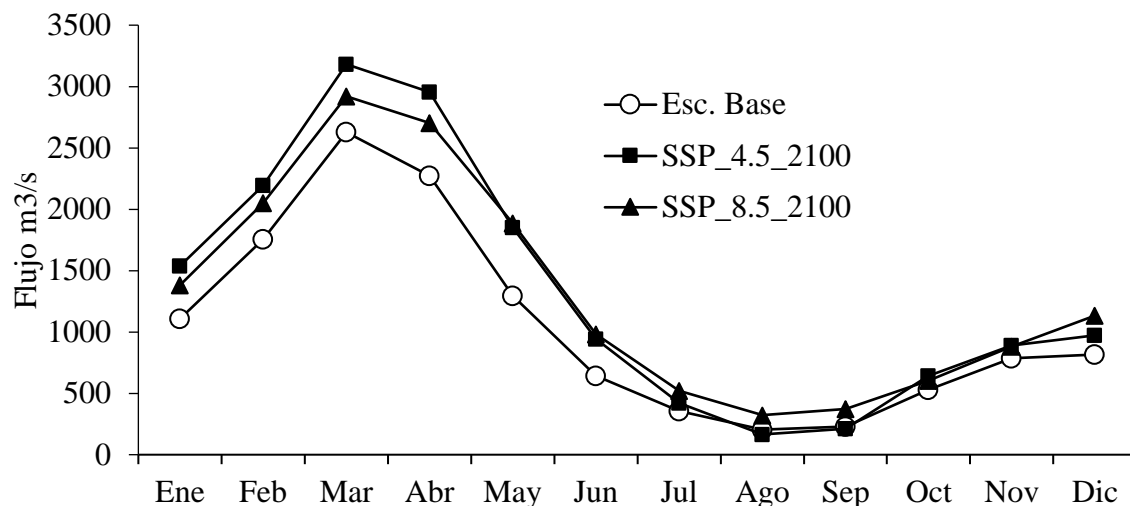


Figura 13: Flujo promedio del escenario base y modelo CNRM-ESM2-1 de la estación hidrométrica Racarumi.

4. Conclusiones

En conclusión, la herramienta de suelos y aguas SWAT integrado con el sistema de información geográfica ArcGIS es de gran ayuda para simular el flujo de la cuenca del río Chancay - Lambayeque durante el periodo de simulación de 1987 – 2014. La calibración y validación del modelo se realizaron a paso diario utilizando el ajuste secuencial de incertidumbre 2 (SUFI-2) dentro de SWAT CUP; En las salidas de calibración para la simulación diaria para el período 1990-2002 muestran un desempeño satisfactorio del modelo para descargas con valores NSE y R2 de 0.56 y 0.62 respectivamente. No obstante, durante el período de validación (2003–2009) a paso diario, con valores de NSE y R2 de 0.65 y 0.67 para las descargas. Los resultados obtenidos muestran que el modelo reproduce y proporciona una mejor comprensión del comportamiento del sistema hidrológico para lograr un manejo óptimo de los recursos hídricos.

Así mismo las proyecciones del cambio climático acoplados al modelo SWAT consideran las rutas de SSP 4.5 y 8.5 de escenario climático CNRM-ESM2-1 del CMIP 6. Para el escenario SSP 4.5 en la estación de Chancay tendrá un incremento de temperatura 2°C y 50.3% de precipitación, también experimentará la disminución de -4.6%. La estación A4 (Pisco) tiende a incrementarse hasta en 3.3°C y 53% en la precipitación de la misma manera con la tendencia a disminuir hasta -5.7 % en la precipitación. Asimismo, en la estación A2 (Pisco) tendrá un incremento de hasta 2 °C y 54.1% en la precipitación. El escenario SSP 8.5 en la estación de Chancay habrá un incremento de temperatura 2.9 °C y 59.7% de precipitación, para la estación de A4 (Pisco) tiende a incrementar 3.3°C y 56.9%, posteriormente la estación A2 (Pisco) tendrá un incremento de hasta 2.8 °C y 59% de precipitación.

En cuanto al análisis de la respuesta hidrológica ante las proyecciones realizadas de cambio climático considerados desde 2015 – 2100, indican que la cuenca experimentará un incremento máximo de flujo de descarga para el escenario SSP 4.5 prevé 47.06 % y SSP 8.5 prevé 62.9 % del flujo observado según el modelo climático CNRM-ESM2-1 del CMIP 6.

5. Recomendaciones

La ausencia de estaciones con información consistente, limita al estudio en la simulación con SWAT, debido a que la variable de mayor influencia es la precipitación y de igual forma las estaciones hidrológicas no cuentan con información o simplemente no se encuentran estaciones, esto dificulta estudios de comportamiento hidrológico en una cuenca.

A la hora de realizar el estudio de una cuenca se debe de hacer la revisión exhaustiva de la cuenca para ver si se encuentra una presa, hidroeléctrica, canales de riego, estos factores se alteran a la hora de modelar en otro caso se debe considerar estos factores a la hora de modelar en SWAT ya que tiene incorporado los diferentes factores en el paquete de SWAT.

Las variables como tipo de suelo y cobertura se mantuvieron estáticos sin cambios para los escenarios futuros; se debe considerar el cambio de cobertura en otras investigaciones a realizar.

Realizar más investigaciones con más escenarios climáticos ya que el sesgo de la predicción es grande, para reducir el sesgo se necesita considerar más modelos climáticos y más estaciones dentro de la cuenca.

6. Agradecimiento

Al ing. Gary Chota Loayza de la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, por la ayuda con el modelamiento con SWAT de manera directa y con los videos en YouTube. Al ing. Kevin Traverso Yucra por la ayuda con el downscaling de los modelos climáticos globales. Al ing. Renny Aguilar Diaz por su enseñanza y guía en modelamiento con SWAT.

7. Referencia

- Arnold, J. G., Uribe, N., Neitsch, S. L., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2010). SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. *Grassland, Soil and Water Reserch Laboratory*, 1–47.
- Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F. ., & Sabino, E. & F.-O. (2017). *Uso del Producto Grillado PISCO de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>
- Bajracharya, A. R., Bajracharya, S. R., Shrestha, A. B., & Maharjan, S. B. (2018). Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin, Nepal. *Science of the Total Environment*, 625, 837–848. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.332>
- Deltares; Inside; FutureWater. (2019). *El Marco del Árbol de Decisión : Aplicación a la Cuenca de Chancay-Lambayeque , Perú Informe Final*.
- Destá, H., & Lemma, B. (2017). SWAT based hydrological assessment and characterization of Lake Ziway sub-watersheds, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.08.002>
- Devkota, L. P., & Gyawali, D. R. (2015). Impacts of climate change on hydrological regime and water resources management of the Koshi River Basin, Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 502–515. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.023>
- Echeverría Bonilla, J. (2011). Evaluación de la Vulnerabilidad Futura del Sistema Hídrico al Cambio Climático. *Programa de Las Naciones Unidas Para El Desarrollo – Instituto Meteorológico Nacional*.
- Gassman, P. W., Reyes, M., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2016). *SWAT Peer-Reviewed Literature : A Review by (Issue March)*.
- Jayo Jiménez, P. S. (2011). *Modelación de la relación precipitación esorrentía en la cuenca del río Mala, mediante el modelo PRECAUD V.1.0*.
- Jodar Avellan, A., Ruiz, M., & Melgarejo, J. (2018). Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 240–253. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564>
- Leon Ochoa, R. F. (2017). *Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático*. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Maintainer, G., & Gudmundsson, L. (2016). *Package “qmap” Type Package Title Statistical Transformations for Post-Processing Climate Model Output*. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383>
- Marin, M., Clinciu, I., Tudose, N. C., Ungurean, C., Adorjani, A., Mihalache, A. L., Davidescu, A. A., Davidescu, Șerban O., Dinca, L., & Cacovean, H. (2020). Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small forested watershed using SWAT: A review. *Environmental Research*, 184(June 2019). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109330>
- SENAMHI. (2017). *Modelamiento hidrológico de la region hidrografica del Titicaca*.
- Thavhana, M. P., Savage, M. J., & Moeletsi, M. E. (2018). SWAT model uncertainty analysis, calibration and validation for runoff simulation in the Luvuvhu River catchment, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 105, 115–124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.03.012>
- Traverso Yucra, K. arnold. (2018). *Generación de caudales medios mensuales a partir de las características hidrológicas de la cuenca del río Huancané*. 1–13.
- Valladares Martel, E. A. (2017). *Respuesta hidrológica de la cuenca del río santa en condiciones de cambio climático*.
- Weber, J. F., & Ocampo, S. B. (2019). Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina). *Aqua-LAC*, 11(1), 34–53. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-1-03>