

Revisión de literatura del Modelo WEAP en la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático

RESUMEN

Ruth Moreno Sánchez

jmorenos@unasam.edu.pe

Escuela de Postgrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú.

Fidel Aparicio Roque

daparicior@unasam.edu.pe

Escuela de Postgrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú.

La seguridad hídrica presente y futura enfrentan grandes desafíos debido a la disminución de las precipitaciones pronosticadas por los efectos de la variabilidad y el cambio climático, que es sin duda el mayor desafío ambiental al que se enfrenta la humanidad. El objetivo de este artículo fue explorar literatura científica actualizada de acceso abierto, entre los años 2017 al 2024 en la seguridad hídrica para escenarios futuros mediante el software de modelamiento WEAP (Sistema de Planificación y Evaluación del Agua). El procedimiento metodológico fue la revisión sistemática usando el operador lógico AND con términos “climate change”, “water safety” y “WEAP” en las bases de datos Scopus, Scielo, Scisearch, Proquest y Redalyc. Como resultado se identificaron artículos en Scopus (21), Scielo (15), Scisearch (20), Proquest (12) y Redalyc (10) que evidencian la evaluación de la seguridad hídrica presente y futura bajo cambios climáticos utilizando el modelo WEAP. Se concluye que, entre los años 2017 al 2024 ha habido un interés creciente en estudiar el cambio climático y la seguridad hídrica futura. La literatura enfatiza la importancia de promover la investigación en entornos de pregrado y postgrado para prevenir futuras crisis hídricas.

Palabras clave: Cambio climático; Seguridad hídrica; WEAP

Cómo citar este artículo: Revisión de literatura del Modelo WEAP en la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático. (2025). Aporte Santiaguino, 18(1), pp. 111-124. <https://doi.org/10.32911/as.2025.v18.n1.1258>

Recibido: 2024-09-13 | Aceptado: 2025-02-12

Literature review of the WEAP Model in water security and adaptation to climate change

Present and future water security face great challenges, due to the decrease in predicted rainfall due to the effects of climate variability and change, which is undoubtedly the greatest environmental challenge facing people around the world. The objective of this article was to explore scientific literature produced for an updated open access review, in the last 10 years on water security for future scenarios, using the WEAP (Water Planning and Evaluation System) as modeling software. The methodological procedure was the systematic review, using the logical operator AND with terms, “climate change”, “water safety” and “WEAP” in the databases Scopus, Scielo, ScienceDirect, Proquest and Redalyc. The results identify that at least they existed in Scopus (21), Scielo (15), ScienceDirect (20), Proquest (12) and Redalyc (10) that evidence the evaluation of present and future water security under anthropogenic climate changes using the model WEAP. It is concluded that, in the last 10 years, there has been a growing interest in studying climate change and future water security, and the literature emphasizes the importance of promoting research in undergraduate and graduate environments at universities to prevent future water crises.

Keywords: Climate change; Water safety; WEAP

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos de la humanidad en el siglo XXI, dada su profunda incidencia tanto en los ecosistemas como en el desarrollo socioeconómico global. Este fenómeno, íntimamente vinculado a la actividad humana, ha sido objeto de creciente atención científica debido a los impactos irreversibles que puede generar sobre la sociedad y el ambiente. Su carácter disruptivo pone en entredicho la histórica capacidad de adaptación

de las sociedades humanas, y ha sido reconocido como una amenaza significativa para la seguridad humana (Lee y Sáenz, 2023).

Actualmente existe un consenso generalizado sobre la realidad del cambio climático y la necesidad urgente de tomar medidas inmediatas y de gran alcance. No obstante, a pesar de la preocupación científica y la retórica alarmista, las variables climáticas empeoran. La base sintomática sobre la que se basa la legitimidad del discurso ambiental, su práctica y la de muchos movimientos climáticos, descansa sobre traumas reprimidos. Desplegar trayectorias político-ecológicas diferentes requiere transgredir la fantasía que oculta estos traumas (Swyngedouw, 2021).

El cambio climático también es de gran complejidad epistémica por su carácter global, acumulativo, desigual, no-lineal, ubicuo, persistente, radical, contraintuitivo, entre otros. Para este fenómeno, el conocimiento científico disponible es insuficiente, ya que cuestiona las fronteras y articulaciones de las disciplinas y carece de modelos de escenarios a escala regional y local para estimar con total fiabilidad consecuencias futuras (González y Meira, 2021).

El cambio climático es un problema de interés público a escala global. Por sus dimensiones espaciales y temporales, este fenómeno requiere la construcción de una perspectiva global amplia para ser legible. Las ciencias del clima en Chile presentan una condición híbrida, entre vida local y pertenencia global. Para ello, exploran la tensión entre las condiciones locales de investigación en Chile y el estudio global del cambio climático en torno a dos aspectos centrales: el uso local de dispositivos de visualización y la organización de las comunidades epistémicas que estudian el clima (Aguirre et al., 2022).

En Ecuador, las principales amenazas climáticas a nivel local son el aumento de días con

lluvias extremas, intensidad de la lluvia, aumento de la temperatura media y condiciones de sequedad y los sectores más afectados –de acuerdo con el nivel de riesgo– serán la agricultura, los agricultores y los asentamientos humanos. Estos riesgos y amenazas instan a la acción urgente frente a los dramáticos efectos del cambio climático, sobre todo en el nivel local, donde existe mayor vulnerabilidad (Sánchez Lechón, 2023).

El estudio de las percepciones del cambio climático en contextos de los andes tropicales responde a las necesidades actuales de investigación sobre cómo las comunidades alto andinas perciben e interpretan el cambio climático. El vacío de literatura existente en estos contextos categorizados en vías de desarrollo comprende un reto y una tarea importante para hacer frente al cambio climático. La importancia de integrar perspectivas locales va recibiendo mayor atención debido a la necesidad de comprender las respuestas de las personas desde diferentes posiciones del mundo, en este caso particular, de los pobladores andinos de Perú (Monge et al., 2022).

El efecto del cambio climático en esta región, considerada como una de las más secas del mundo según las evidencias encontradas y registradas, puede ser favorable o desfavorable para la disponibilidad hídrica. Las evidencias del cambio climático, como sequías y aluviones, se vienen presentando en la región sur de Perú y norte de Chile, denominada cabecera del desierto de Atacama. En los últimos años se han presentado eventos extraordinarios de precipitación que han generado almacenamientos superficiales, crecimiento de vegetación y flujos en superficie tipo aluvión en zonas donde no es normal que se presenten. Estos eventos son considerados como evidencias de cambio climático; las condiciones normales se han alterado y los daños son fehacientes (Pino et al., 2022).

Alcanzar y sostener la seguridad hídrica definida en términos generales como la capacidad de aprovechar el potencial productivo del agua y limitar su potencial destructivo brinda un enfoque para las estrategias de adaptación y un marco para la acción. Para los países que no hayan alcanzado la seguridad hídrica, el cambio climático hará que ello resulte aún más difícil; mientras que para aquellos que tienen seguridad hídrica, probablemente les resulte difícil sostenerla. Es probable que todos necesiten destinar recursos adicionales a la gestión de recursos hídricos (Sadoff y Muller, 2010).

La introducción del presente artículo de revisión muestra la problemática del cambio climático como una consecuencia de la actividad humana y que ahora es objeto de estudio para prever su impacto futuro, exponiendo al peligro los ecosistemas, el progreso global y la capacidad de adaptación social. Existe un acuerdo generalizado sobre la urgente necesidad de tomar medidas, a pesar de que el problema persiste y se hace cada vez más necesario abordar y desarrollar políticas ambientales más efectivas. Esto es particularmente evidente en áreas como los glaciares peruanos, donde el cambio climático ha alterado significativamente el acceso al agua, evidenciado por eventos extremos que resaltan sus efectos adversos y directos. El objetivo de este artículo fue explorar literatura científica producida para una revisión actualizada de acceso abierto, entre los años 2017 al 2024, en la seguridad hídrica para escenarios futuros mediante el software de modelamiento el WEAP.

MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis de revisión sistemática se realizó con los lineamientos de la declaración PRISMA para su correcta revisión (Figura 1).

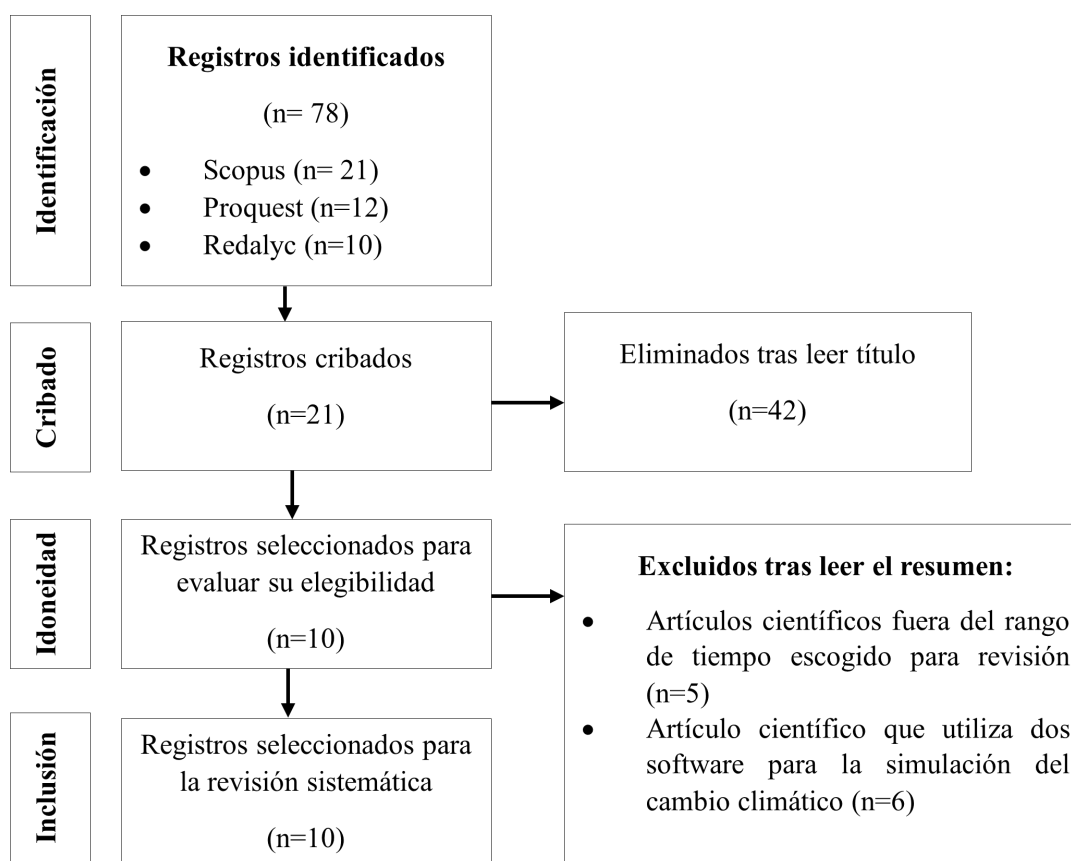
La metodología de revisión de la literatura científica consistió en identificar y extraer la información más relevante de diversas plataformas de información (Scopus, Proquest, Redalyc, ScienceDirect, Scielo) con los términos “climate change”, “water safety” y “WEAP”. Seguidamente, se utilizó el operador lógico AND. La búsqueda reveló la existencia de un número importante

de publicaciones, algunas de las cuales fueron repetitivas o no relevantes para la revisión. Para organizar la información recopilada se siguieron cuatro etapas: identificación, cribado, idoneidad y la inclusión de los artículos seleccionados para su análisis.

Finalmente, se llevó a cabo un resumen consolidado de la información recolectada con el fin de organizar los datos de las distintas secciones del trabajo de forma integrada, comparar la información recabada y organizarla de manera coherente.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA en cuatro niveles



Nota. Adaptado de *Revista de Investigaciones Altoandinas – Journal of High Andean Research* 24(1), 53–64, enero–marzo 2022.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Desarrollo

En el artículo científico titulado “Perspectiva futura del presupuesto hídrico en el caso de tres escenarios en Afganistán utilizando el programa WEAP”, Saka y Mohammady (2024), se plantearon como objetivo utilizar el software WEAP para la gestión de los recursos hídricos y el cálculo del presupuesto hídrico de la cuenca del río Balkh. La metodología fue introducir en el software los recursos hídricos de la cuenca y 10 sitios de demanda (riego, agua potable, entre otros). Se obtuvieron datos de precipitaciones, evaporación, escorrentía, entre otros, de estaciones de aforo de caudales durante largos años (2010-2021). Luego se ingresaron datos hidrológicos e información sobre población, tierras de riego y uso de agua potable. El escenario 1 (situación actual) se creó ingresando los datos existentes en el modelo creado. Posteriormente, al escenario actual se le agregaron los valores máximos y mínimos promedio mensuales de largo plazo de precipitación, evaporación, escorrentía y valores similares. Los resultados de los pronósticos entre los años 2022-2050 se crearon con el Escenario 2 (caso optimista) y el Escenario 3 (caso pesimista) y se realizaron análisis en tres situaciones diferentes y se examinaron los resultados. Los resultados mostraron que las necesidades satisfechas actuales de la cuenca del río Balkh son del 7,81 % con pérdidas. Se ha calculado en un 27,14 % en una situación optimista y un 1,71 % en una situación pesimista para 2050. Las necesidades satisfechas actuales de la cuenca, excluidas las pérdidas, son del 12 %. Se calcula como 33,9 % en la situación optimista y 3,1 % en una situación pesimista para 2050. Concluyeron que los recursos hídricos de Afganistán deben manejarse con un enfoque de gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) y la planificación futura debe realizarse teniendo en cuenta las necesidades humanas, el impacto ambiental y las visiones del gobierno. Los recursos hídricos deben planificarse de manera

más eficiente controlando la cantidad de pozos no documentados, perforando y detectando las pérdidas y fugas en los sistemas existentes con ciertos métodos.

En la investigación titulada “Evaluación de la demanda de agua a largo plazo para el sistema Mgeni mediante el WEAP considerando la demografía y los períodos prolongados de clima seco”, Nagan et al. (2023) tuvieron como objetivo analizar la situación de los recursos hídricos en el Sistema Mgeni y evaluar la contabilidad futura de la oferta y la demanda basada en el software WEAP. En la metodología se utilizó el WEAP para analizar el área de estudio durante el período 2009-2050 para evaluar los impactos de varios escenarios sobre futuros déficits de suministro de agua, se utilizaron cuatro escenarios que tienen en cuenta las tasas cambiantes de crecimiento demográfico y los climas secos prolongados. Los resultados mostraron que la cuenca es relativamente sensible a los cambios en el crecimiento de la población y a los climas secos prolongados y esto alterará significativamente la disponibilidad de agua, causando un suministro de agua déficit. En la conclusión, mencionaron que, en respuesta a las demandas futuras de agua proyectadas, una técnica para superar la demanda insatisfecha es introducir estrategias de conservación y gestión de la demanda de agua para reducir las pérdidas y el déficit de agua encontrados. Al implementar medidas adecuadas, se pueden reducir las pérdidas de agua, previniendo la escasez de agua y dando tiempo a los tomadores de decisiones para brindar nuevas soluciones a los problemas de suministro de agua.

En el artículo científico titulado “Evaluación de los impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua superficial utilizando el modelo WEAP: un estudio de caso de la cuenca del río Buffalo, Sudáfrica”, Dlamini et al. (2023), se plantearon como objetivo evaluar las variaciones en la disponibilidad de agua superficial (SWA) inducidas por el cambio

climático en la cuenca del río Buffalo desde 2020 a 2100. La metodología utilizada fue WEAP con los datos físicos e hidrológicos de la cuenca y los datos climáticos proyectados de un conjunto de modelos de circulación general (GCM) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 del CMIP5. Los hallazgos del estudio proyectaron un aumento de las precipitaciones, especialmente en el futuro lejano (2070-2100), en el que la precipitación media anual aumentó un 5 % hasta 8,286 mm³/año en el peor escenario de cambio climático (RCP8.5), con evapotranspiración y captaciones de agua promedio de 4,500 mm³/año y 115 mm³/año, respectivamente; la escorrentía superficial y la SWA aumentaron un 8 % y un 10 %, arrojando promedios de 3,265 mm³/año y 287 mm³/año, respectivamente. Incluso con el aumento de SWA, las demandas insatisfechas también aumentaron un 113 % hacia finales del siglo XXI. Como conclusión, el estudio estableció que el cambio climático podría exacerbar la insuficiencia del sistema de suministro de agua de la cuenca para satisfacer las crecientes demandas, tales hallazgos presentan una oportunidad para que el enfoque integrado del nexo agua-energía-alimentos se siga utilizando para formular estrategias sostenibles de gestión del agua.

En la investigación titulada “Evaluación de la seguridad hídrica presente y futura según cambios antropogénicos y climáticos utilizando el modelo WEAP en el Cuenca Vilcanota-Urubamba, Cusco, Perú”, Goyburo et al. (2023) tuvieron como objetivo evaluar los niveles de seguridad hídrica actuales (2010-2016), a corto (2017-2040), mediano (2041-2070) y largo plazo (2071-2099) considerando escenarios socioeconómicos y de cambio climático utilizando el (WEAP) en la cuenca Vilcanota-Urubamba (VUB). La metodología utilizada fue la recolección de datos de caudal de la estación hidrométrica de Pisac para calibrar (1987-2006) y validar (2007-2016) el modelo WEAP aplicado a la región VUB. Los valores de eficiencia de Nash Sutcliffe fueron 0,60 y 0,84 para calibración

y validación, respectivamente. Se generaron diferentes escenarios de factores socioeconómicos (crecimiento demográfico y aumento de la eficiencia del riego) y del impacto del cambio climático para evaluar su efecto en el actual sistema de suministro de agua. Los resultados revelaron que la disponibilidad de agua es mucho mayor que la demanda actual en la VUB para el período (2010-2016). Para el corto, mediano y largo plazo, se consideraron dos escenarios: “Escenario 1” (RCP 4.5) y “Escenario 2” (RCP 8.5). Los escenarios de cambio climático mostraron que la disponibilidad de agua aumentará. Sin embargo, este aumento no cubrirá las demandas futuras en todas las subcuencas porque la disponibilidad de agua no se distribuye uniformemente en todas las subcuencas VUB. En ambos escenarios se detectó una demanda insatisfecha a partir de 2050. Para el periodo 2071-2099 se estimó una demanda insatisfecha de 477 hm³/año para el “Escenario 1” y de 446 hm³/año para el “Escenario 2”, debido a que las demandas poblacionales y agrícolas son las más altas, también se simuló los efectos de reducción la tasa de crecimiento y con la mejora de estructuras de riego. Por lo tanto, se plantearon dos escenarios más, generando así el “Escenario 3” (RCP 4.5 con gestión) y el “Escenario 4” (RCP 8.5 con gestión), esta gestión socioeconómica demostró ser eficaz para reducir la demanda insatisfecha hasta en un 50% en todas las subcuencas para el período 2071-2099. Esta investigación concluyó en que los resultados mostraron que el crecimiento demográfico tendría una contribución mayor que los impactos del cambio climático al estrés hídrico futuro. Para el año 2050 se proyecta una demanda de agua descubierta de entre 56,72 hm³ y 42,62 hm³. Los escenarios más pesimistas arrojan una demanda insatisfecha de 477,21 hm³ para 2099. Además, de los escenarios típicos se exploraron estrategias de adaptación como el control migratorio y la mejora de la eficiencia del riego. Se demostró que son insuficientes para compensar la mayor demanda de agua. Por lo tanto, se sugiere implementar

estrategias de adaptación complementarias para garantizar la seguridad hídrica a largo plazo.

En el artículo científico titulado “Gestión integrada del agua ante el cambio climático a través de la aplicación del modelo WEAP en una región árida del Mediterráneo”, Hadri et al. (2022) se propusieron como objetivo establecer un marco de modelado integrado para evaluar el impacto del cambio climático en el suministro y la demanda de agua a través de una zona árida en la llanura occidental de Haouz en Marruecos. Utilizaron cinco GCM para evaluar la disponibilidad de recursos hídricos futuros según vías de concentración representativas (escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5), la demanda de agua de los cultivos y la demanda de agua de riego proyectadas. Se analizaron teniendo en cuenta el impacto del cambio climático, tanto en la evapotranspiración de referencia como en la duración del ciclo de los cultivos. El balance hídrico futuro se simuló mediante la herramienta WEAP, que incluye varios escenarios socioeconómicos y de uso de la tierra bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. Los resultados revelaron una disminución importante en la precipitación neta con un promedio de 36,2% y 50,5% bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5, respectivamente. Concluyeron que, en términos de equilibrio hídrico, el escenario de “seguir como siempre” llevaría a una creciente demanda de agua insatisfecha de alrededor del 22% en el horizonte 2050 y a un mayor agotamiento del nivel freático que podría alcanzar los 2 m/año. Cambiar las prácticas de gestión y uso del agua sigue siendo la única solución para garantizar la sostenibilidad y hacer frente a la escasez de agua prevista.

En la investigación titulada “Evaluación del impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua en la parte superior del río Dong Nai Cuenca, Vietnam”, Khoi et al. (2021) investigaron el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua en la cuenca superior del río Dong Nai utilizando el modelo WEAP.

Hallaron que los escenarios de precipitaciones futuras se redujeron a partir de cinco GCM diferentes según RCP4.5 y RCP8.5 utilizando la herramienta Long Ashton Research Station Weather Generator (LARS-WG). Teniendo en cuenta el impacto del cambio climático, en general, se proyecta que la descarga anual de los ríos en la región de estudio tendrá tendencias ascendentes en el futuro, excepto para el período futuro cercano de la década de 2030 bajo el RCP4.5. Además, se espera que en el futuro aumente el caudal de los ríos durante la estación seca. Los resultados consideraron la condición base de uso del agua, donde hubo un déficit hídrico anual de aproximadamente 329,103 m³, que ocurrió principalmente en la estación seca de enero a marzo. El cambio climático puede reducir la escasez de agua en la región de estudio entre un 7,0 y un 30,1% en el futuro bajo los impactos combinados del cambio climático y la creciente demanda de agua, la escasez de agua variará del 18,6 al 6,0%. Los investigadores concluyeron que los resultados pueden proporcionar información valiosa para implementar una planificación y gestión futura adecuada de los recursos hídricos en la región de estudio.

En el artículo científico titulado “Evaluación integrada de la influencia del cambio climático sobre la disponibilidad intraanual actual y futura de agua en el río Vaal”, Akanbi et al. (2021) evaluaron la influencia del cambio climático en la disponibilidad y demanda de agua intraanual actual y futura utilizando un enfoque de múltiples niveles en el que se analizan escenarios climáticos, modelos hidrológicos y análisis socioeconómicos. Se aplicaron consideraciones. Utilizaron el WEAP para proyectar un aumento en las necesidades futuras de agua, brechas en la garantía futura del agua y resaltar las limitaciones en estrategias de gestión existentes. Los resultados muestran que los desafíos del suministro de agua se agravarán en el futuro como en el aumento de temperatura y reducciones de precipitaciones. También se pronosticaron las reducciones

promedio mensuales del caudal de agua (8-10%) para los meses de verano después de 2040. El estudio recomienda una combinación de planes de adaptación, monitoreo de factores de estrés climáticos y no climáticos, reutilización de aguas residuales, conservación, gestión de la demanda y transferencias entre cuencas para reducir la incertidumbre futura en la sostenibilidad hídrica mensual.

En la investigación titulada “Evaluación de la disponibilidad de agua en la cuenca del río Cabanillas del Altiplano peruano bajo escenarios climáticos regionalizados”, Pilares et al. (2018) establecieron un modelo para evaluar la disponibilidad hídrica de la unidad hidrográfica del Río Cabanillas (2.845 km²) perteneciente al Lago Titicaca en el Altiplano peruano para diferentes escenarios de cambio climático regionalizado. Para la modelación hidrológica de la disponibilidad de agua regulada de la cuenca del río Cabanillas, se utilizó el modelo WEAP para evaluar el comportamiento de la disponibilidad para el sistema integral Lagunillas considerando los efectos del cambio climático del escenario actual y futuro sobre el sistema de almacenamiento y las demandas de agua, se utilizaron los escenarios climáticos regionalizados de tres (3) modelos globales: CANESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR; y dos (2) escenarios de emisiones, un escenario intermedio, RCP 4.5; y un escenario pesimista, RCP 8.5, el modelo se construyó con base en un escenario futuro proyectado para el año 2099. Los autores concluyeron que solo el 80 % de la demanda de la unidad hidrográfica estudiada está satisfecha; sin embargo, el cambio climático tiene un efecto positivo en los aportes de agua, lo que se manifiesta en un aumento del 15 % al 20 % en la disponibilidad de agua para el Sistema Integral de Lagunillas en todos los escenarios.

En el artículo científico titulado “Reducción de las proyecciones climáticas para la cuenca costera peruana de Chancay Huaral para respaldar el modelado de descarga de ríos

con WEAP”, Olsson et al. (2017) evaluaron los impactos del cambio climático en las descargas anuales y mensuales en la cuenca CH para el período futuro 2051-2080. La metodología fue utilizar los sesgos en las variables de entrada. Por lo tanto, las series temporales de temperatura y precipitación con corrección de sesgo de 31 GCM con los escenarios de emisión RCP4.5 y RCP8.5 se utilizaron como insumos para el modelo del WEAP. La corrección de sesgo y la reducción de escala de los GCM se implementaron utilizando un método de mapeo de cuantiles, que son nuevos conocimientos hidrológicos para la región. En promedio, los GCM indican un aumento de las temperaturas medias anuales de 3,1 °C (RCP4,5) y 4,3 °C (RCP8,5) y de la precipitación total de un 20% (RCP4,5) y un 28% (RCP8.5). Al aumentar la precipitación total, también aumentan los caudales de los ríos, pero la variabilidad entre los GCM es considerable. Concluyeron en que los mayores aumentos en el alta mensual ocurren en la temporada de lluvias (noviembre - abril), con un incremento de hasta el 31% de la media multimodelo de diciembre. A pesar de la mayor descarga anual para el resultado medio multimodelo, las descargas en la estación seca pueden disminuir según algunos GCM, lo que muestra la necesidad de una futura gestión del agua adaptada.

En la investigación titulada “Modelación hidrológica de una cuenca del norte árido de México y su respuesta a cambios ambientales”, Esquivel et al. (2017) evaluaron el impacto de las variaciones de los patrones climáticos sobre el escurrimiento de la cuenca del río Sextín mediante el modelo hidrológico WEAP. El esquema hidrológico se elaboró con información cartográfica de tipo vectorial y ráster, datos de uso de suelo, vegetación, climatológicos e hidrométricos de la zona de estudio, la parametrización y calibración del modelo comprendió de 1971 a 2004. La eficiencia predictiva del modelo se evaluó mediante NSE (Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe), % BIAS y R², obteniéndose

valores de 0.81, 12.1 y 0.81, respectivamente. Se generaron escenarios regionalizados futuros de cambio climático con el modelo LARS-WG, A1B (crecimiento económico rápido) y A2 (incremento continuo de la población), para los años 2010-2039 y 2040-2069. Los resultados mostraron un posible incremento promedio anual de 1 °C, tanto para la temperatura máxima como mínima, en ambos periodos analizados. Referente a la precipitación, se proyectó un aumento, al igual que en el escurrimiento de la cuenca en los escenarios climáticos regionalizados. Se concluyó que la información generada en este estudio puede ser de utilidad para la ordenación y gestión hidrológica de la cuenca.

Discusión

Del tema escogido para la revisión, los artículos científicos muestran la importancia del modelo WEAP para prevenir la seguridad hídrica futura en base a resultados que indican que asegurar el acceso al agua es una táctica efectiva de adaptación, ofreciendo ventajas directas a las comunidades vulnerables y excluidas y apoyando los objetivos de desarrollo del del siglo XXI. Al hacerlo, también mejora los sistemas y la capacidad para manejar los riesgos asociados al clima en el futuro.

Saka y Mohammady (2024) en la investigación realizada dieron a conocer que las necesidades satisfechas actuales de la cuenca del río Balkh son del 7,81 % con pérdidas. Se ha calculado un 27,14 % en una situación optimista y un 1,71 % en una situación pesimista para 2050. Por otro lado, Hadri et al. (2022) en los resultados de su investigación revelaron que existe una disminución importante en la precipitación neta en la llanura occidental de Haouz en Marruecos con un promedio de 36,2% y 50,5% y en términos de equilibrio hídrico, llevaría a una creciente demanda de agua insatisfecha de alrededor del 22% en el horizonte 2050.

En la investigación realizada por Olsson et al. (2017) se evaluaron los impactos del cambio climático en las descargas anuales y mensuales en la cuenca Chancay Huaral para el período futuro 2051-2080, determinando que la planificación futura de los recursos hídricos debe realizarse teniendo en cuenta las necesidades humanas, el impacto ambiental y las visiones de gobierno. Por otro lado, Khoi et al. (2021) investigaron el impacto del cambio climático en la disponibilidad de agua en la cuenca superior del río Dong Nai utilizando el modelo WEAP. Los resultados proporcionaron información valiosa para implementar una planificación y gestión futura adecuada de los recursos hídricos en cada región de estudio.

Nagan et al. (2023), en la investigación realizada sobre los impactos de varios escenarios sobre futuros déficits de suministro de agua, concluyeron que, en respuesta a las demandas futuras de agua proyectadas, una técnica para superar la demanda insatisfecha es introducir estrategias de conservación y gestión de la demanda de agua para reducir las pérdidas y el déficit de agua encontrados. En otra investigación realizada por Dlamini et al. (2023) concluyeron que el cambio climático podría exacerbar la insuficiencia del sistema de suministro de agua de la cuenca para satisfacer las crecientes demandas. Tales hallazgos presentan una oportunidad para que el enfoque integrado del nexo agua-energía-alimentos se siga utilizando para formular estrategias sostenibles de gestión del agua.

En la investigación realizada por Goyburo et al. (2023) sobre la evaluación los niveles de seguridad hídrica actuales (2010-2016), corto (2017-2040), mediano (2041-2070) y largo plazo (2071-2099) considerando escenarios socioeconómicos y de cambio climático utilizando el WEAP en la cuenca VUB, los valores de eficiencia de Nash Sutcliffe fueron 0,60 y 0,84 para calibración y validación, respectivamente, generándose con estos valores diferentes escenarios

de factores socioeconómicos y del impacto del cambio climático para evaluar su efecto en el actual sistema de suministro de agua. Por otro lado, Esquivel et al. (2017) determinaron que los valores de eficiencia de Nash Sutcliffe para la calibración fue 0.81. Estos valores, de acuerdo a la clasificación estadística hecha por Moriasi et al. (2007), se encuentran dentro de la clasificación de rendimiento de satisfactorio y muy bueno, respectivamente.

Hadri et al. (2022) investigaron sobre la gestión integrada del agua ante el cambio climático a través de la aplicación del modelo WEAP en una región árida del Mediterráneo. Los resultados mostraron la disminución importante en la precipitación neta con un promedio de 36,2% y 50,5% bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. De otro modo Khoi et al. (2021), indicaron dentro de los resultados de su investigación que el cambio climático puede reducir la escasez de agua en la región de estudio entre un 7,0 y un 30,1% en el futuro bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 y la creciente demanda de agua. La escasez de agua variará del 18,6 al 6,0%.

Las investigaciones científicas han utilizado como principal software de modelamiento el WEAP. Akanbi et al. (2021) hicieron uso del WEAP para proyectar un aumento en las necesidades futuras de agua, brechas en la garantía futura del agua y resaltar las limitaciones en estrategias de gestión existentes. De la misma manera Pílares et al. (2018) utilizaron el modelo WEAP para evaluar el comportamiento de la disponibilidad para el sistema integral Lagunillas considerando los efectos del cambio climático del escenario actual y futuro sobre el sistema de almacenamiento y las demandas de agua.

CONCLUSIONES

Muchos países enfrentan desafíos críticos en la gestión del agua debido a la distribución de recursos escasos y la necesidad de abordar

preocupaciones ambientales y climáticas. Esta situación ejerce una presión considerable sobre los planificadores del agua, quienes deben implementar estrategias para un uso sostenible del agua. El uso de modelos de simulación adecuados es esencial para evaluar todas las opciones de gestión hídrica disponibles.

Se ha creado un nuevo enfoque en la gestión del agua que destaca la relevancia de los proyectos de suministro de agua, incluyendo consideraciones sobre la demanda y la conservación de su calidad. El WEAP ofrece una herramienta eficaz para planificar y analizar políticas de gestión de recursos hídricos, permitiendo evaluar diversas opciones de desarrollo y gestión del agua.

Los hallazgos reflejan el interés de los investigadores en demostrar la relación entre el cambio climático y la seguridad hídrica futura. La literatura utilizada se ha publicado entre los años 2017 y 2024, de los cuales 10 estudios se realizaron en distintos espacios y tiempos. Es importante que los investigadores puedan utilizar diferentes herramientas para poder mostrar el riesgo futuro al que estará expuesta la población.

REFERENCIAS

- Aguirre, G., Undurraga, T., Cotoras, D., & Orellana, T. (2022). El estudio científico del cambio climático en Chile: espacio local y fenómeno global. *Antropologías del Sur*, 9(17), 199-218. <http://dx.doi.org/10.25074/rantros.v9i17.2147>
- Akanbi, T., Remilekun., Thando, N., Nerhene, D. & Acher, E. (2021). Integrated assessment of the influence of climate change on current and future intra-annual water availability in the Vaal River catchment. *Water and Climate Change*, 12(2), 533-551. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.269>

- Dlamini, N., Sezanje, A., & Mabhaudhi, T. (2023). Assessing climate change impacts on surface water availability using the WEAP model: A case study of the Buffalo River catchment, South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46, (101330). <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101330>
- Esquivel-Arriaga, G., Nevarez-Favela, M. M., Velásquez-Valle, M. A., Sánchez-Cohen, I., & Bueno-Hurtado, P. (2017). Hydrological modeling of a basin in Mexico's arid northern region and its response to environmental changes. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 9(1), 3-18. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2016.12.008>
- González, E., & Meira, P. (2021). Educación para el cambio climático: ¿Educar sobre el clima o para el cambio? *Perfiles Educativos*, 42(168), 157-174. <https://doi.org/10.22201/iisue.24486167e.2020.168.59464>
- Goyburo, A., Rau, P., Lavado-Casimiro, W., Buytaert, W., Cuadros-Adriazola, J., & Horna, D. (2023). Assessment of Present and Future Water Security under Anthropogenic and Climate Changes Using WEAP Model in the Vilcanota-Urubamba Catchment, Cusco, Perú. *Water*, 15(7), 1439. <https://doi.org/10.3390/w15071439>
- Hadri, A., El Mehdi Saidi, M., El Khalki, M., Aachrine, B., Saouabe, T., & Ait Elmaki, A. (2022). Integrated water management under climate change through the application of the WEAP model in a Mediterranean arid region. *Water and Climate Change*, 13(6), 2415-2442. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.039>
- Khoi, D., Nguyen, V., Sam, T., Mai, N., Vuong, N., & Cuong, V. (2021). Assessment of climate change impact on water availability in the upper Dong Nai River Basin, Vietnam. *Water and Climate Change*, 12(8), 3851-3864. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.255>
- Lee, A. F., & Sáenz, A. V. (2023). Desastres y Cambio Climático: Un cambio de Paradigma. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 7(1), 219-227. <https://doi.org/10.55467/reder.v7i1.119>
- Monge-Rodríguez, F. S., Huggel, C., & Vicuna, L. (2022). Percepción del deshielo glaciar y el cambio climático en pobladores andinos de Perú: abordaje interdisciplinario. *Ambiente & Sociedad*, 25, e02272. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200227r2vu2022L3AO>
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans. ASABE* 2007, 50, 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nagan, V., Seyan, M., & Abunama, T. (2023). Assessment of long-term water demand for the Mgeni system using Water Evaluation and Planning (WEAP) model considering demographics and extended dry climate periods. *Water SA*, 49(4), 338-354. <https://doi.org/10.17159/wsa/2023.v49.i4.4019>

- Olsson, T., Kämäräinen, M., Santos, D., Seitola, T., Tuomenvirta, H., Haavisto, R., & Lavado W. (2017). Downscaling Climate Projections for the Peruvian Coastal Chancay-Huaral Basin to Support River Discharge Modeling with WEAP. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 13, 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.011>
- Pilares Hualpa, I., Montalvo, N., Mejía, A., Guevara- Pérez, E., Fano M., G., & Alfaro A, R. (2018). Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cabanillas del Altiplano peruano bajo escenarios climáticos regionalizados. *Revista INGENIERÍA UC*, 25(2). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70757669018>
- Pino-Vargas, E., & Chávarri-Velarde, E. (2022). Evidencias de cambio climático en la región hiperárida de la Costa sur de Perú, cabecera del Desierto de Atacama. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(1), 333-376. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-08>
- Reyes-Palomino, S. E., & Cano Ccoa, D. M. (2022). Efectos de la agricultura intensiva y el cambio climático sobre la biodiversidad. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(1), 53-64. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2022.328>
- Sadoff, C. W., & Muller, M. (2010). *La gestión del agua, la seguridad hídrica y la adaptación al cambio climático: efectos anticipados y respuestas esenciales*. Estocolmo: Global Water Partnership. <http://cenida.una.edu.ni/relectronicos/REP10S125.pdf>
- Sánchez, W. L. (2023). *Acción frente al cambio climático: gobernanza multinivel de los gobiernos subnacionales y locales en Ecuador*. Estado & comunes, revista de políticas y problemas públicos, 1(16), 39-59. <https://doi.org/10.37228/estado-comunes.v1.n16.2023.287>
- Swyngedouw, E. (2021). El apocalipsis es decepcionante: el punto muerto despolitizado del consenso sobre el cambio climático. *Punto Sur*, (5). <https://doi.org/10.34096/ps.n5.10997>
- Saka, F., & Mohammady, A. (2024). Future perspective of water budget in the event of three scenarios in Afghanistan using the WEAP program. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 49, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101602>